

# 滇东北 $M_s \geq 5.0$ 地震前地下流体异常特征 与 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震研究\*

李 琼<sup>1</sup>, 付 虹<sup>1</sup>, 朱荣欢<sup>2</sup>, 何德强<sup>3</sup>

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 昆明市防震减灾局, 云南 昆明 650500;  
3. 昭通市防震减灾局, 昭通 昭阳 657000)

**摘要:** 在对滇东北地区地下流体观测资料进行综合评估的基础上, 选择评估达到 I、II 类的观测资料, 采用日值、五日均值、旬均值、相关矩平、 $K-L$  拟合分析、CF 分析等方法, 对 2003~2012 年以来滇东北地区的 5 组  $M_s \geq 5.0$  地震进行震例回顾总结。归纳震前该区地下流体前兆异常的时空演化特征, 发现前兆异常数量在时间上具有阶段性, 异常项数在震前 6 个月开始增多, 震前 3 个月达到最大值, 临震前 1 个月部分异常转折结束, 异常数量出现降低; 异常在空间演化上具有震前 3 个月向震中收缩的特点。80% 的震例表明震中距 100 km 范围内的观测点异常比例远高于 100 km 范围外的观测点异常比例。将结果外推应用于 2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震, 发现他们具有较好的一致性, 表明滇东北地区  $M_s \geq 5.0$  地震前地下流体的异常特征具有普适性。

**关键词:** 滇东北地区; 地下流体; 前兆异常; 鲁甸 6.5 级地震

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2014)04-0495-08

## 0 引言

地下流体对地震的孕育、发生过程起着重要的作用。有地震学者认为“没有水, 就没有板块构造”, 在深部地下流体是影响地震孕育与发生的重要因素, 在浅部是灵敏地反映地震孕育与发生过程的重要前兆信息载体 (Mian, Tozer, 1990; Raleigh *et al.*, 1976; Simpson, 1986; 付碧宏等, 2008), 可见流体在地震孕育发展过程中具有重要意义。

很多地震学者就地下流体地震前兆异常特征研究方面做了大量工作, 得到许多有意义的结果。付虹等 (2007) 研究滇西南地区  $M \geq 5$  地震中、短临异常特征, 发现中等地震丛集活动过程中, 每次新的  $M \geq 5.0$  地震发生前, 流体前兆观测均有新的异常过程出现。赵慈平 (2002) 研究 2001 年云南几组中强地震前水氡前兆异常特征, 发现发震地点一般靠近趋势异常而远离突跳性异常, 发震时间确定在 1 个月内。付虹等 (2008) 研究云南  $M \geq 5.0$  地震前兆异常特征, 发现  $M \geq 6.0$  地震的异常持续时间长于  $M \geq 5.0$  地震; 趋势异常转折结束, 新突变异常

增多是地震孕育进入短临阶段的标志。林辉等 (2004) 研究云南地区强震前兆短期异常特征, 认为  $M \geq 5.5$  地震前兆的群体突变异常较为显著。范雪芳等 (2010) 研究华北地区水位与水氡中期、中短期前兆异常特征, 提出地下流体存在着趋势上升型的中期异常和转折型的中短期异常, 且不同地震的前兆异常图像具有相似性。高小其等 (2012) 研究新疆及邻区 7 级大震地下流体异常特征后, 认为震级与异常持续时间和分布范围成正比; 多学科前兆异常同步出现预示地震即将来临, 未来的震中在异常同步出现地区增多。杨晓芳等 (2013) 研究新疆及周边 7 级强震前地下流体异常时空演化特征, 得出异常的时空分布总体上存在着由外围向震中迁移的现象。这些研究结果均表明地震前多有流体观测异常出现, 但这些大部分是基于地震发生后的震例总结结果。

2003~2012 年, 滇东北地区先后发生了 8 次 5 组  $M_s \geq 5$  破坏性中等地震, 尤其是 2003~2006 年出现了 5 级地震丛集活动。使用滇东北地区地下流体固定台站观测资料, 并对其进行最佳地震对应原则清理, 对 2003~2012 年 5 组地震前流体异常的时空演化特征进行归纳、总结, 期望在不知道

\* 收稿日期: 2014-09-15.

**基金项目:** 云南省人民政府十项措施监测预报项目 (JCYB-20080601-05) 和中国地震局监测预报司 2012 年震情跟踪青年合同制项目 (2012020310) 共同资助。

具体震中位置时，能用固定区域的资料对该区的破坏性地震作出一定程度的判断。2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震的地下流体异常特征与之前发生在该区的 5 组 5 级地震具有较好的相似性，说明滇东北地区地下流体异常特征具有普适性，可为今后的短临跟踪提供参考。

1 地下流体资料选取

1.1 资料选取及分类原则

参考中国地震局“2013 年流体观测资料预报效能评估细则”，制定以下 4 条分类原则，并根据原则对滇东北地区的流体资料进行了评估。

(1) 地下流体观测值合理且稳定，并且至少要有 4 年以上连续资料。

(2) 环境因素对资料变化干扰不大或者干扰引起的变化可以通过技术途径和经验途径剔除。

(3) 对于符合 (1)、(2) 条件的观测资料，以观测点为圆心，将 250 km 半径内  $M_s \geq 5.0$  地震，400 km 半径内  $M_s \geq 6.0$  地震作为研究样本，对每项资料进行预报效能的资料评价。

(4) 资料稳定、连续，地震对应率和概括率

均在 60% 以上者评为 I 类；资料稳定、连续，地震对应率和概括率其中之一低于 60% 评为 II 类；资料基本稳定、连续，映震效果不是很明显，地震对应率和概括率均低于 40%，但是仍然可以用于日常震情跟踪工作的评为 III 类；资料不稳定，几乎没有任何映震效果的评为 IV 类。

1.2 综合评价结果

按照上述工作思路和评价原则，对 2003 年以来滇东北地区（25°~29°N，102°~106°E）37 个测点的 61 个测项资料进行逐项梳理，综合评定结果得到 I 类测项 32 项，占总测项的 52%，II 类测项 17 项，占总测项的 28%，III 类和 IV 类测项 12 项，占总测项的 20%。从评定结果可以看出，滇东北地区地下流体观测资料质量较好，其中水化学测项质量比水物理测项好，41 项水化学测项中 I 类、II 类、III 类和 IV 类测项分别为 28 项、11 项、0 项和 2 项，所占百分比分别为 68.3%、26.8%、0%、4.9%；20 项水物理测项中 I 类、II 类、III 类和 IV 类测项分别为 4 项、6 项、6 项和 4 项，所占百分比分别为 20%、30%、30%、20%。所选用的 I、II 类测项资料和测点分布见表 1 和图 1。

表 1 选用的 I、II 类地下流体资料测项一览表

Tab. 1 Precursory item of I and II class observation data

No	测项	数据起始时间/年	分析方法	等级	No	测项	数据起始时间/年	分析方法	等级
1	寻甸水温	2003	原始资料	II	24	鲁甸 CO <sub>2</sub>	2007	CF	I
2	东川水氢	1998	矩平	II	25	大关水氢	2005	原始资料	I
3	东川 CO <sub>2</sub>	2006	K-L 拟合	I	26	大关 pH 值	2008	原始资料	I
4	宣威水位	1996	CF	II	27	大关 CO <sub>2</sub>	2008	CF	I
5	富源水温	1999	原始资料	I	28	彝良水氢	2004	原始资料	I
6	沾益水温	2005	原始资料	I	29	彝良 CO <sub>2</sub>	2007	矩平	I
7	昭通十五数字水温	2010	原始资料	II	30	盐津水氢	2005	原始资料	I
8	巧家水氢	1990	原始资料	II	31	盐津 CO <sub>2</sub>	2008	矩平	I
9	巧家 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1995	原始资料	II	32	威信水氢	2003	CF	II
10	巧家 F <sup>-</sup>	1992	原始资料	I	33	普格水温	2002	矩平	II
11	巧家 Ca <sup>2+</sup>	1995	矩平	I	34	普格温泉水温	2003	CF	I
12	巧家 Mg <sup>2+</sup>	1995	矩平	I	35	普格 CO <sub>2</sub>	2002	矩平	I
13	巧家 CO <sub>2</sub>	2008	矩平	I	36	不拖水温	2002	矩平	I
14	毛春林 F <sup>-</sup>	1998	原始资料	II	37	不拖 CO <sub>2</sub>	2003	矩平	I
15	毛春林 Ca <sup>2+</sup>	2003	CF	I	38	会东 CO <sub>2</sub>	2002	矩平	II
16	毛春林 Mg <sup>2+</sup>	2003	CF	I	39	会东鲁吉水温	2005	原始资料	II
17	毛春林 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2003	CF	II	40	会东松坪 CO <sub>2</sub>	2003	矩平	I
18	永善水氢	1995	原始资料	II	41	会东淌塘 CO <sub>2</sub>	2008	矩平	I
19	鲁甸水氢	2005	原始资料	II	42	宁南 CO <sub>2</sub>	2005	矩平	I
20	鲁甸 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2005	矩平	I	43	宁南老木河 CO <sub>2</sub>	2005	矩平	II
21	鲁甸 F <sup>-</sup>	2005	CF	I	44	宁南松新 CO <sub>2</sub>	2006	矩平	I
22	鲁甸 pH 值	2005	原始资料	I	45	宁南葫芦口 CO <sub>2</sub>	2006	矩平	I
23	鲁甸电导率	2005	原始资料	I					

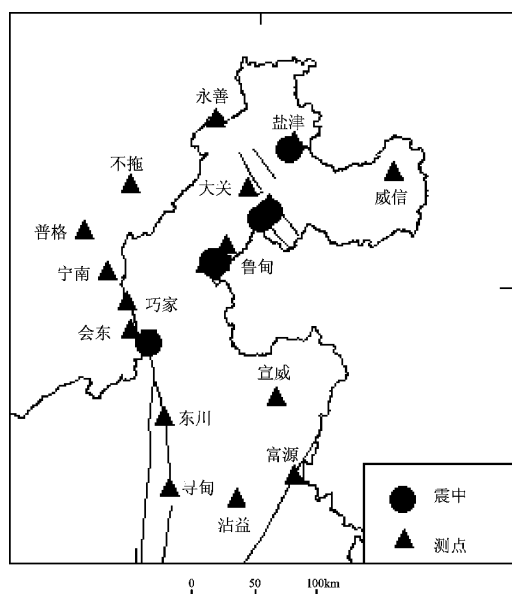


图1 选用的I、II类观测资料点及震例震中分布图  
Fig.1 Distribution of I, II class observation points  
and earthquake epicenter

## 2 分析方法

分别使用原始资料日值、五日均值和旬均值对观测资料进行异常识别和提取。对原始资料中异常信噪比较高, 直观给一阈值就能得到与地震相关较好的资料, 采用原始曲线加阈值的方法提取异常。对从原始曲线不能直接识别异常的资料, 分别用相关矩平、 $K-L$  拟合分析、CF 分析等方法 (陆远忠, 2002), 根据最佳对应原则进行了异常识别和提取。图 2 为不同分析方法提取的部分异常示意图。

总结异常特征时,采用中国震例编写《地震震例总结规范》(DB/T24-2007),将异常开始时间在震前1个月内出现的作为临震异常,2~6个月为短期异常,6个月至5年为中期异常,超过5年以上为长期异常。

滇东北地区地下流体观测项目在逐年增加,

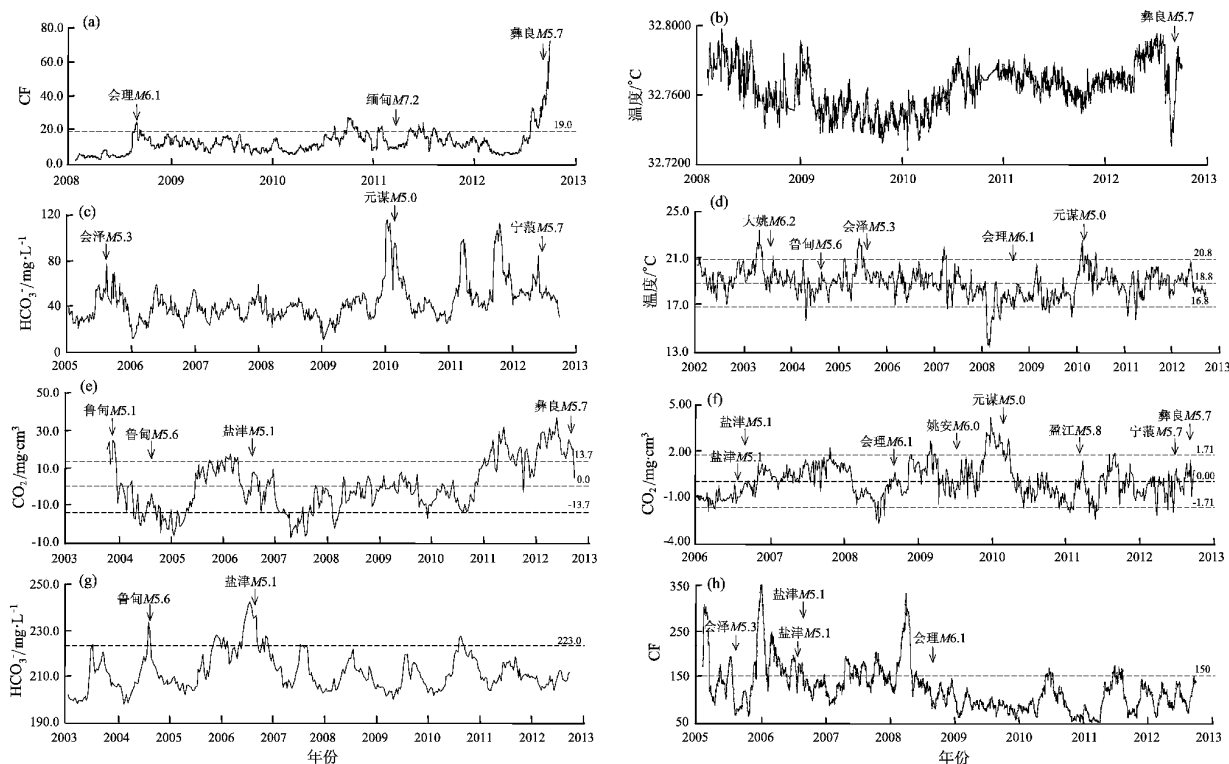


图2 多种分析方法得到的地下流体前兆异常时间进程曲线示意图

(a) 大关  $\text{CO}_2$  CF 日值; (b) 昭通水温日值; (c) 鲁甸  $\text{HCO}_3^-$  矩平五日均值; (d) 普格水温矩平五日均值; (e) 会东松坪  $\text{CO}_2$  矩平均均值; (f) 东川  $\text{CO}_2$   $K-L$  拟合五日均值; (g) 巧家大龙潭泉  $\text{HCO}_3^-$  旬均值; (h) 鲁甸大坪泉水氨 CF 日值

Fig. 2 The time course curve of underground fluid precursory anomaly by a variety of analytical methods

(a) CF daily values of CO<sub>2</sub> recorded by Daguan Station; (b) daily water temperature value recorded by Zhaotong Station; (c) departure mean value of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in five days recorded by Ludian Station; (d) departure mean value of water temperature in five days recorded by Puge Station; (e) departure mean value of CO<sub>2</sub> in ten days recorded by SongPing Station, Huidong; (f) *K-L* fitting mean value of CO<sub>2</sub> in five days recorded by Dongchuan; (g) mean value of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in ten days recorded by Dalongtan spring in Qiaojian; (h) CF day value of water radon recorded by Daping spring in Ludian

表 2 2003~2012 年滇东北地区  $M \geq 5$  地震参数Tab. 2 Parameters of  $M \geq 5$  earthquakes in Northeast Yunnan from 2003 to 2012

发震时间/(年-月-日)	震级	纬度/(°)	经度/(°)	发震参考地点
2003-11-15/2003-11-26	5.1/5.0	27.2/27.3	103.6/103.6	鲁甸/鲁甸
2004-08-10	5.6	27.17	103.6	鲁甸
2005-08-05	5.3	26.55	103.15	会泽
2006-07-22/2006-08-25	5.1/5.1	28.02/28.07	104.13/104.08	盐津/盐津
2012-09-07/2012-09-07	5.7/5.6	27.5/27.55	103.98/104.05	彝良/彝良

所挑选出来的测项起始时间不是统一的,但从得到的结果看观测数量的变化没有对结果造成影响。

### 3 震例分析

2003~2012 年在滇东北地区共发生 8 次 5 组  $M_s \geq 5$  破坏性地震(表 2, 图 1)。对这些地震前的异常进行具体分析,并给出每个地震前异常的基本特征。

#### 3.1 2003 年鲁甸 5.1、5.0 级地震

2003 年 11 月 15 日、26 日云南省鲁甸县先后发生 5.1、5.0 级地震,这组地震发生在鲁甸—昭通断裂上,震区处于川滇菱形块体东侧,属于扬子准地台滇东台褶带的滇东北台褶束,NE 向断裂、褶皱发育(非明伦等, 2004)。

地震前滇东北地区 I、II 类地下流体观测资料共有 13 个测点 20 个测项,其中有 10 个测点 15 个测项出现显著前兆异常,包含中期异常 1 项,短期异常 11 项,临震异常 3 项,且 33.3% 的异常在震前转折结束。震中距 100 km 范围内共有 5 个测点 12 个测项,其中 5 个测点的 10 个测项在震前出现了异常;震中距 100~150 km 范围内共有 5 个测点 5 个测项,其中 4 个测点 4 个测项在震前出现异常;震中距大于 150 km 范围共有 3 个测点 3 项测项,其中 1 个测点 1 项测项出现前兆异常。

#### 3.2 2004 年鲁甸 5.6 级地震

2004 年 8 月 10 日在云南省鲁甸县发生 5.6 级破坏性地震,极震区烈度为 VIII 度。

地震前滇东北地区 I、II 类地下流体观测资料共有 15 个测点 22 个测项,其中有 9 个测点 15 个测项出现显著前兆异常,包含中期异常 6 项,短期异常 7 项,临震异常 2 项,且 40% 的异常在震前转折结束。震中距 100 km 范围内共有 6 个测点 13 项测项,其中 6 个测点 12 个测项出现前兆异常;震中距 100~150 km 范围内共有 6 个测点 6 项

测项,其中 2 个测点 2 项测项出现前兆异常;震中距大于 150 km 范围共有 3 个测点 3 项测项,其中 1 个测点 1 项测项出现前兆异常。

#### 3.3 2005 年会泽 5.3 级地震

2005 年 8 月 5 日在云南省会泽县发生 5.3 级地震,发震构造为北北西向小江断裂与北东向昭通—鲁甸、会泽等断裂、褶皱带的交汇部位(谢英情等, 2005)。

地震前滇东北地区 I、II 类地下流体观测资料共有 21 个测点 33 个测项,震前有 13 个测点 16 个测项出现显著异常。其中中期异常 3 项,短期异常 11 项,临震异常 2 项。50% 的异常在震前转折结束。震中距 100 km 范围内共有 11 个测点 22 个测项,其中 7 个测点 10 个测项出现前兆异常;震中距 100~150 km 范围内共有 6 个测点 7 个测项,其中 3 个测点 3 个测项出现前兆异常;震中距大于 150 km 范围共有 4 个测点 4 项测项,其中 3 个测点 3 个测项出现前兆异常。

#### 3.4 2006 年盐津 5.1、5.0 级地震

2006 年 7 月 22 日、8 月 25 日云南省盐津县先后发生 5.1、5.0 级地震,这组地震发生在北西向的马边—盐津断裂上(非明伦等, 2006)。

地震前滇东北地区 I、II 类地下流体观测资料共有 24 个测点 38 个测项,其中有 17 个测点 24 个测项出现前兆异常,包含中期异常 3 项,短期异常 17 项,临震异常 4 项。20.8% 的异常在震前转折结束。震中距 100 km 范围内共有 5 个测点 5 个测项,其中 3 个测点 3 个测项出现前兆异常;震中距 100~150 km 范围内共有 3 个测点 7 个测项,其中 2 个测点 4 个测项出现前兆异常;震中距大于 150 km 范围有 16 个测点 25 个测项,其中 12 个测点 17 个测项出现了前兆异常。

#### 3.5 2012 年彝良 5.7、5.6 级地震

2012 年 9 月 7 日 11 时、12 时在云南省彝良县

先后发生 5.7 级、5.6 级破坏性双震,地震前滇东北地区 I、II 类地下流体观测资料共有 33 个测点 45 项测项,有 28 个测点 36 项测项出现显著前兆异常(表 7)。,包含中期异常 8 项,短期异常 25 项,临震异常 3 项。33.3% 的异常在震前转折结束。震中距 100 km 范围内有 10 个测点 15 项测项,全部出现前兆异常;震中距 100 ~ 150 km 范围内共有 18 个测点 25 项测项,其中 14 个测点 17 项测项出现前兆异常;震中距大于 150 km 范围有 5 个测点 5 项测项,其中 4 个测点 4 项测项出现前兆异常。

## 4 前兆异常特征分析

### 4.1 异常随时间的演化特征

每组地震前滇东北的流体异常月频次时间进程图,如图 3 所示,从图可见地下流体异常在中期阶段逐步增多,但发展趋势比较缓慢;地震前 3 ~ 6 个月的短期阶段异常急速增加,到震前 3 个月异常数量基本增长到前期的一倍,达到最高水平;震前 3 个月的短期阶段至临震当月,异常数量有所减少,部分异常转折结束。滇东北地下流体前兆异常在时间上具有明显的阶段性,在本区 5.0 ~ 5.9 级地震发震时间的演化过程中,越邻近地震发生短期异常的数量越多。出现异常项数超过总观测项数的 68%,则预示着进入 3 个月的短期阶段;部分异常转折结束,则预示着进入一个月的临震时间段。前兆异常在时间上的这种演化特点对于发震时间的判定有一定的指示意义。

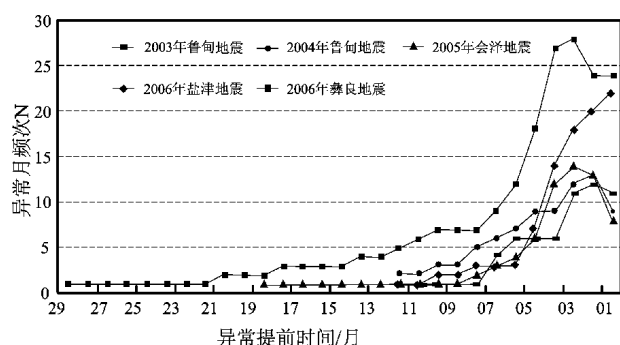


图 3 地下流体前兆异常月频次统计图

Fig. 3 Monthly frequency statistic of the underground fluid precursory anomalies

### 4.2 异常的空间分布特征

从图 4 前兆异常时空演化进程可以看出,滇东北 5.0 ~ 5.9 级地震前 100 天左右开始,震中

100 km 范围内异常显著增多,2005 年会泽 5.3 级和 2012 年彝良 5.6、5.7 级地震前,前兆异常有向震中收缩的现象,但并不是每组地震前都能勾画出前兆异常随时间向震中迁移的图像。部分学者研究云南 2001 年施甸中强震震群(黄雍等, 2002)、2007 年盐津 5.1 级双震(张立等, 2007)、2011 年缅甸 7.2 级地震(张立, 2013)震前地下流体异常时,认为震前异常有向震中迁移的现象。滇东北的中等地震前,这种现象并没有普适性。

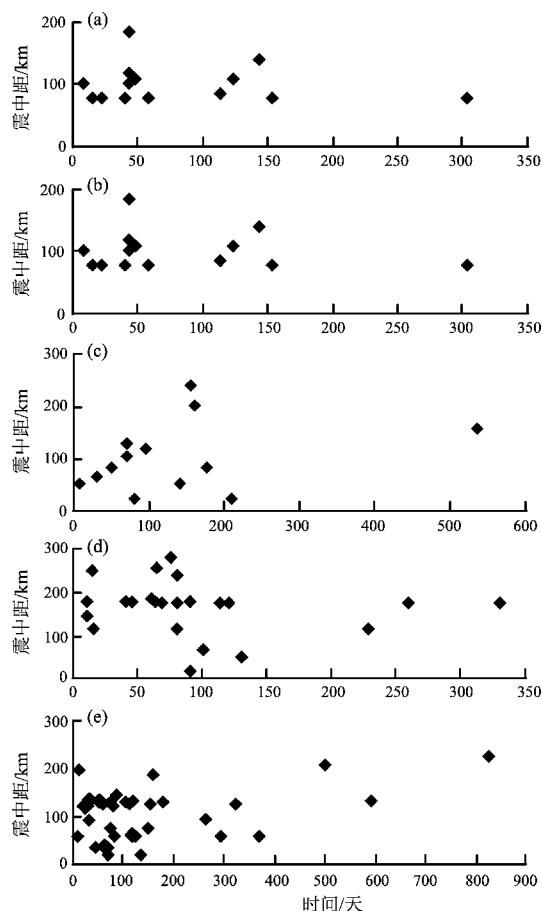


图 4 滇东北几组  $M > 5$  地震震前前兆异常时空演化进程图

(a) 2003 年鲁甸 5.1、5.0 级双震; (b) 2004 年鲁甸 5.6 级震; (c) 2005 年会泽 5.3 级地震; (d) 2006 年盐津 5.1 级双震; (e) 2012 年彝良 5.7、5.6 级地震

Fig. 4 Temporal and spatial evolution process of precursory anomalies before several groups of  $M > 5.0$  earthquakes in Northeast Yunnan

(a) Ludian  $M5.1$ 、 $M5.3$  earthquakes in 2003; (b) Ludian  $M5.6$  earthquakes in 2004; (c) Huize  $M5.3$  earthquake in 2005; (d) Yanjin  $M5.1$  double earthquakes in 2006; (e) Yiliang  $M5.7$ 、 $M5.6$  earthquakes in 2012.

从图 4 还可见,除在北段观测点相对较少的盐津 5.1 级地震前异常主要出现在震中 150 km 外,其余的 5.0~5.9 级地震前 100 km 范围内的异常数量远大于 100 km 外。这一方面说明观测点的密度很重要,只有震中附近的观测点达到一定密度,才有统计意义。另一方面也表明现阶段用前兆异常现象确定更小区域范围内地震危险性的地点预测是困难的。

5 鲁甸 6.5 级地震

2014 年 8 月 3 日 16 时 30 分在云南省鲁甸县发生 6.5 级地震,震中 (27.1°N, 103.3°E)。对表 1 中的 45 项 I、II 类地下流体观测资料,采用第 2 节中的分析方法提取前兆异常。分析结果显示,

地震前共有 27 项前兆出现异常,其中中期异常 4 项,短期异常 10 项,临震异常 13 项,37.0% 的异常在震前转折结束,具体异常情况见表 3。图 5a、b 为鲁甸地震前的典型前兆异常图。

在仅有的 4 项中期异常中,持续时间超过 9 个月的仅一项,从中期阶段的震前 8 个月至短期阶段的震前 3 个月异常数量增加缓慢;到了 6 月,异常开始大量出现,之后急剧增加,到了 7 月异常数量达到 26 项,是 6 月的 2 倍,临震异常十分显著,之后部分异常转折结束,继而发震,这与前面的震例研究结果具有较好的一致性(图 5c)。震前 60 天,震中距 100 km 范围内出现 15 项前兆异常,占总异常项数的一半以上,震中异常多的特点与前面的震例有较好的相似性(图 5d)。

表 3 鲁甸 6.5 级地震前兆异常特征参数统计表

Tab. 3 Parameters statistic of precursory anomaly characteristics of Ludian M6.5 earthquake

No	测项	方法	异常开始~结束时间 /年-月-日	持续时间 /天	异常开始至 发震/天	异常结束至 发震/天	震中距 /km
1	永善水氡	五日均值	2014-01-01~07-10	190	208	28	114
2	大关 pH 值	日值	2014-07-22	1	11	11	94
3	大关 CO <sub>2</sub>	日值	2014-07-24	1	9	9	94
4	大关水氡	五日均值	2014-04-20~07-25	95	103	8	94
5	巧家 Mg <sup>2+</sup>	矩平均均值	2014-03-20~05-30	70	133	63	73
6	巧家 Ca <sup>2+</sup>	日值	2014-07-16~07-21	5	17	12	73
7	巧家电导率	日值	2014-07-16~07-21	5	17	12	73
8	巧家 CO <sub>2</sub>	五日值	2013-12-10~07-30	230	235	3	73
9	盐津 CO <sub>2</sub>	五日均值	2014-05-05~08-03	88	28	0	143
10	东川 CO <sub>2</sub>	五日均值	2014-07-10~08-03	23	23	0	112
11	东川水位	五日均值	2014-04-15~08-03	108	78	0	112
12	鲁甸 F <sup>-</sup>	日均值	2014-02-11~08-03	172	172	0	27
13	鲁甸 pH 值	五日均值	2014-01-20~07-10	170	193	13	27
14	会泽水位	日均值	2014-07-21~08-03	12	12	0	74
15	雷波地温	日值	2014-07-29~08-03	4	4	0	132
16	普格水温	日变速率	2014-07-29~08-03	4	4	0	82
17	会东 CO <sub>2</sub>	日值	2014-06-07~08-03	56	56	0	89
18	昭通水位	日值	2014-07-03~08-03	30	30	0	49
19	宁南葫芦口 CO <sub>2</sub>	日值	2014-07-21~08-03	12	12	0	54
20	宁南松新 CO <sub>2</sub>	日值	2014-06-22~08-03	41	41	0	54
21	会东淌塘 CO <sub>2</sub>	日值	2014-06-04~08-03	59	59	0	89
22	宁南老木河 CO <sub>2</sub>	日值	2014-06-13~08-03	50	50	0	54
23	彝良 CO <sub>2</sub>	日值	2014-06-18~08-03	45	45	0	95
24	毛椿林 Ca <sub>a</sub> <sup>2+</sup>	日变速率值	2014-07-08~07-16	8	25	17	73
25	毛椿林 HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	日值	2014-07-01~08-03	32	32	0	73
26	宣威水位	日值	2014-07-05~08-03	28	28	0	126
27	寻甸模拟水温	五日均值	2010-05-15~2014-08-03	3 年 2 月	3 年 2 月	0	170

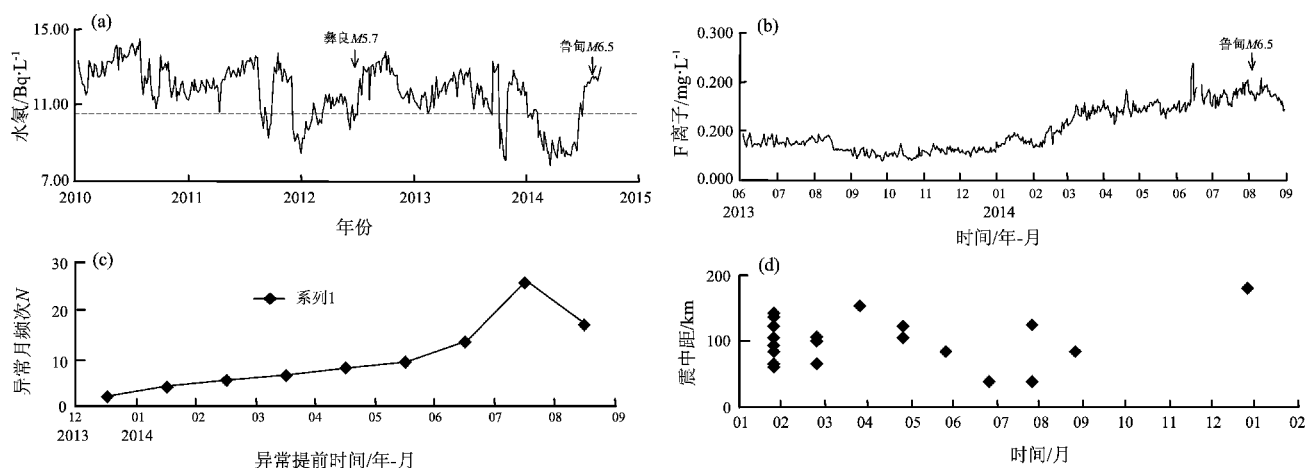


图5 典型前兆异常图及异常特征演化图

(a) 永善水氡五日均值; (b) 鲁甸 F 离子日值; (c) 前兆异常月频次  
随时间演化关系, (d) 前兆异常时空演化进程

Fig. 5 The typical precursory anomalies and characteristics of anomaly evolution

(a) mean value of water radon in five day at Yongshan Station; (b) daily value of fluorine at Ludian Station; (c) evolution relationship of monthly frequency of precursory anomaly varied with time; (d) spatial temporal evolution process of precursory anomaly; (d) the space-time evolution process of precursory anomalies

## 6 结论和讨论

使用滇东北地区的固定流体观测台站进行分析, 滇东北地区中等地震发生前, 短期阶段前兆异常显著增加, 异常比例大于 60%, 临震阶段有部分异常结束, 异常数量有减少的趋势。中等地震前没有观测到长期异常。

从流体前兆异常的空间分布特征看, 震前在震中 100 km 范围内异常比例比外围地区高的地震比例大于 80%, 表明在滇东北地区异常增多时异常集中区有可能是未来地震发生的地区。

从每组地震的异常统计结果可知, 震前中短期异常最多占 91.7%, 临震异常占 20%。表明中等地震前的异常均以中短期为主, 异常在时间上的演化特征, 可以对地震孕育进入短期阶段作一定程度的判断。

微观前兆异常是监视区域地壳应力增强作用下地壳介质产生应变和应力集中并达到一定量的结果和传递出的信息, 其异常幅度与应变幅度成正相关, 异常台项数和应力集中点数与区域应力强度也成正相关 (陈立德, 付虹, 2008)。中短期阶段这种前兆异常的增多可能与区域应力水平增高有关, 即前兆异常数量可以作为刻画区域应力水平的参量, 当异常增多, 区域应力水平增高时,

是有助于中等或较强地震发生的。

2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震前滇东北地区流体异常特征与该区之前发生的 5 组  $M \geq 5$  地震具有较好的相似性, 表明滇东北地区的破坏性地震前, 流体前兆异常的共性特征具有普适性, 可为以后的短临跟踪提供参考和借鉴。

## 参考文献:

- 陈立德, 付虹. 2008. 强震短临前兆异常共性特征的物理基础[J]. 地震研究, 31(2): 99-102.
- 范雪芳, 刘耀辉, 吴桂娥, 等. 2010. 华北地区水位与水氡中期、中短期前兆异常特征研究[J]. 地震研究, 33(2): 147-158.
- 非明伦, 付正光, 谢英情, 等. 2014. 云南鲁甸 5.1、5.0 级地震震害分析[J]. 防灾减灾工程学报, 24(4): 432-440.
- 非明伦, 周光全, 谢英情, 等. 2006. 盐津 5.1 级地震现场调查与烈度分析[J]. 地震研究, 29(4): 411-417.
- 付碧宏, 王萍, 孔屏, 等. 2008. 四川汶川 5.12 大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义[J]. 岩石学报, 24(10): 2237-2243.
- 付虹, 李永莉, 赵小艳, 等. 2008. 云南  $M \geq 5$  地震震前异常的统计特征[J]. 地震研究, 31(4): 335-339.
- 付虹, 王世芹, 秦嘉政, 等. 2007. 2007 年 5~6 月滇西南地区  $M \geq 5$  成组地震活动中、短临异常特征及预测[J]. 地震研究, 30(4): 34-310.
- 高小其, 王琼, 朱成英, 等. 2012. 7 级地震前地下流体前兆异常判定指标的研究[J]. 内陆地震, 26(2): 125-137.
- 黄雍, 张建国, 乔森. 2002. 2001 年云南施甸中强震群研究[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 林辉, 张平, 唐采, 等. 2004. 云南地区强震前兆短期综合异常特征研

- 究[J]. 地震研究, 24(4):113-118.
- 陆远忠. 2002. 基于 GIS 的地震分析预报系统[M]. 成都: 成都地图出版社.
- 谢英情, 付正兴, 非明伦, 等. 2005. 云南会泽 5.3 级地震构造背景及其序列活动特征[J]. 地震研究, 28(4):408-414.
- 杨晓芳, 孙小龙, 张涛. 2013. 新疆及周边 7 级强震前地下流体异常时空演化特征[J]. 内陆地震, 27(2):127-134.
- 张立, 申玻, 官致君, 等. 2007. 盐津地震流体前兆异常分析[J]. 地震, 27(2):121-129.
- 张立. 2013. 2011 年缅甸 7.2 级地震前云南地下流体异常特征分析[J]. 地震, 33(1):119-126.
- 赵慈平. 2002. 云南中强震的水氢前兆异常特征[J]. 地震研究, 25(2):140-148.
- Mian Z. U., Tozer D. C.. 1990. No water, no plate tectonics; convective-heat transfer and the planetary surfaces of Venus and Earth[J]. Terra Nova, 2(5):455-459.
- Raleigh C. B., Healy J. H., Bredehoeft J. D.. 1976. An experiment in earthquake control at Rangely Colorado[J]. Science, 191(4233):1230-1237.
- Simpson D. W.. 1986. Triggered earthquake[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 14(1):21-42.
- DB/T24-2007, 地震震例总结规范[S].

## Characteristics of Underground Fluid Anomalies before $M_s \geq 5.0$ Earthquakes in Northeast of Yunnan and Yunnan Ludian $M_s 6.5$ earthquake in 2014

LI Qiong<sup>1</sup>, FU Hong<sup>1</sup>, ZHU Rong-huan<sup>2</sup>, HE De-qiong<sup>3</sup>

(1. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Kunming Earthquake Prevention and Disaster Reduction Administration, Kunming 650041, Yunnan, China)

(3. Zhaotong Earthquake Prevention and Disaster Reduction Administration, Zhaotong 657000, Yunnan, China)

### Abstract

Based on a comprehensive evaluation about the underground fluid observation data in Northeast Yunnan area, we selected the observation data whose evaluation achieved class I and II, and reviewed and summarized five groups of  $M_s \geq 5$  earthquakes from 2003 to 2012 to conclude the temporal spatial evolution characteristics of precursory anomalies of underground fluid in the study area by using the method of the daily value, the mean value of five days, the mean value of ten days, correlation departure,  $K-L$  fitting analysis, CF analysis. The results show that the quantity of precursory anomaly varied with stages in time. The abnormal items began to increase in the six months and reached a maximum value in the three months before the earthquake, however, some abnormal items turned over and the abnormal quantity decreased in the one month before the earthquake. The spatial evolution characteristic of precursory anomaly was concentrating from outside to the epicenter in the three months before earthquake. The 80% earthquake cases show that the proportion of precursory anomaly of observation points within 100 km from the epicenter is far higher than that outside 100 km from the epicenter. The result was used for Yunnan Ludian  $M_s 6.5$  earthquake on Aug. 3, 2014, we found that they have good consistency, which indicated that abnormal characteristics of the underground fluid before  $M \geq 5.0$  earthquakes in the Northeast Yunnan could be applied widely.

**Key words:** northeast of Yunnan Province; underground fluid; precursory anomaly; Yunnan Ludian  $M_s 6.5$  earthquake