

杨芬, 李庆, 杨建文, 等. 2023年云南芒市 $M_s5.0$ 地震前地下流体异常特征[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 66–76. [YANG Fen, LI Qing, YANG Jianwen, et al. Characteristics of Underground Fluid Anomalies Before $M_s5.0$ Earthquake in Mangshi, Yunnan Province in 2023[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 66–76]

2023年云南芒市 $M_s5.0$ 地震前地下流体异常特征

杨 芬, 李 庆, 杨建文, 高 琼, 张华英, 杨树锋

(中国地震科学实验场大理中心, 云南 大理 671000)

摘要: 总结了2023年12月2日云南芒市 $M_s5.0$ 地震前, 云南地下流体异常在空间、时间、形态和同步性四个方面的特征: 云南地下流体共存在18项异常, 空间上主要集中分布在距震中350 km范围内的活动构造上及邻近区域, 以源兆和近兆为主, 异常空间动态发展过程为源兆最先出现, 其后源兆、近兆和场兆并存, 震前1个月, 异常测项向源区收缩; 异常时间主要集中在7月10日至8月9日, 期间达到异常指标的测项有13项; 时间上源兆和近兆都存在同步性异常现象, 同步性异常在2023年11月9日同样呈现出向源区收缩, 异常时间进程表现为中、短、临3个阶段, 源兆4项短期异常和3项临震异常, 近兆5项中期异常和5项短期异常, 场兆1项中期异常; 异常形态有持续性异常和突跳性异常两种, 异常过程表现为稳态→非稳态→稳态发展的特征, 反映地震孕育过程由稳态进入非稳态, 随后发震的动态过程。

关键词: 芒市 $M_s5.0$ 地震; 地下流体; 源兆; 近兆; 场兆; 同步性异常; 中短临异常

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0066-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.08

Characteristics of Underground Fluid Anomalies Before $M_s5.0$ Earthquake in Mangshi, Yunnan Province in 2023

YANG Fen, LI Qing, YANG Jianwen, GAO Qiong,

ZHANG Huanying, YANG Shufeng

(Dali Center of China Earthquake Science Experimental Site, Dali 671000, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of underground fluid anomalies in Yunnan Province before the $M_s5.0$ earthquake in Mangshi on December 2nd, 2023 were summarized in terms of space, time, shape, and synchronism. There were 18 anomalies in underground fluids in Yunnan. Spatially, it was mainly distributed on active structures and adjacent areas within 350 km from the epicenter, with focal precursors and near precursors as the main ones. The dynamic development process of anomaly space was that the focal precursor appeared first, and then the focal precursor, near precursor, and field precursor coexisted. One month before the earthquake, the anomaly measurement term shrank to the focal region. The anomaly time lasted mainly from July 10th to August 9th, during which 13 items reached the anomaly index. Temporally, there were synchronous anomalies in both focal and

收稿日期: 2024-03-18

作者简介: 杨芬(1971-), 女, 高级工程师, 主要从事地震预测研究。

E-mail: yangfen710806@sina.com

near precursors, and the synchronous anomalies shrank to the focal region on November 9th, 2023. The time course of anomalies was divided into three stages: middle-term, short-term, and impending, with four short-term anomalies and three impending earthquake anomalies in focal precursors, five middle-term anomalies and five short-term anomalies in near precursors, and one middle-term anomaly in field precursors. There were two kinds of anomaly forms: persistent anomaly and sudden anomaly. The anomaly process was characterized by steady-unsteady-steady development, which reflected the dynamic process of earthquake preparation from a steady state to an unsteady state, and then earthquakes occurred.

Keywords: $M_s5.0$ earthquake in Mangshi; Underground fluid; Focal precursor; Near precursor; Field precursor; Synchronous anomaly; Middle-short impending anomaly

0 引言

流体是地球的重要组成部分,在地壳中的各种动力过程与地球各圈层物质和能量交换中起重要作用。大量地球物理、地球化学和地质学资料证实发震断层深部存在高压流体,高压流体在断层构造活动、地震周期演化中具有重要作用。不同模型对流体的产生、运移具有不同解释,但均认为地应力、流体孔隙压力和水-岩耦合作用在断层演化和地震周期中具有重要作用^[1]。地下水广泛赋存于地震岩石的孔隙之中,能在各种驱动力作用下自由地流动。这一特性,决定了地下水对地壳运动,尤其是对地震的孕育与发生会有较灵敏的响应^[2]。

当震中附近的震源应力场变化、蠕动传播以及应变递次让位等震源演化过程出现,必将作用和牵连处于同一孕震应力应变场作用下的多个应力集中点产生相应活动和演化。因此同一孕震应力应变场作用下,会观测到前兆同步性异常现象^[3]。

地震老前辈认为地下流体前兆异常根据映震距离可分为源兆、场兆和远兆^[4-5]。笔者在多次地震预测预报实践中发现多次5级地震前,前兆异常主体集中在三四百公里范围内,由此笔者提出了“近兆”概念,并对“近兆”进行了定义。

笔者于2023年9月中旬周会商会对2023年12月2日云南芒市 $M_s5.0$ 地震作出了短期预测。时对2023年云南芒市 $M_s5.0$ 地震前地下流体前兆异常作系统回顾和总结有其重要的意义,增进地震预测研究工作者对云南地下流体前兆的了解,同时有助于提高本区地下流体前兆异常识别的科学性,

不断提高地震预测水平。

1 芒市构造背景和历史中强震

小滇西地区($24^{\circ} \sim 28^{\circ}\text{N}$, $98^{\circ} \sim 99.5^{\circ}\text{E}$)位于以澜沧江断裂为界的云南西部(图1),所属的腾冲—龙陵地震带是云南地区区域构造应力场分区的重要分区边界之一。小滇西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,在缅甸那加山、阿拉于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^[6]。小滇西地区邻近两大板块边界,是两大板块碰撞挤压作用的直接作用和影响地区,它的活动与两大板块的相互作用密切相关。小滇西地区主要受到北北东—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。在印度板块和亚欧板块两大板块碰撞挤压作用下,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,形成了近南北向断裂腾冲断裂和怒江断裂,以及北东向断裂大盈江断裂和龙陵—瑞丽断裂(图1)。

2023年12月2日云南芒市 $M_s5.0$ 地震发生在近龙陵—瑞丽断裂处(图1),70 km 范围内共发生 $M_s \geq 5$ 历史地震8次5组(表1),表1中黑色加粗标注的地震为双震或震群。其中5.0~5.9级6次4组,1组为震群型地震,即1966年5级震群;7.0~7.9级2次1组,为双震型地震,即1976年5月29日龙陵7.3级、7.4级双震(图1)。1966年5级震群和1976年7级双震都发生在龙陵—瑞丽断裂及邻近处,其它3次5级地震发生在大盈江断裂及邻近处。

表1 云南芒市2023年 $M_s5.0$ 地震70 km范围内
1966年以来 $M_s\geq 5.0$ 级地震统计表

Table 1 Statistics of earthquakes with $M_s\geq 5.0$ since 1966
within 70 km of the $M_s5.0$ Earthquake in Mangshi ,
Yunnan in 2023

序号	时间	纬度	经度	震级
1	1966-09-19	23°48′	97°54′	5.4
2	1966-09-21	23°48′	97°54′	5.4
3	1966-09-21	24°00′	97°48′	5.0
4	1976-05-29	24°22′	98°38′	7.3
5	1976-05-29	24°33′	98°45′	7.4
6	2000-10-06	24°23′	97°32′	5.8
7	2008-03-21	24°36′	97°40′	5.3
8	2011-03-10	24°43′	97°55′	5.8

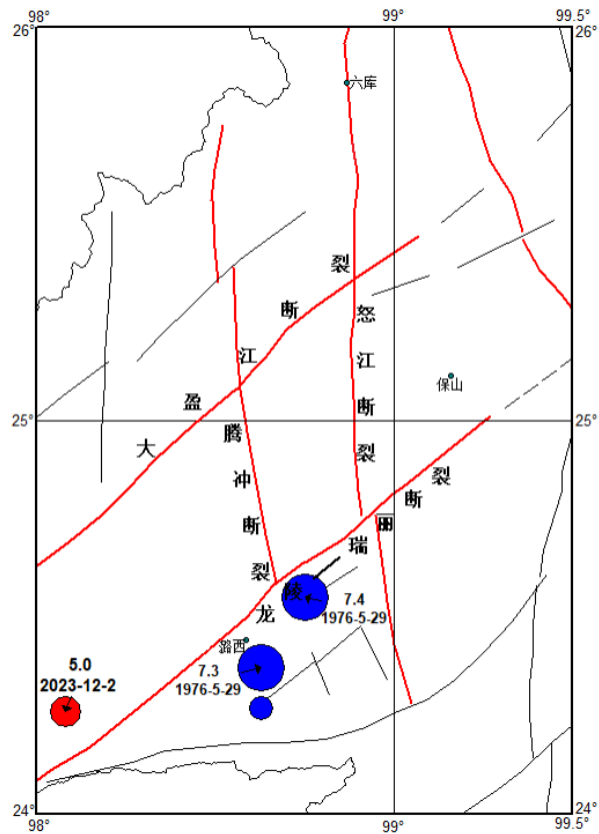


图1 2023年芒市 $M_s5.0$ 地震及1966年以来70 km内 $M_s\geq 7$ 地震分布图

Fig.1 Distribution of $M_s5.0$ earthquake in Mangshi in 2023 and earthquakes with $M_s\geq 7$ within 70 km of the Mangshi earthquake since 1966

2 地下流体源兆异常

源兆指震源过程直接产生的异常信息，它直观地反映出地震孕育与发生全过程，因此是实现地震预测预报的最重要信息。源兆的表现在空间上是围绕着未来的震中区出现的，其范围是有限的，一般认为是几十至二百公里的尺度上，在时间尺度上与地震过程有明显的同步性。震前异常由弱到强，临震前有可能表现出异常过程的转折、加速或反向，甚至会有剧变，震后异常由强到弱，直至消失。

文中源兆是震中距 $d\leq 150$ km范围内测项出现的异常。2023年芒市 $M_s5.0$ 地震前150 km范围内地下流体源兆异常测项共有7项，这7项地下流体异常测项为龙陵水氡、龙陵水温、保山氢气、保山气氡、保山气汞、腾冲气汞和施甸水汞(图2a~g)。异常最早出现的测项龙陵水氡和异常过程最晚结束的测项保山气氡都为源兆。11月份新异常施甸水汞和保山气氡均发生在源区。

本文对前兆异常的同步性定义为：不同测项30天内同时达到异常指标值^[3]。龙陵水氡和龙陵水温2023年7月13日达到同步性异常条件，保山氢气、保山气氡和保山气2023年11月9日达到同步性异常条件，龙陵和保山测点存在同测点不同测项同步性异常。腾冲气汞和保山气汞2023年6月28日达到同步性异常条件，存在不同测点同测项同步性异常。源兆同步性异常时间为两段，即2023年6月28日至7月13日和2023年11月9日。

2.1 同测点不同测项同步性异常

(1)龙陵测点同步性异常。龙陵水氡日均值 ≤ 100 Bq/L，对应100 km范围内 $M_s\geq 5.0$ (图2a)。2023年3月13日至8月29日持续低值异常。异常结束后时隔3.1个多月发生2023年12月2日 $M_s5.0$ 地震，震中距73 km(表2)。

龙陵水温日均值 ≥ 90 °C，对应100 km范围内 $M_s\geq 5.0$ (图2b)。2023年7月13日至11月4日持续高值异常。异常结束后时隔1个月发生2023年12月2日 $M_s5.0$ 地震，震中距73 km(表2)。龙陵水氡和龙陵水温2023年7月13日达到同步性异常条件。

(2)保山测点同步性异常。保山氢气日均值持续高值或低值异常，对应500 km范围内 $M_s\geq 4.9$ (图2c)。2023年9月29日至10月9日持续低值异常。异常结束后时隔1.8月发生2023年12月2日 $M_s5.0$ 地震，震中距147 km(表2)。

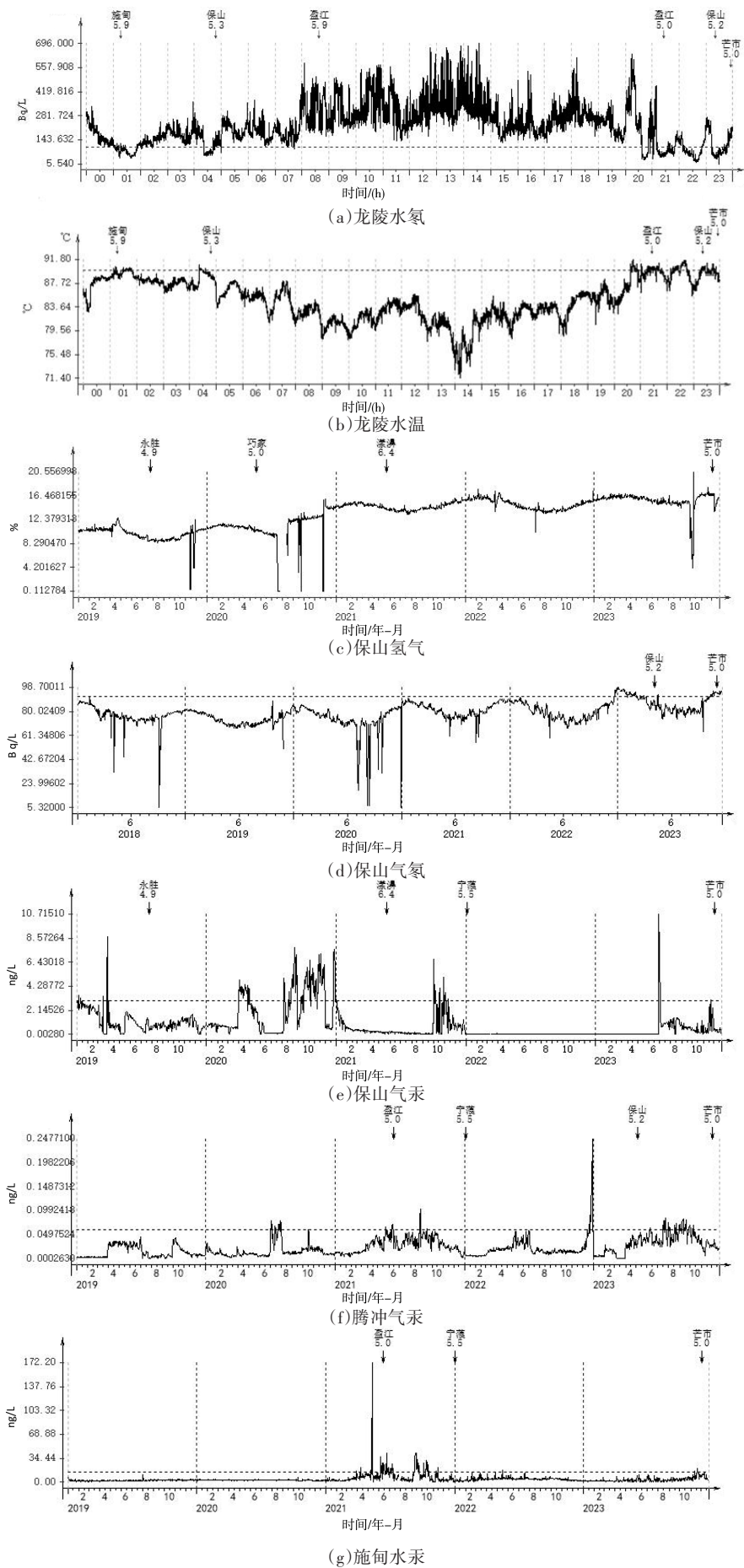


图2 地下流体源兆日均值图

Fig.2 Daily mean value of underground fluid focal precursors

保山气氡日均值 ≥ 92 Bq/L, 对应 150 km 范围内 $M_s \geq 5.0$ (图 2d)。2023 年 11 月 9 日至 12 月 18 日持续高值异常。异常出现后时隔 0.8 月发生 2023 年 12 月 2 日 $M_s 5.0$ 地震, 震中距 147 km (表 2)。

保山气汞日均值 ≥ 3 ng/L, 对应 350 km 范围内 $M_s \geq 4.9$ (图 2e)。2023 年 6 月 28 日至 11 月 21 日持续高值异常。异常结束后时隔 0.4 月发生 2023 年 12 月 2 日 $M_s 5.0$ 地震, 震中距 147 km (表 2)。保山氢气、保山气氡和保山气汞 2023 年 11 月 9 日达到同步性异常条件。

2.2 气汞测项同步性异常

腾冲气汞日均值 ≥ 0.06 ng/L, 对应 380 km 范围内 $M_s \geq 5.0$ (图 2f)。2023 年 6 月 9 日、10 日、7 月 15 日至 10 月 10 日持续高值异常。异常结束后时隔 1.8 月发生 2023 年 12 月 2 日 $M_s 5.0$ 地震, 震中距 96 km (表 2)。

保山气汞 2023 年 6 月 28 日至 11 月 21 日持续高值异常 (图 2e), 腾冲气汞 2023 年 6 月 9 日、10 日、7 月 15 日至 10 月 10 日持续高值异常 (图 2f), 2023 年 6 月 28 日保山和腾冲气汞达到同步性异常条件。

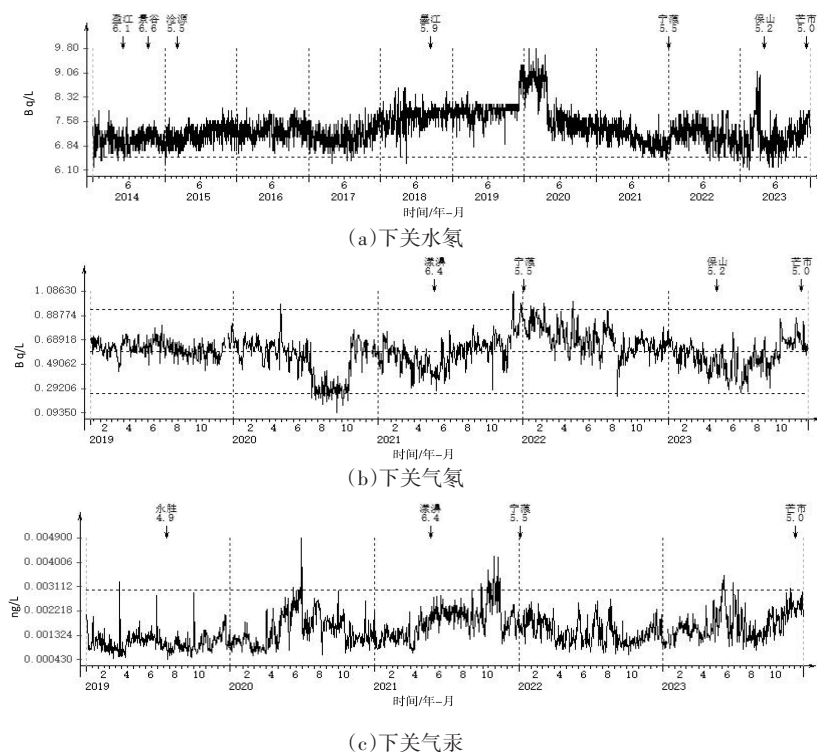
2.3 其它异常

施甸水汞日均值 ≥ 15 ng/L, 对应 370 km 范围内 $M_s \geq 5.0$ (图 2g)。2023 年 11 月 11 日、18 日、19 日和 20 日高值突跳异常。异常结束后时隔 0.4 月发生 2023 年 12 月 2 日 $M_s 5.0$ 地震, 震中距 123 km (表 2)。

3 地下流体近兆异常

近兆指离震源较近, 能客观反映出地震孕育与发生全过程, 与地震孕育过程密切关联的区域地壳活动的信息, 其特征在很大程度上能反映出地震的孕育过程, 因此是实现地震预测预报的很重要信息。近兆的表现空间上往往与区域构造或相邻活动断裂相关, 其尺度可达三四百公里。在时间尺度上与地震过程有一定的同步性。

本文中近兆是指震中距 $150 < d \leq 350$ km 范围内测项出现的异常。2023 年芒市 $M_s 5.0$ 地震前 350 km 范围内地下流体近兆异常测项共有 10 项, 这 10 项地下流体异常测项为下关水氡、下关气氡、下关气汞、下关固体二氧化碳、下关中层水温、洱源中层水温、弥渡氢气、玉龙氢气、思茅水氡和思茅气汞 (图 3a~j)。



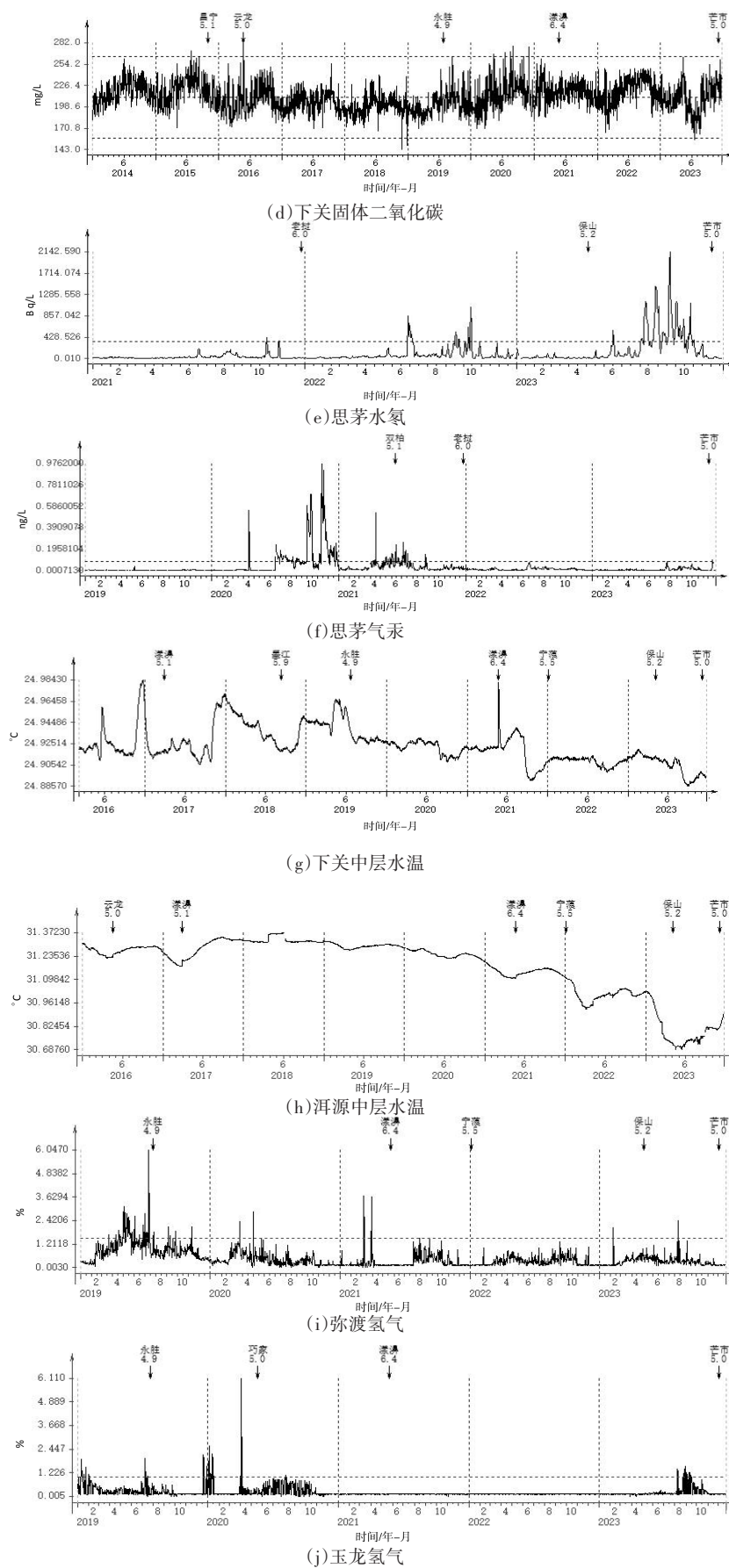


图3 地下流体近兆日均值图

Fig.3 Daily mean value of underground fluid near precursors

本文对前兆异常的同步性定义为：不同测项30天内同时达到异常指标值^[3]。下关水氡、下关气氡、下关气汞和下关固体二氧化碳2023年7月2日达到同步性异常条件，思茅水氡和思茅气汞2023年8月3日达到同步性异常条件，下关和思茅测点存在同测点不同测项同步性异常。下关中层水温 and 洱源中层水温2023年8月28日达到同步性异常条件，持续低值异常从10月开始同步缓慢回升；弥渡氢气和玉龙氢气8月8日达到同步性异常条件，下关和洱中层源水温、弥渡和玉龙氢气存在不同测点同测项同步性异常。近兆同步性异常时间为两段，即2023年7月2日至8月8日和2023年8月28日。

3.1 同测点不同测项同步性异常

(1)下关测点同步性异常。下关水氡日均值 ≤ 6.5 Bq/L，对应300 km范围内 $M_s \geq 5.0$ (图3a)。2023年5月19日、23日、24日、26日、6月6日、12日、13日、15日、29日、7月13日、19日、26日、28日、8月19日、23日、10月11日持续低值异常。异常结束后时隔1.7月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距264 km(表2)。

下关气氡日均值 ≥ 2.5 倍方差线，对应300 km范围内 $M_s \geq 4.9$ (图3b)。2023年7月2日和20日低值突跳异常。异常结束后时隔4.8月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距264 km(表2)。

下关气汞日均值 ≥ 0.003 ng/L，对应300 km范围内 $M_s \geq 4.9$ (图3c)。2023年5月30日至6月5日、6月28日和7月10日持续高值异常。异常结束后时隔4.8月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距264 km(表2)。

下关固体二氧化碳日均值 ≥ 3.0 倍方差线，对应300 km范围内 $M_s \geq 4.9$ (图3d)。2023年7月17日低值突跳异常。异常出现后时隔4.5月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距264 km(表2)。

下关水氡、气氡、气汞和固体二氧化碳2023年7月2日达到同步性异常条件。

(2)思茅测点同步性异常。思茅水氡日均值 ≥ 350 Bq/L，对应400 km范围内 $M_s \geq 5.0$ (图3e)。2023年6月15日、8月2日至10月29日持续高值异常。异常结束后时隔1.1月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距346 km(表2)。

思茅气汞日均值 ≥ 0.08 ，对应350 km范围内 $M_s \geq 5.0$ (图3f)。2023年8月3日和12月12日高值突跳异常。异常出现后时隔4月发生2023年12月2日

$M_s 5.0$ 地震，震中距346 km(表2)。思茅水氡和思茅气汞2023年8月3日达到同步性异常条件。

3.2 同测项同步性异常

(1)中层水温同步性异常。下关中层水温日均值持续高值或低值异常，对应300 km范围内 $M_s \geq 5.0$ (图3g)。2023年8月28日至11月18日持续低值异常，期间10月初开始缓慢回升。低值异常开始回升过程出现后，时隔2月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距264 km(表2)。

洱源中层水温日均值持续低值异常，对应300 km范围内 $M_s \geq 5.0$ (图3h)。2023年1月26日至11月持续低值异常，期间5月2日发生保山5级地震，其后6月底低值异常有所回升，10月开始继续缓慢回升。低值异常开始回升过程出现后，时隔2月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距279 km(表2)。

下关和洱源中层水温2023年8月28日达到同步性异常条件，持续低值异常从10月开始同步缓慢回升。

(2)氢气同步性异常。弥渡氢气日均值 ≥ 1.5 Bq/L，对应300 km范围内 $M_s \geq 4.9$ (图3i)。2023年8月8日高值异常。时隔3.8月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距265 km(表2)。

玉龙氢气日均值 $\geq 1\%$ ，对应350 km范围内 $M_s \geq 4.9$ (图3j)。2023年8月7、9日、8月23日至9月14日持续高值异常。高值异常结束后时隔2.6月发生2023年12月2日 $M_s 5.0$ 地震，震中距349 km(表2)。弥渡和玉龙氢气8月8日达到同步性异常条件。

4 地下流体场兆异常

场兆指可能与地震孕育过程有一定关联的区域地壳活动的信息，其特征在一定程度上反映出地震的孕育过程，因此对实现地震预报有一定意义。场兆的表现在空间上可以很广往往与大地构造单元有关，其尺度可达几百甚至近千公里。在时间尺度上与地震过程有一定的同步性，但并不完全吻合，异常之间也不一定同步，甚至在震前某一个时段表现强烈。

本文中场兆是指震中距 $350 < d \leq 700$ km范围内测项出现的异常。2023年芒市 $M_s 5.0$ 地震前700 km范围内地下流体场兆异常测项有1项，即弥勒气汞(图4)。

弥勒气汞日均值 ≥ 0.01 ，对应550 km范围内 M_s

≥5.0(图4)。2023年5月1日至12日、5月15日至6月5日、6月16日至22日、6月25日至29日高值突跳异常。高值异常结束后时隔5.1月发生2023年12月2日M_s5.0地震,震中距539 km(表2)。

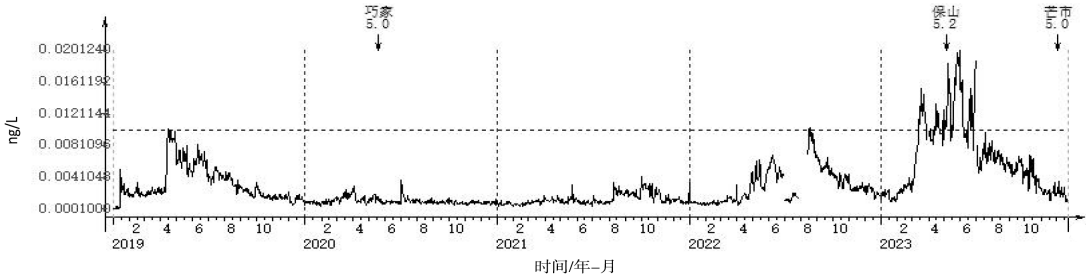


图4 弥勒气汞日均值图
Fig. 4 Daily mean value of gas mercury in Mile

5 地下流体异常映震效能总结

表2为2023年芒市M_s5.0地震前地下流体前兆异常映震效能统计表,依据地下流体异常与主震震中距远近顺序排列。研究表明,地下流体前兆异常空间上主要集中分布在距震中350 km范围内的活动构造上及邻近区域(表2和图5),以源兆和近兆为主,源兆7项,近兆10项。异常空间动态发展过程为源兆最先出现,其后源兆、近兆和场兆并存,震前1个月,异常测项向源区收缩。异常时间主要集中在7月10日至8月9日,期间达到异常指标的测项有13项(表2)。异常时间进程

表现为中期、短期与临震3个阶段。以异常过程结束后为起报时间,7项源兆中4项为短期异常,3项为临震异常;10项近兆中5项为中期异常,5项为短期异常;场兆1项,为中期异常。本文定义:中期异常映震时间3月<T≤6月,短期异常映震时间1月≤T≤3月,临震异常映震时间T<1月。临震异常为源兆,反映出地下流体前兆异常向源区收缩。异常形态与以往震例异常形态较为一致,具有明显的重复性。异常形态有持续高值异常或持续低值异常、高值突跳或低值突跳,即异常形态有持续性异常和突跳性异常两种(表2)。异常形态表现为稳态→非稳态→稳态发展的特征,反映地震孕育过程由稳态进入非稳态,随后发震的动态过程。

表2 云南芒市2023年M_s5地震前云南地下流体前兆异常统计表
Table 2 Statistics of underground fluid precurs abnormalities before the M_s5.0 earthquake in Mangshi, Yunnan in 2023

序号	观测测项	观测点经纬度	异常指标值	指标映震距离/km	映震震级/M _s	异常形态	异常起止时间/(月-日)	异常持续时间/月	映震时间/月	震中距/km
1	龙陵水氢日均值	24°39 ' 98°40 '	≤100 Bq/L	≤100	≥5.0	持续低值	03-13 ~ 08-29	5.5	3.1	73
2	龙陵水温日均值	24°39 ' 98°40 '	≥90 ℃	≤100	≥5.0	持续高值	07-13 ~ 11-04	3.7	1.0	73
3	腾冲气汞日均值	25°02 ' 98°31 '	≥0.06 ng/L	≤380	≥5.0	持续高值	06-09 ~ 10-10	4.0	1.8	96
4	施甸水汞日均值	24°46 ' 99°10 '	≥15 ng/L	≤370	≥5.0	高值突跳	11-11 ~ 11-20	0.3	0.4	123
5	保山氢气日均值	25°08 ' 99°11 '	持续高值或低值	≤500	≥4.9	持续低值	09-29 ~ 10-09	0.3	1.8	147

(转下表)

(接表2)

序号	观测 测项	观测点 经纬度	异常 指标值	指标映 震距离/ km	映震 震级/ M_s	异常 形态	异常起 止时间/(月-日)	异常持续 时间/月	映震 时间/月	震中距/ km
6	保山气氡 日均值	25°08 ' 99°10 '	≥92 Bq/L	≤150	≥5.0	持续 高值	11-09 ~ 12-18	1.3	0.8	147
7	保山气汞 日均值	25°08 ' 99°10 '	≥3 ng/L	≤350	≥4.9	持续 高值	06-28 ~ 11-21	4.8	0.4	147
8	下关水氡 日均值	25°36 ' 100°15 '	≤6.5 Bq/L	≤300	≥5.0	持续 低值	05-19 ~ 10-11	4.7	1.7	264
9	下关气氡 日均值	25°36 ' 100°15 '	≥2.5 倍方差线	≤300	≥4.9	低值 突跳	07-02、07-20	0.6	4.8	264
10	下关气汞 日均值	25°36 ' 100°15 '	≥ 0.003 ng/L	≤300	≥4.9	持续 高值	05-30 ~ 07-10	1.4	4.8	264
11	下关固体二 氧化碳日均 值	25°36 ' 100°15 '	≥3.0 倍方差线	≤300	≥4.9	低值 突跳	07-17	0.03	4.5	264
12	下关中层水 温日均值	25°36 ' 100°15 '	持续高值或低 值	≤300	≥5.0	持续 低值	08-28 ~ 11-18	2.7	2.0	264
13	弥渡氢气 日均值	25°20 ' 100°26 '	≥1.5 BqL	≤300	≥4.9	高值 突跳	08-08	0.03	3.8	265
14	洱源中层水 温日均值	26°07 ' 99°57 '	持续低值	≤300	≥5.0	持续 低值	05-03 ~ 11-30	10.1	2.0	279
15	思茅水氡 日均值	22°45 ' 101°03 '	350 Bq/L	≤400	≥5.0	持续 高值	06-15 ~ 10-29	4.5	1.1	346
16	思茅气汞日 均值	22°45 ' 101°03 '	≥0.08	≤350	≥5.0	高值 突跳	08-03 ~ 12-12	4.3	4.0	346
17	玉龙氢气 日均值	26°47 ' 100°10 '	≥1%	≤350	≥4.9	持续 高值	08-07 ~ 09-14	1.2	2.6	349
18	弥勒气汞 日均值	24°25 ' 103°24 '	≥0.01,	≤550	≥5.0	高值 突跳	05-01 ~ 06-29	1.9	5.1	539

源兆和近兆都存在同测点不同测项同步性异常和不同测点同测项同步性异常现象(表3)。源兆龙陵水氡和水温 2023 年 7 月 13 日达到同步性异常条件。保山氢气、气氡和气汞 2023 年 11 月 9 日达到同步性异常条件。保山和腾冲气汞 2023 年 6 月 28 日达到同步性异常条件。近兆下关水氡、气氡、气汞和固体二氧化碳 2023 年 7 月 2 日达到同步性异常条件。思茅水氡和气汞 2023 年 8 月 3 日达到同步性异常条件。下关和洱源中层水温 2023 年 8 月 28 日

达到同步性异常条件,持续低值异常从 10 月开始同步缓慢回升。弥渡和玉龙氢气 2023 年 8 月 8 日达到同步性异常条件。同步性异常集中出现在 3 个时段,即 2023 年 6 月 28 日至 8 月 8 日、8 月 28 日和 11 月 9 日。同步性异常时间进程同样表现为中期、短期与临震 3 个阶段。源兆同步性异常有中期异常和临震异常,近兆同步性异常有中期异常和短期异常。同步性源兆临震异常同样也反映出地下流体前兆异常向源区收缩。

表3 云南芒市2023年M_s5.0地震前云南地下流体前兆同步性异常统计表

Table 3 Statistics of synchronization anomalies of underground fluid precursors before the M_s5.0 earthquake in Mangshi, Yunnan in 2023

前兆分类	同步测项	同步时间/(月-日)	同步测项	同步时间/(月-日)
源兆	龙陵水氢	07-13	保山气汞	06-28
	龙陵水温		腾冲气汞	
	保山氢气	11-09		
	保山气氢			
	保山气汞			
近兆	下关水氢	07-02	下关中层水温	08-28
	下关气氢		洱源中层水温	
	下关气汞			
	下关固CO ₂	08-03	弥渡氢气	08-08
	思茅水氢		玉龙氢气	
	思茅气汞			

异常最早出现的测项龙陵水氢和异常过程最晚结束的测项保山气氢都为源兆。11月份新异常2项施甸水汞和保山气氢，均发生在源区。地震前1个月，源兆仍处于异常状态的测项有4项(表2黑色加粗标注)，占源兆总数的4/7=0.57；近兆仍处于异常状态的测项有3项(表2黑色加粗标注)，占近兆总数的3/10=0.3。由此进一步说明震前1个

月，地下流体前兆异常测项向源区收缩。

图5为2023年芒市M_s5.0地震前云南地下流体前兆异常测项空间分布图。地下流体前兆异常测项主体分布在活动构造上及邻近区域，因此能充分反映受区域应力场和本地构造活动作用下的地震孕育过程。

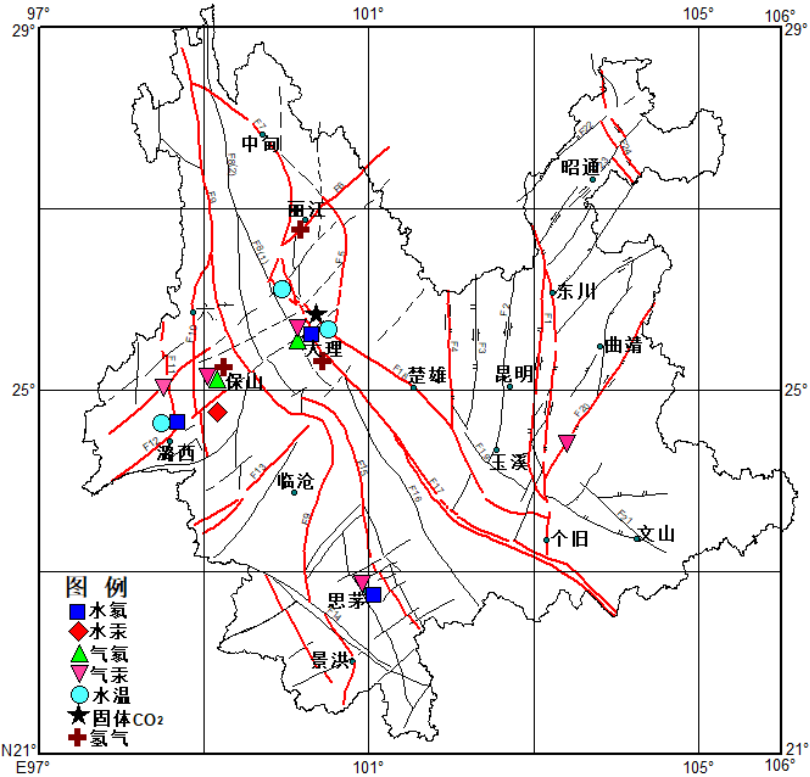


图5 2023年芒市M_s5.0地震前云南地下流体前兆异常测项分布图

Fig.5 Distribution of underground fluid precursor anomalies in Yunnan before the M_s5.0 earthquake in Mangshi in 2023

6 结论与讨论

(1) 2023年12月2日云南芒市 $M_s5.0$ 地震前, 云南地下流体存在18项异常。空间上主要集中分布在距震中350 km范围内的活动构造上及邻近区域, 以源兆和近兆为主, 源兆7项, 近兆10项。异常空间动态发展过程为源兆最先出现, 其后源兆、近兆和场兆并存, 震前1个月, 异常测项向源区收缩。

(2) 异常时间主要集中7月10日至8月9日, 期间达到异常指标的测项有13项。异常时间进程表现为中、短、临3个阶段。中期异常近兆5项和场兆1项, 短期异常源兆4项和近兆5项, 临震异常源兆3项, 反映出地下流体前兆异常向源区收缩。异常最早出现的测项和异常过程最晚结束的测项都为源兆。11月份新异常2项均发生在源区。震前1个月, 源兆仍处于异常状态的测项有4项, 占源兆总数57%; 近兆仍处于异常状态的测项有3项, 占近兆总数30%。由此进一步说明震前1个月, 地下流体前兆异常测项向源区收缩。

(3) 异常形态与以往震例异常形态较为一致, 具有明显的重复性。异常形态有持续性异常和突跳性异常两种。异常形态表现为稳态→非稳态→稳态发展的特征, 反映地震孕育过程由稳态进入非稳态, 随后发震的动态过程。

(4) 源兆和近兆都存在同测点不同测项同步性异常和不同测点同测项同步性异常现象。同步性异常集中出现在三个时段, 即2023年6月28日至8月8日、8月28日和11月9日。同步性异常时间进程同样表现为中、短、临3个阶段。源兆同步性异常有中期异常和临震异常, 近兆同步性异常有中期异常和短期异常。同步性源兆临震异常同样也反映出地下流体前兆异常向源区收缩。

(5) 依据以上研究结果, 地下流体异常测项分布范围较小, 且相对比较集中, 异常测项集中区域可作为地震潜在危险区, 再结合异常动态发展过程

异常测项向源区收缩这个现象可缩小预测区域, 依据此项研究结果可为预测地点提供一定参考依据。

研究结果表明, 5级地震前异常测项分布范围较小。依据以上结果, 异常测项分布范围较小且集中, 可预测5~6级地震; 异常分布范围较广, 异常测项多, 异常幅度大和异常持续时间长, 可预测6级以上地震。

同一测点不同测项出现同步性异常, 以及不同测点相同测项出现同步性异常, 这两种同步性异常现象同时出现可能是地震孕震过程进入短临阶段的重要标志, 可为预测地震时间提供一定参考依据。

根据以上分析认为, 依据地下流体在空间、时间、形态和同步性四个方面的活动特征, 可对预测地震三要素提供一定参考依据。

2023年12月2日云南芒市 $M_s5.0$ 地震发生在近龙陵—瑞丽断裂处, 且地下流体前兆异常测项主体分布在活动构造上及邻近区域, 因此此次地震前地下流体前兆异常较为丰富, 且能充分反映受区域应力场和本地构造活动作用下的地震孕育过程。

参考文献

- [1] 易立新, 刘香, 侯建伟, 等. 地震研究中的断层流体动力学问题[J]. 地震, 2007, 27(1): 1-8.
- [2] 孙丽娟, 冀林旺, 金镇洪, 等. 山龙峪井水位异常与地震关系初探[J]. 东北地震研究, 2004, 20(1): 42-47.
- [3] 杨芬, 金明培, 赵家本, 等. 滇西实验场水汞同步性异常与中强地震的关系[J]. 国际地震动态, 2009(5): 14-20.
- [4] 车用太, 鱼金子. 地下流体的源兆、场兆、远兆及其在地震预报中的意义[J]. 地震, 1997, 17(3): 283-289.
- [5] 高小其, 许秋龙, 王道, 等. 地下流体中强震源兆、场兆和强震远兆特征及其物理成因[J]. 地震, 2002, 22(3): 81-88.
- [6] 姜朝松, 王绍晋, 周瑞琦, 等. 腾冲火山活动构造动力学研究[J]. 地震研究, 2000, 23(2): 179-187.
- [7] 杨芬, 李孝宾, 薛艳. 滇西实验场地震中短临动态跟踪综合预测方案及其实践运用[J]. 震灾防御技术, 2014, 9(S1): 590-599.
- [8] 杨芬. 2011腾冲5.2级双震前中短临异常特征[J]. 地震研究, 2013, 36(4): 433-442.