

doi:10.3799/dqkx.2014.172

云南地区水温异常与地震关系

张彬^{1,2}, 方震^{3*}, 刘耀炜², 杨选辉², 赵刚², 荆燕²

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2. 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京 100085

3. 安徽省地震局, 安徽合肥 230031

摘要: 云南地区地震频发, 水温观测点分布也最集中, 为研究水温异常与地震的关系提供了便利条件. 通过收集已经公开发表关于该区域“十五”之前的水温异常与地震的对应关系的文章, 较系统地研究了水温异常持续时间、异常空间位置与地震之间的关系. 结果表明: 水温异常主要是地震短临异常, 强震前也存在水温中期趋势异常; 一般情况下, 地震震级越大, 异常范围越广, 发震地点通常出现在水温异常集中的区域.

关键词: 水温异常; 地震预测; 震级; 正常动态特征; 天然地震.

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2014)12-1880-07

收稿日期: 2014-02-05

Relationship between Water Temperature Anomaly and Earthquake in Yunnan

Zhang Bin^{1,2}, Fang Zhen^{3*}, Liu Yaowei², Yang Xuanhui², Zhao Gang², Jing Yan²

1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2. Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

3. Anhui Earthquake Administration, Hefei 230031, China

Abstract: In Yunnan, earthquakes happened frequently, as well as groundwater temperature observation points are mostly centralized for its distribution. It is comprehensively collected for seismic cases on water temperature anomaly before the reform, the relationships of seism with water temperature anomaly duration and abnormal space is researched systematically. The result shows that water temperature anomaly is mainly impending-earthquake anomalies, however it has mid-term tendency anomalies before strong earthquakes. Generally, the greater earthquake magnitude, the vaster anomaly range, earthquakes were occurred during anomaly concentration area. The studying achievement has great significance for earthquake prediction and station setting.

Key words: water temperature anomaly; earthquake prediction; magnitude; normal dynamic characteristic; earthquake.

前兆异常是地震在孕育、发展、发生过程中产生的物理、化学变化, 地震预测主要根据前兆异常的变化对未来地震发展趋势进行综合判定(陆明勇等, 2009). 水温变化是其中一项重要指标, 微小的水温变化有可能反映地震孕育过程或其他地壳构造活动引起热状态的变化, 水温的微变化能间接地反映地震孕育过程, 使其成为一种预报地震的重要检测项目(田华等, 1994), 所以水温临震异常监测是预测地震发生时间的有效手段(刘耀炜, 2006). 水温作为独

立的地震前兆观测项, 旨在捕捉地震孕育、发展和发生过程中的“信号”. 许多学者开展了地震引起的地下水温度变化及构造活动的关系研究, Mogi *et al.* (1989) 描述了在日本 Izu Peninsula 东北部一口温泉的温度变化, 认为地震波的能量疏通了井孔, 使得地下热水涌入导致水温突然升高. 在过去的 30 a 中, 对于大洋中脊的研究证实了地震也能引起温度的变化(Sohn *et al.*, 1998; Baker *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2000; Dziak *et al.*, 2003). 从 20 世纪 80 年代

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(No. ZDJ2012-08); 国家自然科学基金(No. 41404036).

作者简介: 张彬(1981-), 男, 助理研究员, 主要从事地震监测预测方面研究. E-mail: zhangbin150006@163.com

* **通讯作者:** 方震, E-mail: fzhent15@126.com

中期开始,我国开始建立用于地震监测预报的水温观测网,至今已有数百口水温观测井,并获得了大量震例数据和有关其前兆异常机理研究方面的进展(曹新来等,1995;车用太等,1996,2008;陈沉俊和姚宝树,1999;孙小龙和孙耀炜,2006).云南省是中强地震多发地区,水温观测点密度大,本研究主要是总结从地震水温观测开始至 2007 年期间(“十五”之前)已经公开发表文章中地震前水温异常情况,分析水温异常特征与地震三要素之间的关系,为今后云南地区乃至全国利用水温异常进行地震预测提供借鉴资料,也可以为水温台点的布设提供重要参考.

1 地震水温观测台网情况

1979 年我国开始研究高精度温度测量技术,进行地震地热前兆的研究工作,地震热异常前兆研究的主要思路是通过地下中、浅层地温和深井、温泉水温变化的观测与分析,探讨在构造应力作用下热物质运移、介质能力转化和水动力条件改变引起的地壳介质温度变化过程(刘耀炜,2006).1984 年在云南开展地下水温度观测研究,1988 年 11 月 6 日首次用仪器观测到云南澜沧—耿马 $M_s 7.6$ 、 $M_s 7.2$ 地震的水温同震变化现象(刘耀炜等,2006).此后,云南地区陆续建立了一批数字化井下温度监测台站

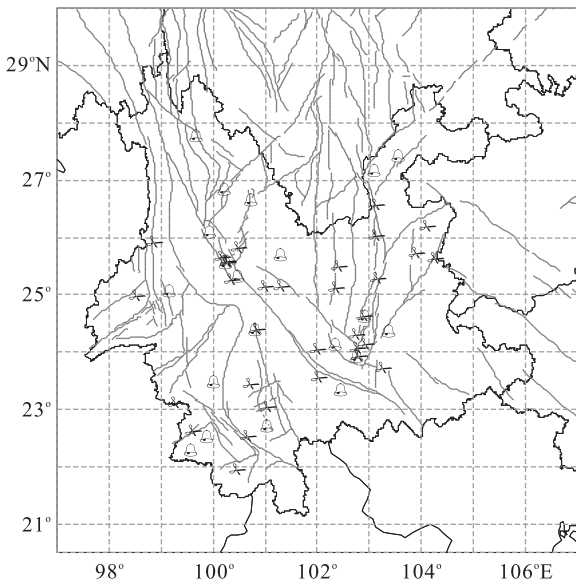


图 1 云南地区水温前兆观测点分布

Fig.1 Distribution of observation points of water temperature in Yunnan

图中圆点和三角形都为云南地区水温观测点,三角形为本文统计中地震前出现异常的水温点

(开始为模拟观测,后改造为数字化),观测仪器分辨率达到 $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$,采样率为 1 次/分钟(张彬等,2013).据不完全统计,云南地区水温观测点达近 50 个,空间分布见图 1,是全国水温观测点密度最大的地区.

2 水温观测资料的正常动态与前兆异常形态

识别异常首先需要了解数据的正常动态,只有这样才能真正发现偏离正常范围的与地震有关的可能异常,而异常形态也是多样的,不同地震前出现的异常也不尽相同,需要在大量长期观测的基础上进行有效总结,以便在地震发生前探寻有效前兆异常.

2.1 水温观测资料的正常动态

当观测井孔所处的地质构造背景、介质环境和地下水状态等因素稳定时,井孔及周围的水温会达到一种相对稳定的平衡状态(徐桂明等,2002).井孔及周围环境条件不同时,井孔水温所表现出的动态特征也不相同,虽然其表现形态多样,但还是有一定的规律可循.对观测资料的分析发现,水温观测资料存在不同的正常动态变化(赵刚等,2009;杨竹转等,2010).根据形态主要有平稳型、短周期型、日周期型、跳跃型、长周期型和趋势型 6 种.

(1)平稳型.平稳型指井孔观测点的温度随时间变化较小,基本成线性上升或下降,日均值平稳,日波动振幅不超过 $0.005 \text{ } ^\circ\text{C}$,无明显的周期规律(图 2a).

(2)短周期型.短周期型指井孔观测点处的温度存在周期为数分钟至数百分钟,温度日变化幅度较大,一般在 $0.005 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 0.010 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间,1~10 h 的短周期波动较多,无明显的逐月周期成分,但日均值仍比较稳定(图 2b).

(3)日周期型.日周期型指井孔观测点处的温度变化有 24 h 的日周期,这类动态的成因主要是一些自流井、温泉等在较浅部位观测,会出现大幅度的周期变化,某些一二百米深的井孔中也有微弱的日周期波动现象,观测井(泉)每天抽水、放水,观测井装有定时抽水观测的仪器也会引起日周期变化(图 2c).

(4)跳跃型.跳跃型指井孔观测点处的温度每年出现几次温度突升、突降的动态类型.井孔温度波动变化幅度较大,一般在 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右,基值不稳定,会出现大幅度突跳,可能是升温突跳,也可能是降温突跳,这种跳动有时在几分钟至几小时完成,有时甚至会持续几天,其主要原因可能是地下水活跃,补给渠

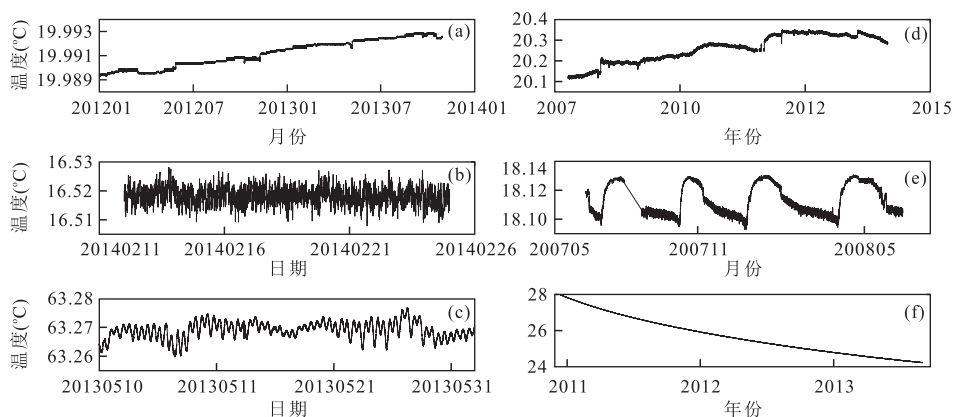


图 2 水温观测资料正常动态特征

Fig.2 The characteristics of water temperature normal dynamic

a.浙江宁波井;b.安徽霍山井;c.安徽庐江井;d.安徽巢湖井;e.四川北川井;f.天津王 3 井

道较多等(图 2d)。

(5)长周期型.长周期型指井孔观测点处的温度呈周期型变化,周期长于 24 h,且形态相对稳定(图 2e)。

(6)趋势型.趋势型指井孔观测点处的温度随时间变化较大,是以稳定的速率上升或下降,且年变幅度超过 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的动态类型(图 2f)。

2.2 水温观测资料的前兆异常形态

地震预报中,通常将 1 个月左右的异常称为短临异常,3 个月左右的异常为短期异常,1 年以上的异常为中期趋势异常(刘耀炜等,2008)。水温前兆异常的形态是各种各样的,不仅不同的观测井互不相同,同一观测井在不同地震前的异常形态也是不相同的,这些异常形态大致可划分为 3 种类型。

(1)降温型.在震前水温测值突降,其突降幅度超过正常日变幅度的 3 倍以上,震后测值很可能不恢复到异常前的基值.以宁洱 $M_s 6.4$ 地震为例,弥渡观测站距震中约 270 km,地处红河断裂带弥渡盆地的东北角,为温泉自流井,热水来自地下较深的基岩裂隙,由于上部覆盖层为隔水性能较好的亚粘土层,所以大气降水对水温观测没有影响.该站水温自 4 月 15 日开始缓慢上升,5 月 24 日上升至最高点,上升幅度为 $0.031\text{ }^{\circ}\text{C}$,之后快速下降转平(图 3a)。

(2)升温型.水温测值在正常变化的背景上,持续升温(几天到 1 个月),升温的幅度超过日变幅度的几倍到十几倍,震后测值同样很难恢复到异常前温度值.峨山观测站距震中约 180 km,位于曲江断裂上,为非自流井,含水层为基岩裂隙水,岩性为长石石英砂岩,受外界干扰少.该井水温自 5 月 1 日开始上升,至 5 月 9 日达到最高,之后持续高值至宁洱震前,异常过程温度上升幅度为 $0.008\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 3b)。

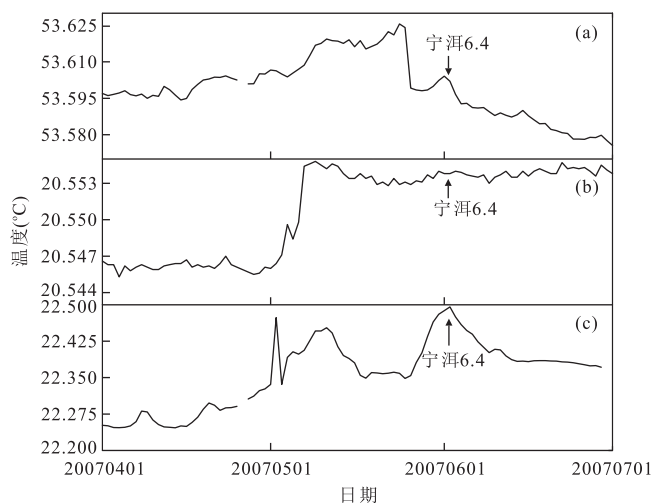


图 3 水温观测资料前兆异常特征

Fig.3 The characteristics of water temperature anomaly dynamic

(3)畸变型.在水温观测值的正常背景上,出现单一方向的突升或突降,并在数小时或数天内基本恢复到原测值,其异常幅度超过平均日变幅度的几倍到十几倍.大姚观测站距震中约 300 km,地处扬子准地台滇中拗陷的中部,属大姚复向斜主要分布区,为非自流井,基岩岩性为侏罗纪和白垩纪粉砂岩.该井自 4 月 14 日水温开始缓慢上升,5 月 11 日后开始出现回落,但在震前一周(5 月 25 日)又开始上升,一直持续到震前 2 天出现下降转折,从出现异常变化到宁洱地震发生,整个过程水温上升总幅度为 $0.248\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 3c)。

3 水温异常与地震的关系

地壳流体是反映地壳应力与变形关系最敏感的

表 1 云南地区水温前兆异常与地震关系统计

Table 1 Water temperature anomalies and earthquakes in Yunnan

台站名称	异常信息				地震信息			
	异常开始时间	最大异常量 ($^{\circ}\text{C}$)	异常开始距 发震时间(d)	异常类型	发震时间	震级 M	地点	震中距 (km)
保山	1996-01-16	0.009 6	18	升温型	1996-02-03	7.0	丽江	259
保山	2001-05-10	0.030 8	170	畸变型	2001-10-27	6.0	永胜	187
保山	2004-09-30	0.024 0	19	畸变型	2004-10-19	5.0	保山	17
大姚	1986-06-06	0.124 6	67	升温型	1986-08-12	5.2	盐源	185
	1987-04-21	0.049 1	27	升温型	1987-05-18	5.3	鹤庆	120
	1988-06-27	0.193 4	132	降温型	1988-11-06	7.6	澜沧—耿马	385
	1995-02-12	0.150 1	254	升温型	1995-10-24	6.5	武定	87
	1998-03-01	0.234 0	263	降温型	1998-11-19	6.2	宁蒗	179
	1999-09-25	0.047 6	112	升温型	2000-01-15	6.5	姚安	37
	2001-01-15	0.047 6	176	升温型	2001-07-10	5.3	楚雄	94
	2001-01-15	0.047 6	285	降温型	2001-10-27	6.0	永胜	91
	2002-10-11	0.100 0	283	升温型	2003-07-21	6.2	大姚	33
	2002-10-11	0.100 0	370	升温型	2003-10-16	6.1	大姚	29
	2004-03-15	*	148	降温型	2004-08-10	5.6	昭通	278
	2004-03-15	0.135 7	286	升温—降温型	2004-12-26	5.0	楚雄—双柏	117
	2007-03-16	0.248 7	79	畸变型	2007-06-03	6.4	宁洱	306
迪庆	1996-01-19	0.000 8	15	降温—升温型	1996-02-03	7.0	丽江	167
峨山	1999-05-09	0.023 2	200	升温—降温型	1999-11-25	5.2	澄江	56
峨山	1999-05-09	0.021 3	251	升温—降温型	2000-01-15	6.5	姚安	198
峨山	2001-06-11	0.002 3	34	降温型	2001-07-15	5.1	江川	25
峨山	2007-01-08	0.004 5	146	升温型	2007-06-03	6.4	宁洱	184
洱源	1996-02-02	0.008 1	1	降温—升温型	1996-02-03	7.0	丽江	125
建水	2001-03-12	0.006 1	125	畸变型	2001-07-15	5.1	江川	104
建水	2007-03-14	0.003 9	81	降温—升温型	2007-06-03	6.4	宁洱	147
景东	2007-04-29	0.004 4	35	升温型	2007-06-03	6.4	宁洱	161
澜沧	1995-03-21	0.632 6	103	畸变型	1995-07-02	7.3	孟连西	88
丽江	2007-04-23	0.028 4	41	升温—降温型	2007-06-03	6.4	宁洱	439
临沧	2007-02-18	0.001 3	105	畸变型	2007-06-03	6.4	宁洱	143
孟连	2007-05-21	13.900 0	13	畸变型	2007-06-03	6.4	宁洱	173
弥渡	1988-01-06	0.001 3	4	降温—升温型	1988-01-10	5.5	宁蒗	195
弥渡	1988-10-18	0.053 4	19	降温型	1988-11-06	7.6	澜沧—耿马	321
弥渡	2001-07-01	0.001 8	118	降温型	2001-10-27	6.0	永胜	95
弥渡	2007-04-15	0.031 3	49	降温型	2007-06-03	6.4	宁洱	269
弥勒	2005-01-10	0.096 1	215	降温—升温型	2005-08-13	5.3	文山	124
曲江	2007-05-09	0.797 0	25	升温型	2007-06-03	6.4	宁洱	204
思茅	2004-12-10	0.021 4	47	升温型	2005-01-26	5.0	思茅	26
思茅	2005-01-23	0.019 2	202	降温—升温型	2005-08-13	5.3	文山	323
下关	2004-05-19	0.026 0	221	降温—升温型	2004-12-26	5.0	楚雄—双柏	161
易门	1999-04-21	0.026 5	269	降温型	2000-01-15	6.5	姚安	139
永胜	1999-06-08	0.009 4	221	降温型	2000-01-15	6.5	姚安	135
鱼洞	2003-10-25	0.001 6	21	升温型	2003-11-15	5.1	鲁甸	42
鱼洞	2003-10-25	0.001 6	32	降温型	2003-11-26	5.0	鲁甸	42
昭通	1996-01-11	0.001 8	23	降温型	1996-02-03	7.0	丽江	280
	1998-04-16	0.008 1	217	降温型	1998-11-19	6.2	宁蒗	221
	2000-05-31	0.002 6	82	升温型	2000-08-21	5.1	武定	183
	2001-08-19	0.000 5	69	降温型	2001-10-27	6.0	永胜	277
	2003-10-25	0.002 5	21	升温型	2003-11-15	5.1	鲁甸	45
	2003-10-25	0.002 5	32	升温型	2003-11-26	5.0	鲁甸	46
	2004-07-01	0.004 7	40	升温型	2004-08-10	5.6	鲁甸—昭通	46

介质,并孔水温的异常变化,充分体现了地下流体场在强震孕育过程中对地壳应力应变场响应的过程.在时间尺度上,水温异常的加速变化更接近强震发生的时间;在空间分布上,表现出中期异常具有从震中向外围扩散的特点,短临异常具有沿构造带向震

中迁移的演化过程(表 1)(刘耀炜,2006).

影响水温资料变化的非地震因素较多,如洗井、仪器故障和更换、地下水开采、突降大雨等.如何确定一个异常是否与该地震有关系是非常困难的,需首先确定异常是否是这些非地震因素有关.本文

主要收集了云南地区已经公开发表文章中的水温异常,这些异常是经过调查核实过的,相对而言可信度较高.据不完全统计,本文共收集到 20 个水温测点中的 49 份水温异常,从异常点空间分布图看(图 1),异常点和台站分布点基本一致,这说明作为多震的地区,水温测点的分布不仅需要达到一定密度,也需要达到一定的广度.

3.1 异常范围与震级之间的关系

根据异常出现的范围尺度可判断震级的大小,震例分析发现,震级越大,异常出现范围越大(图 4).为了更好地总结地震强度与异常范围的关系,本文把相同震级的异常距离进行了平均,并在此基础上拟合,如果使用直线拟合,其误差相对较大;选用多项式拟合,多项式次数选择最为关键,从图 4 可以看出多项式次数为 3 和多项式次数为 6 的曲线基本一致,说明多项式次数为 3 与大于其次数的多项式拟合基本一致,故选择次数为 3 进行拟合,其拟合方程为:

$$L = 0.0085M^3 - 0.1581M^2 + 0.9822M - 2.0081$$

式中: L 为距离, M 为震级.

根据本文收集到的震例总结出云南地区异常出现范围是: $M5.0$ 地震为 $0 \sim 50$ km; $M6$ 地震为 $100 \sim 150$ km; $M7.0$ 地震为 $150 \sim 200$ km; $M7.5$ 地震为 $300 \sim 350$ km.如果台点选址合理,有的地震就发生在水温前兆异常周围,则异常更为明显,如 2004 年 10 月 19 日保山 $M5.0$ 地震就发生在距保山水温测点 17 km 处,而有的异常可能更远,如 2007 年 6 月 3 日宁洱地震前 439 km 处丽江水温出现异常(刘耀炜等,2008).

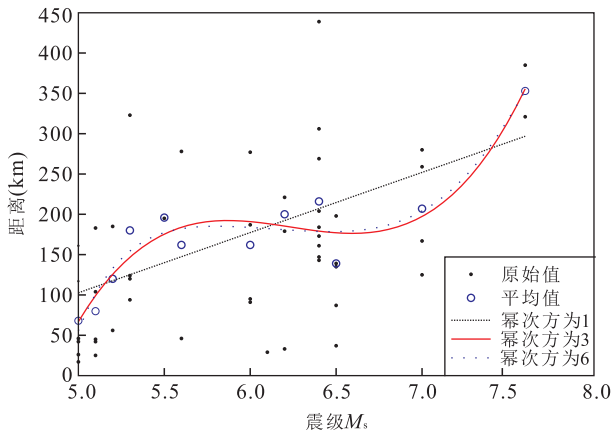


图 4 地震震级与异常水温测点距离关系

Fig.4 The relationship between magnitude and distance of earthquake and the abnormal temperature station

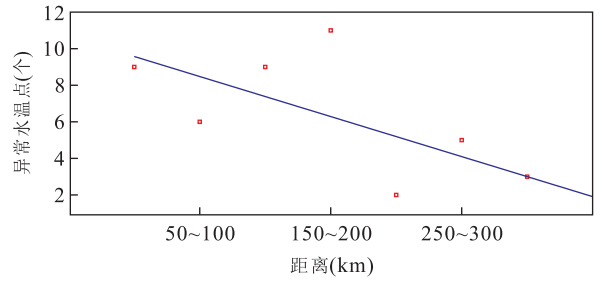


图 5 异常水温点与地震距离关系

Fig.5 The relationship between distance and the abnormal temperature station

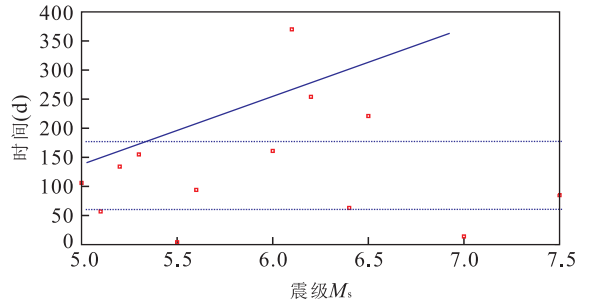


图 6 水温异常持续时间与地震关系

Fig.6 The relationship between earthquake and duration of the abnormal temperature

3.2 水温异常与地震震中的关系

单台异常确定地点,一般根据经验和地质构造预测地震可能发生地点;多台确定震中,根据研究水温异常的出现一般在孕震区及其周围地区.可根据异常分布的密集程度确定地点,而且正负异常相交的部位可判断为震中,研究还发现异常一般从外围地区开始,向震中传播,可参考异常传播方向确定震中.根据 3.1 节假设的平均距离,分别统计 $1 \sim 50$ km, $50 \sim 100$ km, $100 \sim 150$ km...范围内的地震的个数.图 5 显示,在 200 km 以内,地震的个数明显偏多,超过 200 km 地震个数明显减少,远震异常的例子较少.即说明水温异常主要集中在孕震区及附近区域,因此,当水温群体异常或者在某一区域水温异常较多时,该区域发生地震的可能性较大.

3.3 水温异常时间与地震的关系

水温异常出现的时间与地震发生是否存在一定关系?从统计结果看(图 6,两条虚线),水温异常的出现时间一般在震前 $50 \sim 170$ 天范围内,震级越小,异常出现时间与地震发生的时间间隔越小,地震越大,间隔从小到大都有变化,所以水温异常可能是短临异常,也可能是中期异常(1~2 年的异常),从图 7 中可以看出水温异常以短临为主.同时还可以看出

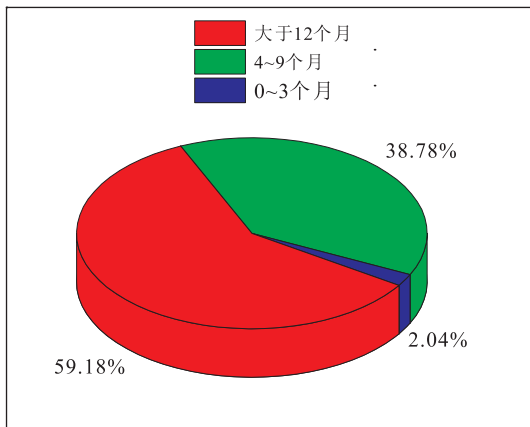


图 7 水温短临异常与中期异常统计

Fig.7 The pie chart of short-impending anomalies and medium term anomalies of water temperature

异常时间持续越长,其对应的地震震级越大(图 6, 实线),由于统计中 $M7$ 以上地震发生较早,水温测点少,缺少异常现象数目。

4 结论

(1)所统计的 49 例水温前兆异常中,畸变型 7 例、升温型 17 例、降温型 14 例、升温—降温型 4 例、降温—升温型 7 例,升温型与降温型异常占较大比例,说明水温异常特征主要表现为阶变;水温异常主要以短临异常或短期异常为主,临震异常最为显著。丽江 $M7$ 地震之前,距离震中 125 km 的洱源水温震前一天出现异常变化,这样可以使水温监测在地震短临预报中发挥更大的作用。从统计结果看,有的异常可能为中期异常(图 7),并且地震震级较大,所以水温异常出现后,如果持续较长时间没发生地震也不能掉以轻心,这时需要结合其他中期预测手段,判断是否为趋势异常。

(2)从异常的表现形态上来看,中期和短期异常相对分散,短临阶段的前兆异常最为突出;从震级与异常空间分布特征分析,震级越大,异常范围越广;发震地点通常会出现在异常集中的区域。由于地震孕育过程中地球物理场和地球化学场的变化比较复杂,想要提高地震预报的准确度和可靠性需深入观测地下流体,分析各观测结果之间的协调性以及前兆异常动态过程。

(3)本研究主要针对云南地区“十五”(2008 年)以前的水温异常与中强震关系进行了梳理,研究结果对云南地区利用水温异常预测地震可能有重要的

借鉴意义,但是随着新测点的大量建设,需要进一步统计它们之间的关系,探寻更为合理的相关性,更好地为未来的地震预测积累经验(何仲太等,2012)。同时,需要总结全国水温异常与地震的相关性,并且根据构造进行分类统计,获取它们之间更好地相关性。

(4)经几十年的发展,水温作为地震前兆观测手段在地震预测中发挥了重要作用,近年来,经过中国地震局“十五”水温台网的建设与优化,水温台站分布密度越来越高,台站开始进行不同层位井水温的对比观测,获取了大量更为可靠的数据。特别是近年来中国中强震较多,更为收集这方面震例提供机遇,笔者将会在此工作基础上,进一步总结近年来水温异常与地震的关系,完善中国大陆水温与地震关系的研究成果。

致谢:感谢云南省地震局及台站同志对本研究的大力支持。

References

- Baker, E. T., Fox, C. G., Cowen, J. P., 1999. In situ Observations of the Onset of Hydrothermal Discharge during the 1998 Submarine Eruption of Axial volcano, Juan de Fuca Ridge. *The Letter of Geophysics Research*, 26 (23): 3445—3448. doi: 10.1029/1999GL002331
- Cao, X. L., Zhang, Z. G., Wang, Q. C., 1995. Anomalous Variations of Shallow Layer Geotemperature before Strong Earthquakes. *North China Earthquake Sciences*, 13(4): 9—17 (in Chinese with English abstract).
- Che, Y. T., Liu, C. L., Yu, J. Z., 2008. Micro-Behavior of Well-Water Temperature and Its Mechanism. *Earthquake*, 28 (4): 20—28 (in Chinese with English abstract).
- Che, Y. T., Yu, J. Z., Liu, C. G., 1996. The Observation and Study on Groundwater Temperature Characteristics in China. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 28(4): 34—37 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. J., Yao, B. S., 1999. The Features of Geotemperature in Short-Term Precursory Anomalies before the Zhangbei Earthquake with $M_s 6.2$. *Earthquake*, 19(2): 179—182 (in Chinese with English abstract).
- Dziak, R. P., Chadwick, W. W., Fox, C. G., et al., 2003. Hydrothermal Temperature Changes at the Southern Juan de Fuca Ridge Associated with $M_w 6.2$ Blanc Transform Earthquake. *Geology*, 31(2): 119—122. doi: 10.1130/0091-7613(2003)031
- He, Z. T., Ma, B. Q., Li, Y. S., et al., 2012. Width and Hanging Wall Effect of Surface Rupture Caused by Wenchuan Earthquake. *Acta Scientiarum Naturalium Universita-*

- tis Pekinensis*, 48(6): 886—894 (in Chinese with English abstract).
- Johnson, H. P., Hutnak, M., Dziak, R. P., et al., 2000. Earthquake-Induced Changes in a Hydrothermal System on the Juan de Fuca Mid-Ocean Ridge. *Nature*, 407: 174—177. doi: 10.1038/35025040
- Liu, Y. W., 2006. Review of the Exploration Seismic Underground Fluid in China. *China Earthquake Research in China*, 22(3): 222—235 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. W., Chen, H. J., Che, Y. T., 2006. Retrospect and Prospect of Observation and Study on Seismic Underground Fluid in China. *Recent Developments in World Seismology*, (7): 3—12 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. W., Sun, X. L., Wang, S. Q., et al., 2008. Relationship of Bore-Hole Water Temperature Anomaly and the 2007 Ning'er $M_s 6.4$ Earthquake. *Journal of Seismological Research*, 31(4): 347—353 (in Chinese with English abstract).
- Lu, M. Y., Liu, Y. W., Fan, X. F., et al., 2009. Preliminary Study on Subsurface Fluid Long-Time Trend Change and Strong Earthquake Prediction. *Journal of Seismological Research*, 32(4): 323—332 (in Chinese with English abstract).
- Mogi, K., Mochizuki, H., Kurokawa, Y., 1989. Temperature Changes in an Artesian Spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and Their Relation to Earthquakes. *Tectonophysics*, 159(1—2): 95—108. doi: 10.1016/0040—1951(89)90172—8
- Sohn, R. A., Fornari, D. J., von Damm, K. L., et al., 1998. Seismic and Hydrothermal Evidence of Acracking Event on the East Pacific Rise Crest at $9^{\circ}50'N$. *Nature*, 396(12): 159—161. doi: 10.1038/24146
- Sun, X. L., Liu, Y. W., 2006. Summaries of the Micro Temperature Variations of Underground Water Caused by Loading Stresses. *Recent Developments in World Seismology*, (7): 17—26 (in Chinese with English abstract).
- Tian, H., Zhong, Y., Zhang, Z. L., 1994. The Relation between Earthquakes and Anomalous Variations of Geothermal Temperature in Beijing Observatory. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 5(3): 9—14 (in Chinese with English abstract).
- Xu, G. M., Feng, Z. S., Tang, Z. F., 2002. Study of Normal Dynamic and Earthquake Samples of Jiangsu Digital Geothermal Data. *Earthquake*, 22(4): 130—135 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. Z., Deng, Z. H., Yang, X. H., et al., 2010. Study on the Influencing Factors of Well Water-Temperature Changes. *Earthquake*, 30(2): 71—79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Liu, Y. W., Yang, X. H., 2013. Contrastive Study on Co-Seismic Response Characteristics of Well Water Temperature in Wenchuan ($M8.0$), Yushu ($M7.1$), Lushan ($M7.0$) and Minxian ($M6.6$) Earthquakes. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(3): 535—541 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G., Wang, J., He, A. H., et al., 2009. Study of Normal Geothermal Dynamics. *Earthquake*, 29(3): 109—116 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹新来, 张子广, 王勤彩, 1995. 浅层地温强震前的异常变化. *华北地震科学*, 13(4): 9—17.
- 车用太, 鱼金子, 刘春国, 1996. 我国地震地下水温动态观测与研究. *水文地质工程地质*, 28(4): 34—37.
- 车用太, 刘成龙, 鱼金子, 2008. 井水温度微动态及其形成机制. *地震*, 27(4): 20—28.
- 陈沉俊, 姚宝树, 1999. 张北 6.2 级地震地温短临异常特征. *地震*, 19(2): 179—182.
- 何仲太, 马保起, 李玉森, 等, 2012. 汶川地震地表破裂带宽度与断层上盘效应. *北京大学学报: 自然科学版*, 48(6): 886—894.
- 刘耀炜, 2006. 我国地震地下流体科学 40 年探索历程回顾. *中国地震*, 22(3): 222—235.
- 刘耀炜, 陈华静, 车用太, 2006. 我国地震地下流体观测研究 40 年发展与展望. *国际地震动态*, 7: 3—12.
- 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. *地震研究*, 31(4): 347—353.
- 陆明勇, 刘耀炜, 范雪芳, 等, 2009. 地下流体长趋势异常变化与强震预测的初步研究. *地震研究*, 32(4): 323—332.
- 孙小龙, 刘耀炜, 2006. 应力加载作用引起地下水微温度场变化的研究综述. *国际地震动态*, (7): 17—26.
- 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. *地震地磁观测与研究*, 15(3): 9—14.
- 杨竹转, 邓志辉, 杨贤和, 等, 2010. 井孔水温动态变化的影响因素探讨. *地震*, 30(2): 71—79.
- 徐桂明, 冯志生, 唐振芳, 2002. 江苏地区数字化地热正常动态及震例初步研究. *地震*, 22(4): 130—135.
- 张彬, 刘耀炜, 杨选辉, 2013. 中国大陆井水温对汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、庐山 7.0 及和岷县 6.6 级地震响应特征的对比研究. *地震工程学报*, 35(3): 535—541.
- 赵刚, 王军, 何案华, 等, 2009. 地热正常动态特征的研究. *地震*, 29(3): 109—116.