

云南水温异常与 $M_s \geq 5.0$ 地震关系研究*

李 琼¹, 付 虹¹, 毛慧玲¹, 朱荣欢², 何德强³

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 昆明市地震局, 云南 昆明 650500;
3. 昭通市地震局, 云南 昭通 657000)

摘要: 选取 2009—2015 年云南地区观测连续、稳定的水温观测资料共 34 项, 采用异常过程和从属函数分析方法联合提取异常, 分析水温异常与 $M_s \geq 5.0$ 地震的关系。结果表明: 该方法提取的单项异常, 具有短期指示意义, 与地震有较好的对应关系, 但地震的漏报率较高; 采用异常频次和权重集成方法提取的全省群体异常与全省的 $M_s \geq 5.0$ 地震对应较好, 减少了漏报, 并可以通过置信度为 97.5% 的 R 值评分检验。按构造和地震活动进行分区后, 提取小区域的水温群体异常, 并只考虑对应本区的地震, 则各区域内出现异常的虚报和漏报率均显著增加。分析其原因, 认为水温异常和地震都是区域构造活动增强的产物, 群体异常能更好地刻画区域构造活动增强, 在构造活动增强的背景下是更有利于地震发生的, 因此区域的群体异常有更好的对应效能; 异常过程和从属函数方法提取的水温异常能较好地表达震前水温变化加剧的特征, 区域的群体异常可以作为云南地区有 $M_s \geq 5.0$ 地震的短期时间判据。

关键词: 云南水温观测; 从属函数方法; $M_s \geq 5.0$ 地震; 区域构造活动增强; 群体异常

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)02-0233-08

0 引言

地震预测目前仍处在一个经验积累的探索阶段, 大量的震例总结、震前前兆观测异常特征研究可以为认识地震孕育过程提供更多的资料。在云南中等地震前兆异常特征研究方面, 众多学者作了的工作 (付虹等, 2007, 2008; 张立, 2013; 李琼等, 2014, 2016), 得到了一些比较有意义的结果, 但这些研究大部分是基于原始数据异常识别和震例研究进行的。从属函数法主要以观测资料的斜率和相关系数作为参量, 能较好地表达地震孕育进入短临阶段的涨落变化特征 (林辉等, 2004), 因此适用于前兆观测资料的短临异常信息提取。部分地震学者 (叶秀薇, 2004; 李杰等, 2003; 高小其等, 2012; 范雪芳等, 2010) 采用该方法提取震前短临异常, 取得了较好的结果。

水温观测的是不同含水层由于裂隙发育导致串层温度混合的结果, 高精度水温观测在地震前

兆监测中发挥着重要作用 (付子忠, 1988)。大量的观测结果表明, 水温观测具有较强的映震能力 (车用太等, 1999; 陈沅俊等, 1994a, b)。众多地震学者对水温与地震的关系进行了大量研究 (车用太等, 2003; 金众范等, 2001; 李加稳, 孙文波, 2004; 田华等, 1994; 尤传侠, 1990; 刘耀炜等, 2008; 鲜述东等, 2011; 杨从杰等, 2008; 张惠等, 2013), 得出水温异常主要在地震前的短期阶段出现, 时间进程上具有显著的短临异常特征。

本文采用从属函数分析方法提取云南水温前兆异常, 以 2009—2015 年云南省内的 17 组 $M_s \geq 5.0$ 地震作为研究样本, 在不知道未来地震震中位置情况下, 从全时空的角度对水温的短期异常及效能进行探讨。

1 水温资料及地震样本选取

云南共有 52 项水温观测资料用于日常地震跟踪监视, 资料情况大致可分为 3 类: (1) 观测不

* 收稿日期: 2017-01-03.

基金项目: 云南省人民政府十项措施监测预报 (jcyb2008-0601-05) 项目和中国地震局监测预报司 2015 年地下流体指标建设项目共同资助。

稳定，正常和异常动态不清晰，没有对应地震的实例；（2）观测稳定，呈趋势性上升或下降，但映震效果不好，在地震监测预报中没有出现过异常对应地震的实例；（3）观测稳定，有异常对应地震实例，且有部分异常多次对应地震的事实。本研究选取了观测资料相对连续、稳定、有地震对应实例的 34 项水温资料，采用从属函数计算方法分别提取每项观测资料的异常，34 项水温测点分布如图 1 所示。

2008 年汶川大地震后，云南省地震局依托“十五”项目，投入了一批新的水温观测力量，这些观测资料从 2009 年开始相对稳定。考虑到资料的丰富性，选用 2009 年以来的水温资料和 2009—2015 年间发生在云南省内的 21 次 17 组（发生在同一个月内的 2 次地震视为一组） $M_s \geq 5.0$ 地震作为研究样本，地震参数和分布见表 1 和图 1。

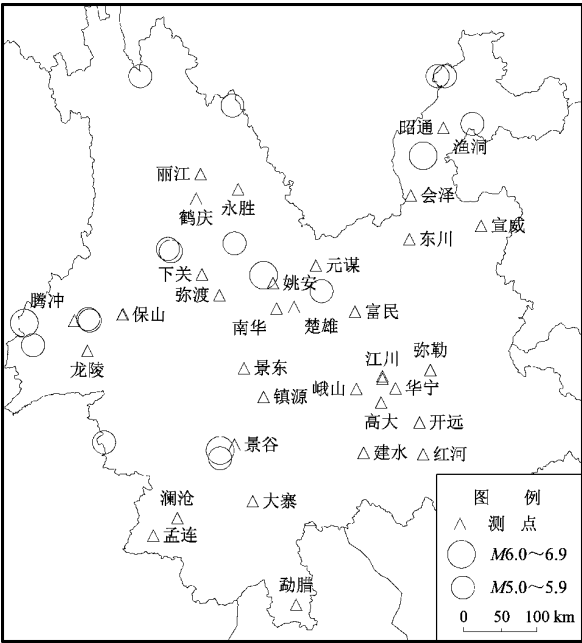


图 1 测点及震中分布图
Fig. 1 Distribution map of observation points and epicenter

表 1 地震参数表
Tab. 1 Seismic parameters

序号	发震时间/年-月-日	震级(M_s)	$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$	发震参考地点
1	2009-07-09	6.0	25.60	101.10	姚安
2	2009-11-02	5.0	26.55	103.15	宾川
3	2010-02-25	5.1	25.40	101.90	元谋
4	2011-03-10	5.8	24.72	92.92	盈江
5	2011-06-20	5.2	25.05	98.68	腾冲
6	2011-08-09	5.2	25.03	98.70	腾冲
7	2012-06-24	5.7	27.73	100.67	宁蒗-盐源
8	2012-09-07/2012-09-07	5.7/5.6	27.50/27.55	103.98/104.05	彝良
9	2013-03-03	5.5	25.93	99.78	洱源
10	2013-04-17	5.0	25.90	99.82	洱源
11	2013-08-28/2013-08-31	5.1/5.9	28.20/28.10	99.30/99.40	中甸
12	2014-04-05	5.3	28.10	103.36	永善
13	2014-05-24/2014-05-30	5.6/6.1	25.00	97.80	盈江
14	2014-08-03/2014-08-17	6.5/5.0	27.10/28.10	103.31/103.51	鲁甸/永善
15	2014-10-07	6.6	23.40	100.50	景谷
16	2014-12-06	5.8/5.9	23.30	100.50	景谷
17	2015-03-01	5.5	23.50	98.90	沧源

2 异常提取方法

前兆观测涨落变化幅度增大和出现加速，是地震孕育进入短临阶段的主要特征（林辉等，

2004），因此选取了能表征这些特征的数学方法来提取短临异常。

2.1 AP（Abnormal process）方法

“AP”值是一阶差分绝对值的滑动累加值，通过过程累加可以同时达到有效抑制较长周期、消除

长趋势变化、使异常变化更突出的效果。该方法可以直接用来提取异常,也可以用来对资料进行预处理(石绍先,曹刻,1999)。计算公式如下:

$$AP_{i+T} = \sum_i^{i+T} |x_{i+1} - x_i| \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

其中: x_i 为某一测项的观测值, T 为累加过程的时间窗长。本研究选取 10 天观测数据作为时间窗长,

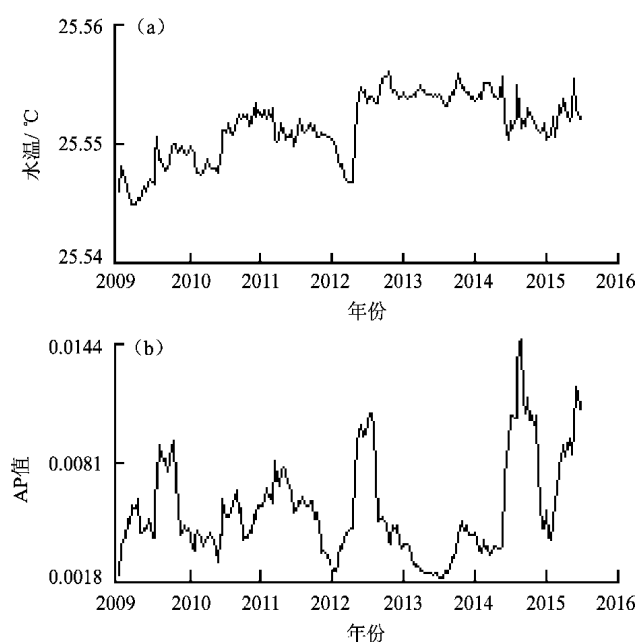


图2 保山水温观测值(a)及计算AP值(b)曲线图

Fig. 2 Graph of water temperature observed values (a) and calculated AP values (b) at Baoshan Station

意在凸显短期变化,为下一步采用从属函数法提取异常做准备。图2为保山观测值与AP计算值曲线,从图中可以看出,原始曲线呈缓升变化,异常不突出,通过计算后,一些在原始观测曲线上无法识别的加速异常被提取出来。

2.2 从属函数方法

前兆观测量是时间的函数,前兆异常表现为观测量随时间的突出变化,虽然异常形态多种多样,但其本质都是观测值曲线随时间的斜率变化。模糊数学方法中的模糊从属函数 μ_i 就是反映各种地震前兆观测曲线随时间的斜率变化的量(贺仲雄,1983)。相应的解析式为:

$$\mu_i = \left[1 + \frac{\alpha}{|k_i| |r_i|} \right]^{-1} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中: k_i 为观测值变化斜率,表征的是数据变化的幅度; r_i 为滑动平均值 $M(t)$ 与时间 t 之间的相关系数,反映了计算序列内在质量的好坏; α 为经验常数,不同观测的 α 值需要根据从属函数 μ_i 与历史震例的最佳对应关系来确定,对同一个测项来说, α 值越小,说明测值越稳定,通过计算得到的 33 个 α 值均小于 1,其中小于 0.01 的有 22 个,说明采用从属函数提取异常前先用“AP”方法进行数据预处理是比较理想的;当 $\mu_i \geq 0.5$ 时,可视为异常。即当斜率增大到一定程度,可视为观测值的涨落变化增大,发生地震的危险性增大。图3为使用从属函数方法对AP值进行计算后得到的 μ_i 值,从计算结果看,进一步计算后,短期异常更为突出、容易识别。

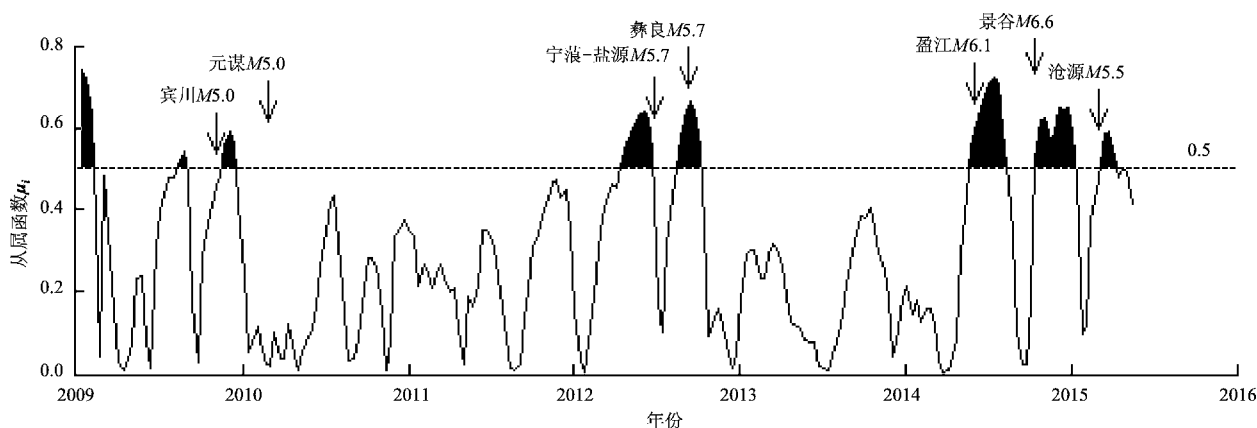


图3 从属函数计算值曲线

Fig. 3 Graph of calculated values by using the slave function

3 初步结果分析

3.1 单项异常及预测效能分析

对 34 项实测数据分别采用“AP”方法进行计算,再以计算结果为基础数据,进行从属函数计算后,将 $\mu \geq 0.5$ 的数据作为异常,对每项资料出现异常的起止时间进行标注,出现异常,规定异常结束 3 个月内云南发生地震为对应,否则视为虚报。研究时间段内,用对应地震的异常次数除以异常总次数表示对应率,虚报地震次数除以地震总次数表示漏报率,按此原则得到了每个测项与地震预测的对应效能(表 2)。

从单项指标分析,虽然地震对应率参差不齐,但 50% 以上的异常都能对应云南省内的地震,表明提取的水温短期异常有较好的对应地震的能力,

但同时地震都有漏报。

3.2 异常频次与地震关系分析

对 34 项资料的从属函数值进行 0-1 化处理, $\mu \geq 0.5$ 用“1”表示, $\mu < 0.5$ 用“0”表示,以旬为时间单位绘制频次曲线图(图 4)。规定频次 $N \geq 6$,并持续 30 d 以上视为异常,2009 年以来共出现 9 组异常。

由图 4 及表 3 可见,频次异常一般持续时间为 40~250 d,异常开始时间超前地震 20~230 d,如果每组异常过程只考虑首发地震,依据震例总结规范(张肇诚等,2013),异常超前地震 20~140 d 全部为短期异常。8 组异常对应地震,1 组虚报;异常超前地震 20~140 d,17 组地震报准 13 组,漏报 4 组。如果异常过程中发震,则后续 50~70 d 内多有中等地震继续发生;如果异常结束后才发生地震,则之后再次发生中等地震的可能性小。

表 2 单项异常地震预报效能表
Tab. 2 Seismic prediction effectiveness of single anomaly

测点	对应率 (%)	漏报率 (%)	权重	测点	对应率 (%)	漏报率 (%)	权重	测点	对应率 (%)	漏报率 (%)	权重
元谋	100	29	0.058	昭通	100	59	0.058	下关	100	65	0.058
渔洞	100	36	0.058	开远	100	65	0.058	姚安	100	65	0.058
勐腊	100	71	0.058	弥渡	100	76	0.058	龙陵	88	53	0.029
澜沧	88	59	0.029	保山	86	53	0.029	腾冲	80	47	0.019
华宁	80	71	0.029	保山市	75	40	0.019	楚雄	75	47	0.019
宣威	75	71	0.029	东川	75	82	0.029	弥勒	75	82	0.029
孟连	75	65	0.019	建水	73	53	0.015	会泽	71	65	0.019
景谷	71	35	0.019	永胜	67	71	0.019	鹤庆	67	59	0.019
南华	67	76	0.029	景东	63	65	0.015	镇沅	57	59	0.019
丽江	57	82	0.012	腾冲台	57	76	0.015	江川	57	71	0.015
普洱	57	65	0.015	峨山	50	76	0.019	富民	50	53	0.012
孟连(15)	50	76	0.015								

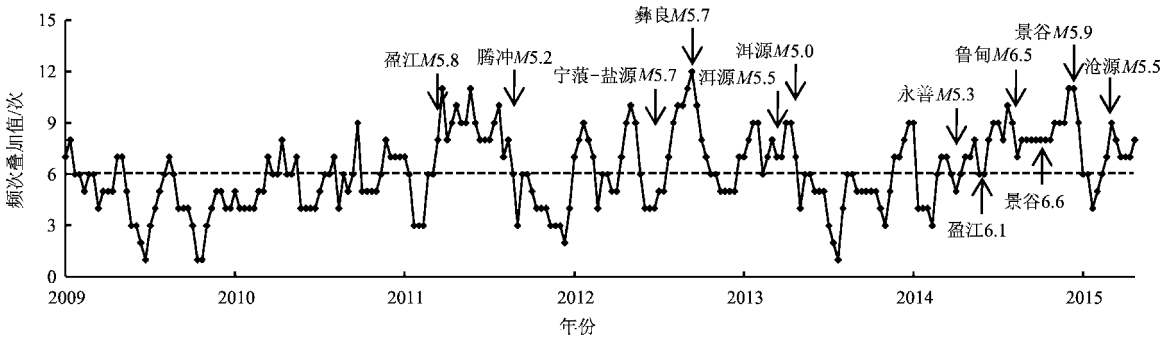


图 4 异常频次叠加值曲线图
Fig. 4 Graph of abnormal frequency overlay values

表 3 频次叠加值异常与地震对应关系表

Tab. 3 List of correspondence between frequency overlay anomalies and earthquakes

异常开始至结束时间/ (年-月-日)	异常 持续 时间/ d	异常开 始至发 震时间/ d	异常结 束至发 震时间/ d	异 常 阈 值	对 应 地 震
2010-11-30~2011-01-10	50	110	60	—	盈江 5.8
2011-03-20~08-20	160	100	-60	—	腾冲 5.2
	—	150	-10	—	腾冲 5.2
2012-01-10~02-20	50	—	—	—	—
2012-04-20~05-20	40	80	40	—	宁蒗-盐源 5.7
2012-07-30~10-20	90	50	-40	—	彝良 5.7
2012-12-30~2013-04-30	130	80	-50	6	洱源 5.5
	—	120	-10	—	洱源 5.0
2013-11-30~2014-01-10	50	140	90	—	永善 5.3
2014-04-30~12-30	250	40	-210	—	盈江 6.1
	—	110	-140	—	鲁甸 6.5
	—	170	-80	—	景谷 6.6
	—	230	-20	—	景谷 5.9
2015-02-30~?	70	20	-50	—	沧源 5.5

3.3 权重集成异常与地震关系分析

各单项前兆，其过去的预报效能是不同的，它们有优劣之分。用权重 (w) 大小对其优劣或信度加以区分，对第 i 种前兆的预报结论 y_i 配一个权重系数 w_i ，好的前兆权重大，差的权重小。用下式求取权重集成预报值 (陈立德，1993)：

$$P = \sum_{i=1}^n w_1 y_1 + w_2 y_2 + \cdots + w_n y_n \tag{3}$$

各单项前兆的权重可以用下式求得：

$$w_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\text{第 } i \text{ 种前兆虚报数} + 1}} \tag{4}$$

权重 w_i 符合条件：

$$\sum_{i=1}^n w_i = w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1 \tag{5}$$

根据各项异常与地震的对应关系，由式 (4) 计算得到各单项水温的权重 (表 2)，从属函数值 $\mu \geq 0.5$ ，则 y 为“1”， $\mu < 0.5$ 则为“0”，同样以旬为时间单位绘制权重集成信度值曲线 (图 5)。当权重集成信度值大于 0.2，并持续 20 d 以上为异常，2009 年以来共出现 9 组异常。

由图 5 及表 4 可见，9 组异常持续时间 20 ~ 200 d，异常开始时间超前地震 10 ~ 180 d，为短期异常。8 组异常对应地震发生，1 组虚报；17 组地震报准 12 组，漏报 5 组。

表 4 权重集成信度值异常与地震对应情况表

Tab. 4 List of correspondence between weight integration reliability anomalies and earthquakes

异常开始至结束时间/ (年-月-日)	异常 持续 时间/ d	异常开 始至发 震时间/ d	异常结 束至发 震时间/ d	异 常 阈 值	对 应 地 震
2009-07-10~08-10	40	120	90	—	宾川 5.0
2011-03-10~08-10	160	100	50	—	腾冲 5.2
	—	150	0	—	腾冲 5.2
2012-04-20~05-10	30	70	50	—	宁蒗-盐源 5.7
2012-07-20~09-30	80	50	-20	0.2	彝良 5.7
2012-12-20~2013-04-10	120	80	-30	—	洱源 5.5
	—	120	10	—	洱源 5.0
2013-12-10~12-30	—	—	—	—	—
2014-04-20~05-10	30	30	20	—	盈江 6.1
2014-06-10~12-20	200	60	-120	—	鲁甸 6.5
	—	120	-60	—	景谷 6.6
	—	180	-10	—	景谷 5.9
2015-02-30~03-10	20	10	0	—	沧源 5.5

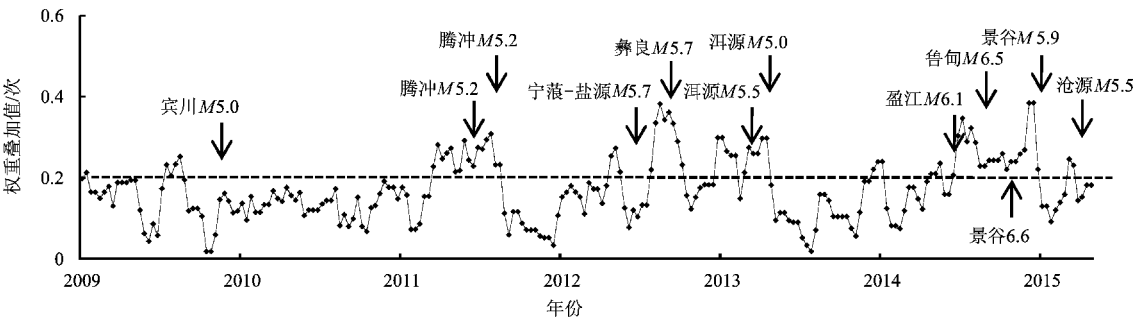


图 5 权重集成信度值曲线
Fig. 5 Graph of weight integration reliability value

3.4 R 值评分结果

采用许绍燮 (1989) 的 R 值评分法, 对频次叠加值和权重集成值出现异常预报地震的效能进行评价。计算公式如下:

$$R = \frac{\text{报准次数}}{\text{地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{研究占用时间}} \quad (6)$$

根据表 3 和表 4 结果, $R_{\text{频次}} = \frac{13}{17} - \frac{890}{2\,280} =$

$0.3744 \approx 0.374$, $R_{\text{权重}} = \frac{12}{17} - \frac{680}{2\,280} = 0.4076 \approx$

0.408 , 置信水平为 97.5% 的随机预报 R_0 值分别为 0.318 和 0.299。 $R_{\text{频次}} > 0.318$, $R_{\text{权重}} > 0.299$, 异常频度和权重集成信度值预测方法, 均能通过 R 值评分检验, 说明云南地区水温用 AP 方法提取异常过程后, 再用从属函数提取异常的研究结果对省内 5 级以上中等地震具有较好的时间预测意义。

3.5 分区异常与异常区内地震相关关系分析

为了追踪未来地震的发震地点, 采用更小区域的异常与该区地震对应, 根据地震活动特点, 将云南分为多个不同的区域, 以旬为单位给出分区的水温异常频次 (图 6), 选择发生在区内的 $M_s \geq 5.0$ 地震作为研究样本, 采用最佳对应原则, 确定各区的异常判定阈值, 其分区和地震对应情况如下:

(1) 滇东北地区: 26°N 以北, 102°E 以东的云南境内地区, 共有东川、会泽、宣威、昭通、

渔洞 5 个测点, 将至少有 2 个测项出现异常 ($N \geq 2$) 视为异常, 共出现 6 组异常, 对应地震 3 次、虚报 3 次。

(2) 滇中至滇西北地区: 红河断裂以东、小江断裂带以西的云南境内, 共有丽江、永胜、姚安、元谋、华宁、江川等 15 个测点, 异常频次 $N \geq 4$, 且持续时间在 20 d 以上视为异常, 共出现 8 组异常、2 组对应地震、6 组虚报、漏报地震 4 组。

(3) 小滇西至滇西南地区: 澜沧江以西的云南境内, 共有保山、腾冲、孟连等 8 个测点, 将异常频次 $N \geq 3$, 且持续时间在 20 d 以上视为异常, 共出现 6 组异常、2 组对应地震、4 组虚报; 区内共 5 组地震, 对应 2 组、漏报 3 组。

(4) 滇南至滇西南地区: 25°N 以南, 99.5°E 以东的云南境内, 共有华宁、峨山、镇沅、大寨等 11 个测点, 将异常频次 $N \geq 3$ 且持续时间在 20 d 以上视为异常, 共出现 6 组异常、1 组对应地震、5 组虚报; 区内共 2 组地震, 对应 1 组、漏报 1 组。

分区的结果显示, 如果把云南划分为更小的构造单元, 用更小构造单元的异常对应本单元的地震, 虚报、漏报率会大大增加, 这一结果表明: 地震不一定都发生在异常集中的地区, 异常集中的小区域也不一定发生地震, 这一观测事实表明如果跟着异常走, 地点错报的可能性会加大。分析认为当云南地区构造活动增强时, 表现为大范围多点的前兆观测出现异常, 以云南地区大区域为单元, 当异常增加的时候是有利于地震发生的。

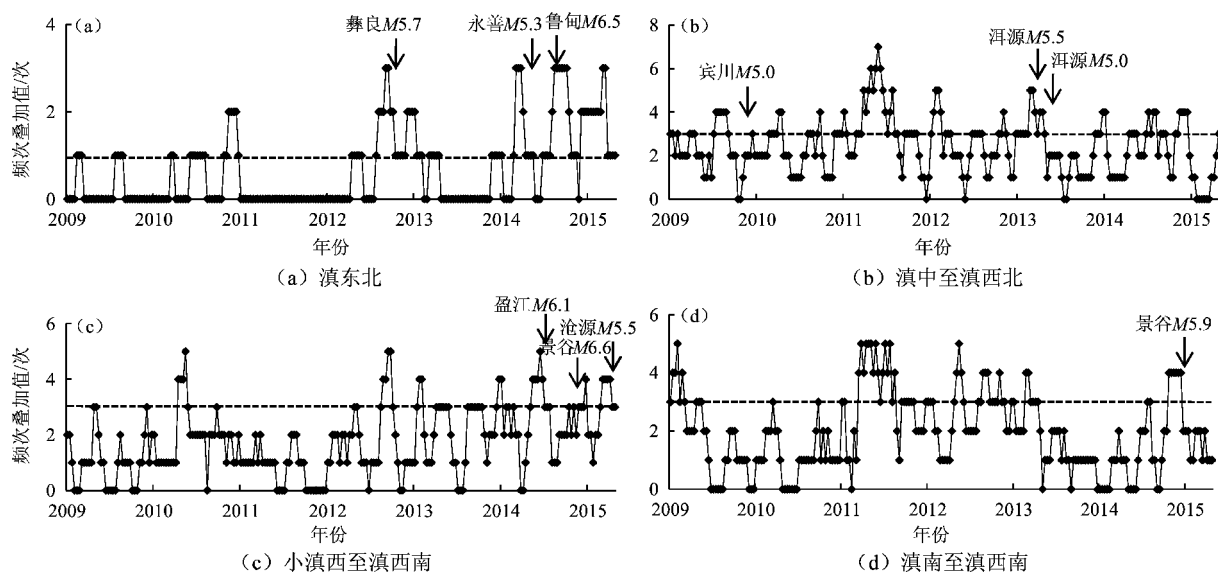


图 6 分区异常频次叠加值曲线图

Fig. 6 Graph of abnormal frequency overlay value of different regions

4 结论及讨论

利用从属函数方法提取单项水温异常, 分析地震预测效能, 对单项异常进行频次叠加, 提取综合异常, 分析与地震的关系。根据本文研究结果, 得出如下几点认识:

(1) 云南目前上报数据用于会商的水温观测资料共有 52 项, 其中挑选出 34 项相对较好的资料, 表明云南水温资料的利用率大致为 65%, 有 35% 的资料没有应用效能。34 个测项资料中, 通过采用 AP 和从属函数计算方法提取异常, 出现异常后, 14 个测项对应率在 70% ~ 89% 间, 4 个测项对应率在 60% ~ 69% 间; 8 个测项对应率在 50% ~ 59% 间; 若全省有 8 个测项同时出现异常, 其后云南省内发生 5 级以上地震的对应率为 100%, 表明水温在震前短临阶段的涨落变化是存在的, 井水温对地震在时间上有相对较好的预测效能。

(2) 全省水温的异常频次和权重集成方法对省内 $M_s \geq 5$ 地震都有较好的预测能力, 预测效能都能通过置信水平为 97.5% 的 R 值评分检验。从 2 种方法的结果看, 权重集成比直接用频次预测, 漏报多 1 次。说明在云南的水温观测中, 出现异常的数量更为重要, 异常数量足矣刻画云南的构造活动特征, 并可用该特征进行发震时间预测。

(3) 如果把水温测点按照构造和地震活动进行分区, 用区内的异常对应区内的地震, 虚报率和漏报率都大大增加, 说明在云南地区, 采用水温异常找未来的地震地点是困难的, 水温的异常变化更适合作短期尺度的时间预测。

(4) 震前大范围水温异常增多的事实, 与前兆观测到的大量异常是区域构造活动增强的结果, 异常与地震都是区域应力水平增加的认识是一致的(陈立德, 付虹, 2003), 当区域构造活动增强时, 我们能观测到整个区域的异常增多, 这个结果为地震短期预测提供了可能。从 2009 年以来的水温群体异常特征还发现, 如果地震发生在异常结束以后, 其后继续发生中地震的可能性小, 反之则有继续发生地震的危险。表明前兆异常数量居高不下, 可能反映的是区域应力水平继续维持高值, 在这种状态下有利于地震的发生, 这与数值模拟得到的结果也是一致的(耿鲁明等, 1993), 表明异常的持续发展可以作为判断后续是否有地震的指标。

(5) 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。水温测值异常可被视为当构造活动增强时, 观测站及附近地壳中含流体的介质受力后其裂隙、孔隙、裂缝等发生变化, 引起流体移动速度及物质交换发生变化的结果(陈立德等, 2008)。

(6) 当区域构造活动增强, 应力水平发生变化时, 水温短期群体异常增多, 与地震有较好的相关性, 因此可以作为云南有震的时间判别指标, 但地点需要用其他方法进行确定, 如云南 4 级地震活动增强的区域多为未来 6 级地震发生的地区(付虹等, 2015)。如果每个观测手段均发挥自己的优势, 统筹考虑其作用, 可能对提高地震短期预测水平更行之有效。

参考文献:

- 车用太, 黄辅琼, 王吉易, 等. 1999. 张北地震地下流体异常变化 [M]//中国地震局监测预报司. 一九九八年张北地震. 北京: 地震出版社, 111-114.
- 车用太, 刘喜兰, 姚宝树, 等. 2003. 首都圈地区井水温度的动态类型及其成因分析[J]. 地震地质, 25(3): 403-420.
- 陈立德, 付虹, 邹成栋. 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.
- 陈立德, 付虹. 2003. 地震预报基础与实践[M]. 北京: 地震出版社, 182.
- 陈立德. 1993. 地震综合预报的权重集成法[J]. 地震研究, 16(3): 267-271.
- 陈沅俊, 杨修信, 刘永铭, 等. 1994b. 首都圈精密地温动态观测研究 [M]//国家地震局科技监测司. 首都圈地震短临预报新方法观测与研究. 北京: 地震出版社, 134-140.
- 陈沅俊, 杨修信, 赵京海. 1994a. 一个地震前兆敏感点[M]//国家地震局科技监测司. 首都圈地震短临预报新方法观测与研究. 北京: 地震出版社, 153-155.
- 范雪芳, 刘耀辉, 吴桂娥, 等. 2010. 华北地区水位与水气中期、中短期前兆异常特征研究[J]. 地震研究, 33(12): 147-158.
- 付虹, 钱晓东, 毛玉平, 等. 2015. 2014 年云南鲁甸 $M_s 6.5$ 地震异常及预测[J]. 地震研究, 38(2): 181-188.
- 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.
- 付子忠. 1988. 地热动态观测与地热前兆[J]. 地壳构造与地壳应力, 1(1): 1-7.
- 高小其, 王琼, 朱成英, 等. 2012. 7 级地震前地下流体前兆异常特征及判定指标的研究[J]. 内陆地震, 26(2): 123-137.
- 耿鲁明, 石耀霖, 张国民. 1993. 地震孕育发生的场源关系初步研究 [J]. 中国地震, 9(4): 310-319.
- 贺仲雄. 1983. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社.
- 金众范, 王勇, 盛国松, 等. 2001. 辽宁省地热观测现状及映震分析

- [J]. 东北地震研究, 17(3): 25–32.
- 李加稳, 孙文波. 2004. 邦腊掌温泉水水温地震异常特征研究[J]. 防灾技术高等专科学校学报, 6(2): 25–29.
- 李杰, 韩海华, 马玉香, 等. 2003. 数字化形变观测资料异常识别方法的应用及评价[J]. 东北地震研究, 19(1): 25–33.
- 李琼, 付虹, 钱晓东. 2016. 云南盈江 $M_s \geq 6.1$ 地震前兆异常特征分析[J]. 地震研究, 35(2): 155–160.
- 李琼, 付虹, 朱荣欢, 等. 2014. 滇东北 $M_s \geq 5.0$ 地震前地下流体异常特征与鲁甸 6.5 级地震研究[J]. 地震研究, 37(4): 495–502.
- 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.
- 刘耀炜, 孙小龙, 王世芹, 等. 2008. 井孔水温异常与 2007 年宁洱 6.4 级地震关系分析[J]. 地震研究, 31(4): 347–353.
- 石绍先, 曹刻. 1999. 前兆群体非均匀度异常与地震短期预报[J]. 地震, 19(1): 59–64.
- 田华, 仲阳, 张之立. 1994. 白家瞳地温异常变化与地震的对应关系[J]. 地震地磁观测与研究, 15(3): 9–14.
- 鲜述东, 刘子哲, 董艳涛, 等. 2011. 高七井水温映震规律浅析[J]. 内陆地震, 25(4): 349–353.
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力的评分[C]//国家地震局监测司. 地震预报方法实用化研究文集. 北京: 学术书刊出版社, 586–590.
- 杨从杰, 郑江蓉, 肖飞, 等. 2008. 金湖 06 井水温震前变化特征研究[J]. 地震地磁观测与研究, 29(5): 26–31.
- 叶秀薇. 2004. 地下流体从属函数异常与地震关系的初步研究[J]. 防灾减灾工程学报, 24(2): 195–201.
- 尤传侠. 1990. 澜沧—耿马地震前后的地温异常变化[J]. 地震研究, 3(2): 196–202.
- 张慧, 顾申宜, 李志雄, 等. 2013. 单井多层位水温微动态初步研究[J]. 地震, 33(1): 101–110.
- 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.
- 张肇诚, 陈棋福, 郑大林. 2013. 震例总结研究探讨[M]. 北京: 地震出版社, 35–36.

Study on the Relationship Between Abnormal Water Temperature and Earthquakes in Yunnan Area

LI Qiong¹, FU Hong¹, MAO Huiling¹, ZHU Ronghuan², HE Deqiang³

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

(2. Earthquake Administration of Kunming Municipality, Kunming 650500, Yunnan, China)

(3. Earthquake Administration of Zhaotong Municipality, Zhaotong 657000, Yunnan, China)

Abstract

This paper selects the observations data of a total of 34 continuous and stable water temperature, using the anomalous process and subordinate function analysis method to extract abnormal jointly and analyze the relationship between water temperature and the $M_s \geq 5.0$ earthquakes. The results show that the single anomaly extracted by this method has short-term implications and good relationship with earthquake, but increased the omission rate of earthquake; The groups anomalies in Yunnan Province extracted by anomaly frequency and weight integration method have obvious correspondence with $M_s \geq 5.0$ earthquakes, which reduce the omission, and can pass the R -value inspection of a confidence level of 97.5%; After Yunnan region has been divided into different areas by tectonic and seismic activity, we extracted small area groups anomalies. Only considering earthquake at the same area, then the omission and false rate of earthquake significantly increased in each area; Analyzes its reason, we found that the water temperature anomaly and earthquake are the products of increasing regional tectonic activities, and the water temperature shows a better characteristics of increasing regional tectonic activities, and the earthquake will occur easily based on increasing regional tectonic activities, therefore regional groups anomalies have more correspondent potency; The temperature abnormality extracted by using the anomalous process and subordinate function analysis method shows the characteristic of accelerated water temperature before earthquake, and regional groups anomalies can be used as short-term time indicators of the earthquakes ($M_s \geq 5.0$) in Yunnan region.

Keywords: water temperature observation in Yunnan; subordinate function analysis method; $M_s \geq 5.0$ earthquakes; increasing of regional tectonic activities; groups anomalies