

2013年甘肃岷县漳县 M_s 6.6 地震前甘东南地区 前兆异常分析*

曾文浩¹, 杨兴悦¹, 史继平¹, 黄琤琤², 宋婷¹

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 丹江口市地震局, 湖北 丹江口 442700)

摘要: 通过分析甘东南地区的前兆资料, 认为2013年7月22日岷县漳县 M_s 6.6 地震前震中距300 km内甘肃部分前兆资料有明显的中短期异常及典型的短临异常。用从属函数法定量提取了水氡和水位资料中短期异常, 分析了异常特征, 并对岷县漳县 M_s 6.6 地震前水氡、水位、水温、地电阻率及形变资料的异常特征进行了重点分析, 发现地震前甘东南地区的几项地形变资料出现了明显的中短期异常, 部分水氡、水位、水温和地电阻率资料存在明显的短临异常。

关键词: 岷县漳县 M_s 6.6 地震; 前兆异常; 地下流体; 地电阻率; 地形变; 甘东南地区

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)03-0341-11

0 引言

近年来南北地震带及邻区相继发生了汶川 M_s 8.0、玉树 M_s 7.0、芦山 M_s 7.0 和岷县漳县 M_s 6.6 等强震, 给当地造成了重大的人员伤亡和经济损失。强震密集发生引起党中央、国务院和地方政府各级政府对防震减灾, 特别是监测预报工作的高度重视, 社会公众对提高监测预报科学水平的需求更加紧迫。1966年邢台地震后拉开了中国地震预报的序幕, 经过近50年的努力我国地震前兆观测积累了大量的观测资料和科学研究成果, 在方法理论、观测技术、观测资料应用等方面取得了长足的进步, 为地震前兆现象探索、地震前兆机理研究、地震预测方法研究以及地球科学研究积累了丰富的观测资料。

近年来中国地震局和甘肃省地震局持续密切关注甘东南地区的地震形势, 杨兴悦等(2013a)认为今后一段时间该地区震情形势不容忽视。因此在甘东南地区震情形势依然严峻及复杂的情况下做好前兆资料的跟踪分析及研判工作至关重要。

甘东南地区地震前兆观测手段多, 测点布设密集, 积累了一些宝贵的观测资料, 尤其在汶川 M_s 8.0、芦山 M_s 7.0 和岷县漳县 M_s 6.6 等几次强震前甘东南地区的前兆资料均出现了不同程度的异常。本文收集整理甘东南地区水氡、水位、水温和地电阻率等前兆资料, 结合岷县漳县 M_s 6.6 地震, 对前兆资料与地震的关系进行探讨, 分析前兆异常特征、总结经验、加强交流, 以期望为震情研究提供参考。

1 中短期前兆异常

1.1 流体异常

甘东南地区前兆观测手段较多, 测点距岷县漳县 M_s 6.6 地震震中均小于300 km。天水、陇南、平凉井下地电阻率分别于2011年、2013年投入观测, 观测时间较短。多数水温测值随时间变化而漂移上升, 数字化水位测值变化幅度较大, 形变资料同震效应明显, 记录了清晰的地震波形。上述资料这些特点决定了使用从属函数提取中短期异常效果不理想。因此使用模拟水氡和水位资料

* 收稿日期: 2014-09-03.

基金项目: 甘肃省地震局地震科技发展基金(面上基金2013M03)和中国地震局“三结合”课题(142801)联合资助。

提取中短期前兆异常,其中水氡和水位资料在长期观测中产生的台阶状变化原因需清楚并能进行校正。大量的观测资料表明,中强地震发生前地下流体异常变化过程具有阶段性,中期异常比较显著(范雪芳等,2009;杨兴悦等,2013b)。

车用太等(2011)提出了地下水干扰异常识别与排除的4个“相关性”原则,即成因上、空间上、时间上和强度上的相关性;提出了地下水前兆异常确认的4个判据,即首先是非干扰性异常,其次是有震例与理论模式的支持,再次是已有前兆映震理论或模式的支持,最后是有其它测项与学科异常的配套。采用上述原则筛选出异常资料,然后在此基础上,采用王吉易等(2003)的“同一化”研究思路,遵循3个原则:(1)观测数据时间长,在10年以上;(2)无人为干扰(仪器改变、台站改造、井(泉)装置改变、无规律抽水、渠道放水与停水等)引起的台阶状变化或对台阶状变化因素比较清楚,能进行校正;(3)测点目前仍在正常观测。按照这些条件进行严格筛选后,使用月均值13点平滑作为计算序列,采用从属函数法定量提取水氡等资料中短期异常,结果表明岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前甘东南地区出现了8项趋势性前兆异常,其中模拟水氡5项,水位3项,分别为平凉附件厂井水氡、通渭温泉水氡、武山1号泉水氡、武山22号井水氡、西和芦河泉水氡,陇05井水位、陇06井水位、陇18井水位。

通过对甘东南及邻区震兆关系研究,认为选取震中距小于700 km的8级地震,震中距小于500 km的7级地震,震中距小于400 km的6级地震,震中距小于300 km的5级地震作为研究对象较为合理。为方便统计,相邻两次地震时间间隔小于1年,统计发生在前的地震;当两次地震震中距相当时,选择震级较大的地震;当两次地震震级相差小于0.5级,且震中距相差100 km以上时,选择震中距较近的地震;当两次地震震级相差大于0.5级时,选择震级较大的地震。依据以上条件选取 $M_s \geq 5.0$ 地震进行研究,分为8组12次(表1)。计算结果与实践表明用从属函数方法定量提取异常效果明显,中短期异常判定方法及各观测手段从属函数经验常数见杨兴悦等(2006,2011,2013b),王燕等(2010)等文献。

表1 1987~2013年甘肃及邻区发生的 $M_s \geq 5.0$ 地震
Tab. 1 Statistic of $M_s \geq 5.0$ earthquakes in Gansu Province and its adjacent regions from 1987 to 2013

编号	发震时间	震中位置			震级 M_s
		$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	地点	
1	1987-01-08	34.10	103.40	甘肃迭部	5.8
	1987-08-10	38.11	106.42	宁夏灵武	5.2
2	1990-04-26	36.10	100.30	青海共和	7.0
	1990-10-20	37.10	103.50	甘肃景泰	6.2
3	1995-07-22	36.50	103.00	甘肃永登	5.8
	1996-06-01	37.20	102.90	甘肃天祝	5.4
4	2000-06-06	37.10	104.00	甘肃景泰	5.9
5	2003-11-13	34.72	103.90	甘肃岷县	5.2
6	2006-06-21	33.10	105.00	甘肃文县	5.0
7	2008-05-12	31.00	103.40	四川汶川	8.0
8	2013-04-20	30.30	103.00	四川芦山	7.0
	2013-07-22	34.50	104.20	甘肃岷县漳县	6.6

中国地震工作者在20世纪70年代就提出了长、中、短、临渐近式预报思路,认为长期异常预报时间为几年至一二十年,中期异常预报时间为一年至数年,短期异常预报时间为数月内,临震异常预报时间为几天至十几天(张国民等,2001)。在本文研究中异常出现时间在几个月至三年的定义为中短期异常,异常时间超过三年视为不对应地震。依据上述方法及条件提取了甘东南地区流体中短期异常,本文只列出了岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前出现前兆异常的测项,结果表明:统计时段内共出现56次异常(图1),其中有40次很好地对应了表1中所列的 $M_s \geq 5.0$ 地震。发生了地震而没有出现异常算漏报,共20次;出现了异常而没发生地震属虚报,共13次。异常对应率为65.6%,漏报率为32.8%,虚报率为23.2%。

岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前甘东南地区出现了5项水氡中短期异常和3项水位中短期异常(表2),从异常测项分布来看,如果以此次地震震中为迪卡尔坐标的中心点,则地震前甘东南地区出现的8项中短期异常中有6项分布在第一象限,1项分布在第二象限,1项分布在第四象限,大致在 $-45^{\circ} \sim 115^{\circ}$ 之间。异常出现最早时间为32个月,最晚为7个月,平均21.8个月。异常持续时间最长为21个月,最短为2个月,平均12个月。5项资料异常结束后发震,3项资料异常持续过程中发震。

1.2 形变异常

岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前甘肃有 15 个专业地形变台、20 套仪器正常运行, 主要有洞体应变、水管倾斜、钻孔倾斜、钻孔分量应变和体应变观测。姜振海等 (2013) 对这些观测项目进行分析, 认为在地震前出现了一些明显的地震前兆异常变化。观测与研究表明, 地震前地形变观测曲线存在着准线性匀速变化→加速变化→发生地震→震后调整恢复的过程。岩石破裂实验也证明了应力-应变曲线在主破裂发生前存在着一个由准线性到非线性的变化。因此地形变观测时序出现由准线性至非线性趋势变化时, 有可能是地震前兆异常, 大致与地震地形变演化阶段当中的正常速率变化段 (β_1)、不稳态段 (β_2) 和临震反向段 (γ_1) 相类比 (中国地震局监测预报司, 2008)。因此本文

用这种形态异常法研究甘肃地形变观测曲线的 β_1 、 β_2 和 γ_1 共 3 个阶段的异常变化, 认为在岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前有 4 项形变观测资料出现了明显的前兆异常 (图 2)。

1.2.1 宕昌形变

宕昌台钢瓦棒伸缩仪 (SSY) 和水管倾斜仪 (DSQ) 2008 年开始正式观测, 观测资料稳定、可靠, 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前 2009~2013 年该台邻区未发生 5 级以上地震, 故将 2009 年以来的资料作为背景值进行分析。宕昌台距 $M_s6.6$ 地震震中 53 km, 震前 SSY-EW 分量的异常变化当中存在 β_1 、 β_2 和 γ_1 3 个变化阶段, SSY-NS 分量、DSQ-NS 分量也存在 β_1 和 β_2 两个变化阶段, 2 套仪器都记录到了明显的同震效应 (图 2a~d)。

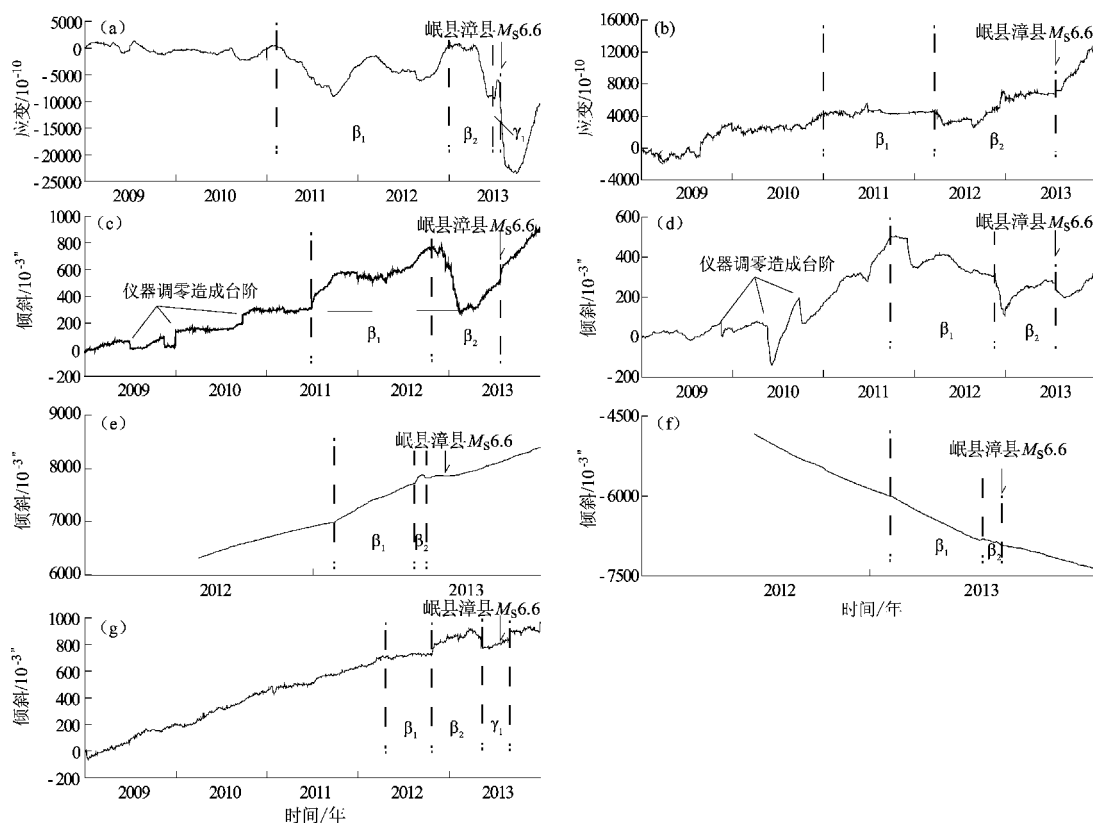


图 2 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前甘东南地区形变异常日值曲线

(a) 宕昌 SSY-EW 分量; (b) 宕昌 SSY-NS 分量; (c) 宕昌 DSQ-EW 分量; (d) 宕昌 DSQ-NS 分量;
(e) 武山 CZB-EW 分量; (f) 武山 CZB-NS 分量; (g) 兰州 CZB-NS 分量

Fig. 2 Daily value curves of crustal deformation anomalies in southeast area of Gansu province before Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake

(a) the EW component of SSY at Tanchang Station; (b) the NS component of SSY at Tanchang Station; (c) the EW component of DSQ at Tanchang Station; (d) the NS component of DSQ at Tanchang Station; (e) the EW component of CZB at Wushan Station; (f) the NS component of CZB at Wushan Station; (g) the NS component of CZB at Lanzhou Station

SSY-EW 分量: 每年 2、7 月测值较高, 5、10 月测值较低, 具有较为稳定的变化趋势。2009 年 EW 分量年变幅为 $2\,888.21 \times 10^{-10}$, 2010 年年变幅为 $2\,633.1 \times 10^{-10}$, 2011 年 4 月测值持续下降, 打破了年变规律, 2011 年 10 月测值为年最低, 年变化达到 $10\,094.2 \times 10^{-10}$, 是 2009、2010 年的 3 倍多, 2012 年年变幅也明显大于 2009 和 2010 年, 2013 年 4 月测值出现异常, 4 月 16 日至 6 月 7 日测值快速下降, 下降幅度达 $10\,085.4 \times 10^{-10}$, 7 月 3~14 日又出现快速上升, 异常幅度为 $3\,482.4 \times 10^{-10}$ (图 2a)。

SSY-NS 分量: 2009~2010 年每年年初测值小幅下降, 4 月至年底上升, 总体呈较为稳定和上升趋势, 2011 年 1 月出现异常, 打破了这种上升趋势, 表现为水平变化趋势, 2012 年略降后迅速回升, 2013 年初恢复到原来的上升趋势 (图 2b)。

DSQ-EW 分量: 2009~2011 年 6 月底测值以 $0.35 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度稳定缓慢上升, 2011 年 7 月初至 2012 年 10 月底以 $0.75 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度加速上升, 2012 年 11 月初至 2013 年 2 月 13 日以 $4.7 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度迅速下降, 2013 年 2 月 14 日至 7 月 21 日测值又转折为以 $1.45 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度上升, 这 3 次速率的改变是非常明显的前兆异常变化 (图 2c)。

DSQ-NS 分量: 2010 年 5 月 21 日和 9 月 27 日对仪器两次调零后, 分别于 5 月底和 9 月底出现了两次大幅度快速下降变化, 认为该异常变化与调试仪器有关, 但 2009 年初至 2011 年 10 月测值总体呈上升趋势, 2011 年 11 月出现异常, 表现为转折下降趋势变化, 2012 年 11~12 月加速下降, 12 月底又转折为上升趋势变化 (图 2d)。

1.2.2 武山形变

2011 年 6 月武山台安装了垂直摆倾斜仪 (CZB-2A), 2012 年 7 月正式运行。距岷县漳县 $M_s6.6$ 地震震中 80 km, 记录到了较为明显的前兆异常、同震效应及震后变化, 在两个分量异常变化当中存在 β_1 和 β_2 两个变化阶段 (图 2e~f)。

CZB-EW 分量: 2012 年 7 月 1 日~2013 年 2 月初测值以 $3.1 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度稳定缓慢的上升, 2013 年 2 月 3 日~6 月 14 日以 $5.67 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度上升, 且 6 月 14 日观测曲线出现了明显的鼓包畸变现象 (图 2e)。

CZB-NS 分量: 2012 年 7 月 1 日~2013 年 2 月初测值以 $5.34 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度下降, 2013 年 2 月 3 日~6 月 26 日以 $5.9 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度下降, 2013 年 6 月 27 日出现了明显的鼓包畸变 (图 2f)。

1.2.3 兰州形变

兰州台垂直摆倾斜仪 (CZB) 于 2001 年开始观测。距岷县漳县 $M_s6.6$ 地震震中 178 km, 震前异常比较明显。同时该仪器观测以来, 2003 年岷县 $M_s5.2$ 和 2004 年岷县 $M_s5.0$ 两次地震前兰州 CZB 均出现了一定的地震前兆异常变化 (姜振海等, 2004)。

CZB-NS 分量: 2010 年 1 月初至 2012 年 3 月中旬测值以 $0.48 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度上升, 之后转折为下降, 认为是异常的开始, 2012 年 3 月中旬至 12 月中旬以 $0.38 \times 10^{-3}"/\text{日}$ 的速度下降, 2012 年 12 月中旬至 2013 年 5 月中旬出现鼓包畸变。在 NS 分量的异常变化存在 β_1 、 β_2 和 γ_1 共 3 个变化阶段。NS 分量的异常幅度大于 EW 分量与兰州台位于震中的北方是相符的 (图 2f)。

2 短临前兆异常

甘东南地区现有前兆观测项目有流体 (水氡、水位、水温、水汞、气氡、气汞)、地电 (电阻率、电场)、地磁、形变。岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前部分流体和地电学科资料出现了明显的短临前兆异常。其中 8 项模拟水氡资料出现了 4 项准同步异常, 14 项水位资料出现了 1 项典型地震前兆异常, 17 项水温资料出现了 3 项典型异常, 5 项地电阻率资料出现了 2 项地震前兆异常。

2.1 水氡

模拟水氡观测经过几十年的资料积累, 总结了一批震例, 在地震预报研究中起到了重要的作用。实践表明模拟水氡可靠性较好, 在震情会商中是较为可信的观测手段之一。甘东南地区目前观测的模拟水氡资料有 10 余项, 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前有 4 项资料出现了同步变化, 分别为平凉附件厂井、平凉北山 1 号泉、平凉北山 2 号泉和天水花牛泉水氡。这 4 项资料从 2013 年 2~3 月出现准同步快速上升, 且为同一速率上升 (图 3), 从图 3 中可以看出 2013 年上升速率明显比前几年同期快, 在测值达到最高值转为下降过程发生地震, 异常持续时间为 4~5 个月。除 2010 年附件厂井水

氡测值变化较大外,几项资料变化比较稳定且同步,因此认为 $M_s6.6$ 地震前水氡资料准同步快速上升为地震前兆异常。

张昱等(2010)分析了1990年4月26日青海共和7.0级地震、2000年9月12日青海兴海6.6级地震、2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震和2008年5月12日四川汶川8.0级地震前青海、甘肃以及四川北部地区部分水氡观测点的资料变

化情况,发现这些测点的观测资料存在同步或准同步的变化;王燕等(2009)认为汶川地震前甘东南几项水氡资料出现了同步异常变化。因此认为甘东南地区几项水氡资料同步快速变化是比较可信的地震前兆异常。通过本文的研究以及前人对水氡资料的震例研究总结,认为在某一个地区不同测点的多项资料出现同步变化为地震前兆异常,这一认识对地震预报而言,有实际预测意义。

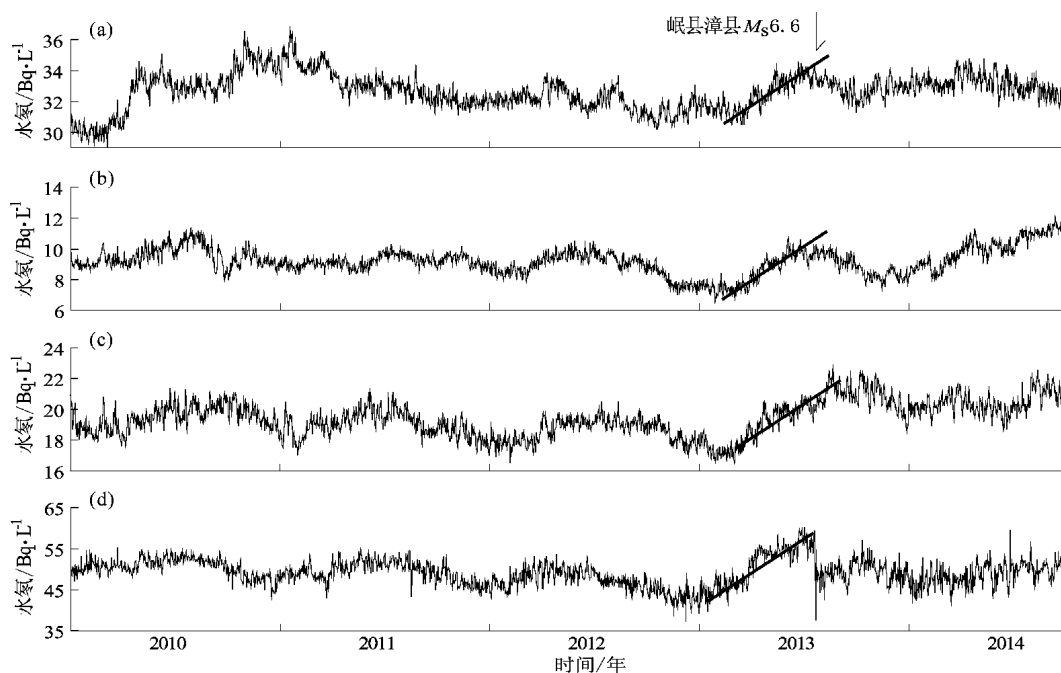


图3 甘东南水氡日值曲线

(a) 附件厂泉; (b) 北山1号泉; (c) 兆山2号泉; (d) 天水花牛泉

Fig. 3 Daily value curves of water radon in southeast area of Gansu province

(a) the spring in Fujianchang; (b) No. 1 spring in Beishan; (c) No. 2 spring in Beishan; (d) Huaniu spring in Tianshui

2.2 水位

我国已经建立了比较完善的地震地下流体观测网,水位观测作为重要的地震前兆观测手段被应用于地震预测实践。大量的震例表明在许多地震前可以观测到井水位的异常变化,因此井水位观测一直被看作是用于地震预测、预报的有效手段之一(付虹等,2014)。笔者分析了甘东南地区10多项水位资料,排除环境干扰、架设仪器、降雨影响及人为干扰等因素造成的异常变化后,认为平凉C11井水位在岷县漳县地震前出现了明显的短临前兆异常(图4a)。该井深610 m,水位探头深度为52 m。从水位与降雨曲线(图4b)对比来看,水位受降雨影响不是很明显。从图4中可看出2012年以前水位总体呈下降趋势,2012年底开

始转折上升,2013年3月水位转为下降,9月初又转为上升。从降雨曲线可看出6~9月降雨量较集中,且降雨量比往年同期多,而水位测值没有上升反而持续下降,在下降过程中发生岷县漳县 $M_s6.6$ 地震。因此认为平凉C11井水位测值呈反向变化是较为可信的前兆异常。

2.3 水温

我国水温观测经过30多年的发展形成了具有300多个水温观测点的前兆水温观测网,大部分观测点都采用具有0.0001℃高精度的石英温度计,因此通过反映地壳热状态的井水温度或井孔围岩温度的观测,有可能捕捉到地震前地壳热状态异常变化信息,从而进行地震监测预报的探索。笔者分析了甘东南地区的12项水温资料,排除环境

干扰、降雨、架设仪器等人为干扰因素造成的异常变化后,发现岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前有2项水温资料出现了明显的前兆异常,分别为平凉 C11 井浅层水温和深层水温。其中清水温泉水温异常伴随着降雨和井中下放探头干扰,可信度降低,不在本文中讨论。

平凉 C11 井井深 610 m, 该井架设两套水温

仪,水温探头下放深度分别为 200 m 和 280 m, 两套水温仪自开始观测以来一直上升漂移(图 5a、b)。2013 年 1 月由“九五”仪器改为“十五”仪器观测,对浅层水温仪器产出数据所产生的台阶进行了人工校正,从图 5a 中可明显地看出“十五”仪器产出的数据较为稳定。2011 年深层水温断记半年多,因此只使用了“十五”水温数据。

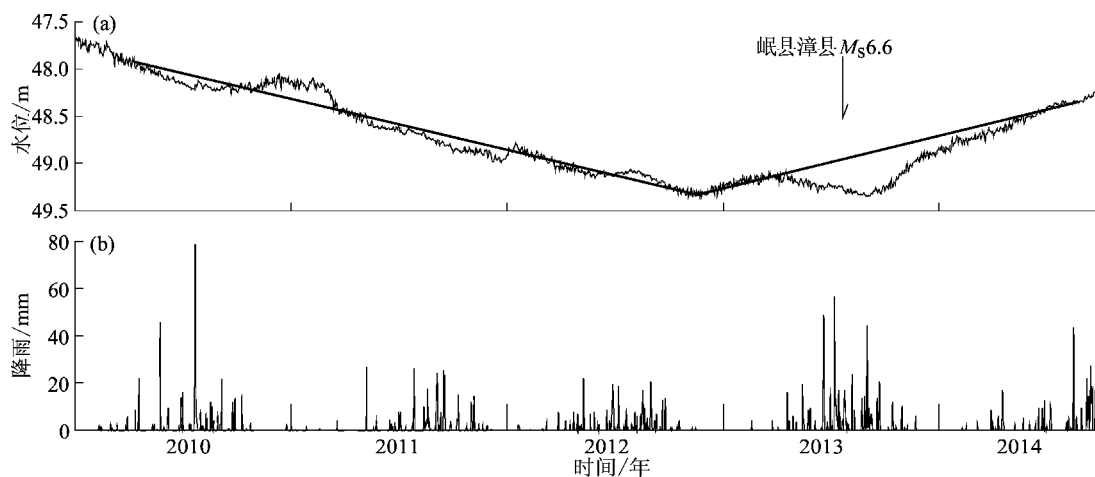


图4 平凉 C11 井水位 (a) 和降雨量 (b) 日值曲线

Fig. 4 Daily value curves of water level (a) and rainfall (b) in C11 Well at Pingliang Station

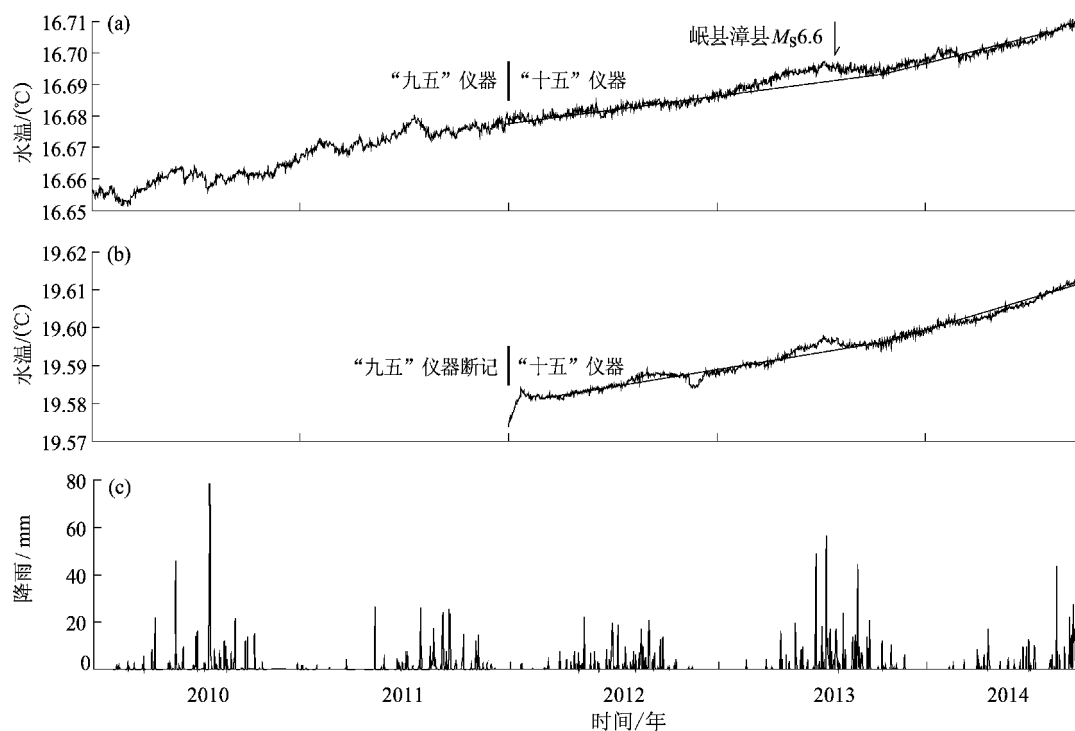


图5 平凉 C11 井水温日值曲线

(a) 浅层水温; (b) 深层水温; (c) 降雨量

Fig. 5 Daily value curves of water temperature in C11 Well at Pingliang Station

(a) shallow ground water temperature; (b) deep ground water temperature; (c) rainfall

降雨对该井水位影响不明显,而水温与水位变化存在一定的关系,该井水温探头较深,因此认为该井两套水温仪基本不受降雨、气温影响,从图 5 中水温与降雨曲线也可看出二者之间联系不密切。平凉浅层水温从 2013 年 3 月开始上升速率较正常情况下快(图 5a),深层水温从 2013 年 5 月开始上升形态和浅层水温一致(图 5b),2013 年 7 月上旬测值达到最高值后同步转为下降,在下降过程中发生了岷县漳县 $M_s6.6$ 地震,异常持续 2~4 个月。而同期水位转为下降,按常理水位下降水温应该也下降,而此段时间水温反而上升,因此认为两套仪器偏移正常的上升速率,且变化较同步是较为可信为地震前兆异常,从 2013 年 8 月上旬开始两套水温测值上升速率较地震之前快,这可能与水位上升有关。

2.4 地电阻率

2.4.1 通渭地电阻率

通渭地电阻率观测始于 1971 年,目前布设 N20°W 向(供电电极距 AB 为 1 100 m)、EW 向(长电极距测道 1 100 m)和 EW' 向(短电极距测道

700 m),观测仪器为 ZD8B。2012 年 3 月开工的通渭县综合物流园建设施工对通渭地电阻率有一定的影响。尤其是 2012 年 8 月物流园开始垫土填沟, N20°W 测道 N 测量极周围开挖、取土致使该测量极位于 4~5 m 高孤立的原土土丘中, N 供电电极附近建设金属构架大棚; EW 向短电极距测道 W 供电电极深埋在地下 10 m 以上,而长电极距测道 W 供电电极一侧被取土后电极位于高约 2 m 的土坎中。这些施工对通渭地电阻率观测形成多样化的干扰影响(杜学彬等, 2013)。从通渭地电阻率日值曲线(图 6)可以看出, N20°W 测道于 2012 年 8 月初开始持续下降, 2013 年 4 月 19~20 日测值上升幅度较大, 4 月 20 日发生芦山 $M_s7.0$ 地震测值转为上升, 5 月下旬测值转为持续下降, 在下降过程中发生岷县漳县 $M_s6.6$ 地震,震中距 125 km。EW 道测值与 N20°W 测道测值变化同步且形态极为相似。EW' 道测值总体呈下降趋势,但 2013 年测值明显低于往年同期。杜学彬等(2013)认为通渭地电阻率这种加杂干扰的异常变化在震前认为是地震前兆异常。

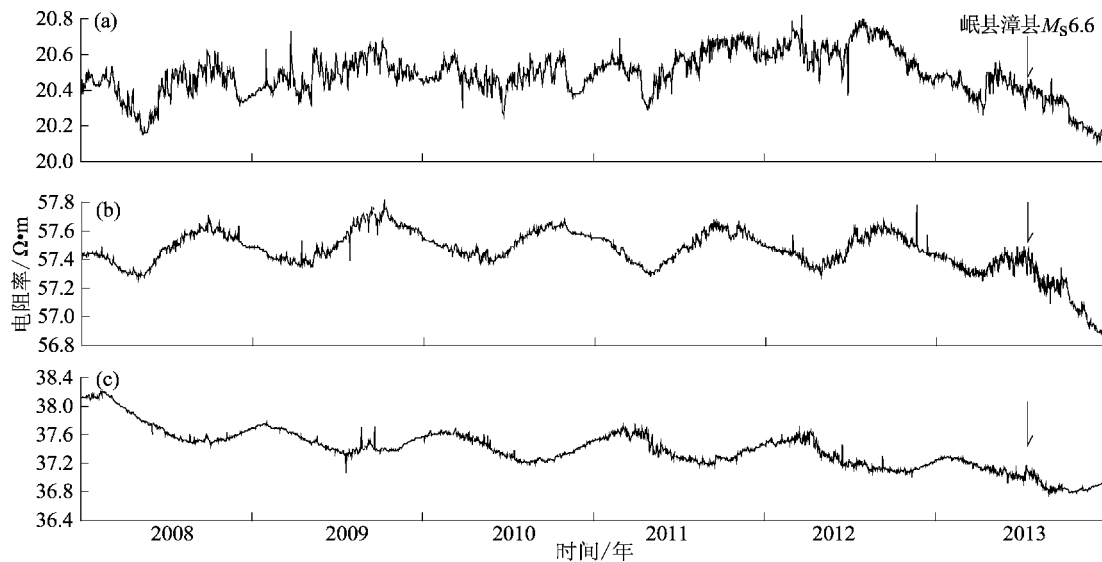


图 6 通渭地电阻率日值曲线

(a) N20°W 测道; (b) EW 测道; (c) EW' 测道

Fig. 6 Daily value curves of geoelectrical resistivity at Tongwei Station

(a) N20°W direction; (b) EW direction; (c) EW' direction

2.4.2 天水井下地电阻率

天水地电阻率原地面观测系统 NS 道在 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前出现了明显的异常, 2008 年 3 月 11 日测值开始快速上升, 上升幅度为 1.5%

(张学民等, 2009), 说明天水地电阻率能敏感地反映地震信息。2009 年在天水地电台站测区建设物流园对观测产生干扰, 致使资料无法使用, 于是在原测区钻井进行井下地电阻率观测, 2011 年 3

月开始正式运行,布极近似等边直角三角形,共9口井,井深100 m,大致呈NS、EW和NW向分布。NS、EW向井孔间距100 m,NW向井孔间距130 m,进行浅层、深层水平观测、深浅层电极互换以及垂直等7种观测方式(杨兴悦等,2012)。深层水平观测方法为常规观测,其他观测方式为实验观测,在本文中只研究常规井下电阻率观测。

2013年4月9日天水井下地电阻率NS道、EW道和NW道测值出现准同步异常变化,异常形态表现为上下波动,2013年4月20日发生四川芦山 $M_s7.0$ 地震,震中距540 km。NS道正常观测值为 $(4.98 \pm 0.01) \Omega \cdot m$,震前变幅为 $\pm 0.03 \Omega \cdot m$,震前1天最大变幅达 $-0.06 \Omega \cdot m$;EW道正常观测值为 $(7.05 \pm 0.01) \Omega \cdot m$,震前变幅为 $\pm 0.03 \Omega \cdot m$,震前1天最大变幅为 $-0.04 \Omega \cdot m$;NW道正常观测值为 $(7.5 \pm 0.1) \Omega \cdot m$,震前变幅为 $\pm 0.03 \Omega \cdot m$,震前3小时最大变幅达 $+0.29 \Omega \cdot m$,这种上下波动异常持续至5月4日完全结束(图7)。传统地电阻率异常形态一般表现为正异常或负异常,而

天水井下地电阻率由于观测时间短,没有震例积累,出现的波动异常变化并未得到重视。

通过芦山地震的检验,认为天水井下地电阻率出现明显的波动变化为地震前兆异常。天水地电阻率EW、NS道于6月12日开始再次出现波动异常,异常形态与芦山地震前的形态相似,但幅度没有芦山地震前大,EW道异常时段波动变化幅度为 $\pm 0.03 \Omega \cdot m$,NS道异常形态也表现出波动变化,异常时段波动变化幅度为 $\pm 0.02 \Omega \cdot m$,NW道资料异常不是十分明显(图7)。有了芦山地震的经验,重复性出现波动异常变化引起了台站人员的重视,并在岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前填写了预报卡,取得了良好的效果。

传统地电阻率电阻埋深多为2 m左右,观测背景噪声大,极易受环境干扰,异常形态也多表现为正异常或负异常,一般情况下异常幅度也较大。而井下地电阻率干扰小,这种波动变化在背景噪声很小的基础上不需用数学方法处理就能容易地识别,仅从这两次震例来看是较为理想的前兆观测手段。

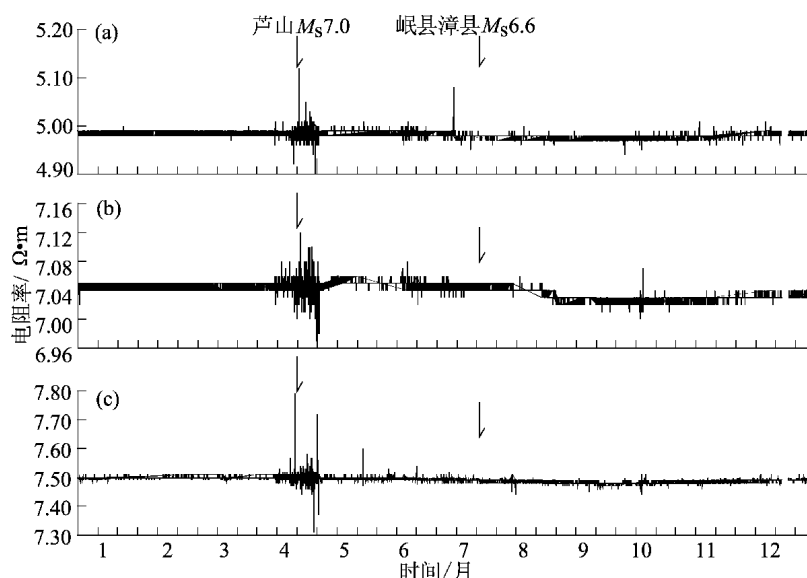


图7 2013年天水井下地电阻率异常曲线

(a) NS道;(b) EW道;(c) NW道

Fig. 7 Anomaly curves of deep well geoelectrical resistivity at Tianshui Station in 2013

(a) NS direction; (b) EW direction; (c) NW direction

3 讨论与结论

笔者针对岷县漳县 $M_s6.6$ 地震重点讨论了甘东南地区前兆异常。用从属函数法定量提取了水

氢和水位中短期异常,认为地震前出现了8项趋势性异常。用从属函数法对各测点历史资料进行定量提取异常,中强地震对应率高,效果较为理想。

(1) 研究表明趋势异常本身并不是某一个地震的“专有”前兆,而是多个地震的“共同前

兆”。从成因来看,趋势异常不是来自震源的“源兆”,而是“外因性”的“场兆”。因此依据这类异常提出的预测只是一个“可能的发震时段”,即一组趋势异常变化并不只对应一个地震,而是对应一个地震的活跃时段,即趋势异常为多个强震、中强震的共同前兆。在本文研究中将中短期异常定义为三年内,依据这一条件上述资料中武山 1 号泉、武山 22 号井、西和芦河泉水氢和陇 18 井水位资料异常目前还没有结束。但是 1987 年以来还未出现一组异常对应两个以上中强地震的现象,因此可认为最后一组异常对应了芦山 $M_s7.0$ 和岷县漳县 $M_s6.6$ 地震,在目前没有出现新异常的情况下,认为上述资料目前未出现中短期异常。

(2) 岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前甘东南地区出现了一些明显的典型前兆异常,这些典型异常研究对今后的预测预报有重要的参考意义。文中列出了这些异常震前、震时及震后的资料,在排除所有影响因素的情况下通过对比分析认为是比较可信的前兆异常。对于目前资料的判定可参考震前正常情况下资料变化,例如某一地区不同测点的观测资料呈同步、同一速率变化,可认为是可靠的地震前兆异常;反之某项资料呈一定的速率变化,在震前打破了这种变化而震后恢复到震前的变化形态则可推断当前资料无异常,这种无异常判定对日常的震情会商也会起到至关重要的作用。

(3) 一项或多项资料出现异常变化首先要排除是否为仪器、人为、环境等方面原因引起的,观测资料干扰的排除对地震预测而言也有一定的意义。例如岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前陇南成县水温出现了较为明显的异常。6 月 17 日开始至 7 月底测值变化幅度明显大于正常情况,6 月 22 日下降 $0.0056\text{ }^{\circ}\text{C}$,为单日下降最大幅度。由于成县水温观测点没有进行气象三要素观测,收集了气象部门统计的 2013 年 7 月 8 日 8 时到 9 日 8 时成县降雨量为 44.6 mm ,参考距成县较近的天水降雨量、陇南两水降雨量,认为成县水温与降水存在一定的联系,大量降雨会引起水温下降,且水温下降略为滞后。因此正确分析每个观测点异常是否为干扰异常以及明确排除干扰因素对观测资料的分析应用,对地震预测预报有重要的参考意义。

(4) 从异常的时空分布来看,岷县漳县 $M_s6.6$ 地震中短期异常的范围较大,短临异常范围较小。本文定量提取中短期异常对发震时间有指

示意义,当中短期异常持续或结束后,短临异常出现后预示着地震的临近。通过前兆资料无法直接判定震中,但根据经验,可利用前兆异常的分布来缩小震中范围。如果以岷县漳县地震震中为迪卡尔坐标的中心点,则地震前甘东南地区出现的 8 项流体中短期异常中 6 项分布在第一象限,1 项分布在第 2 象限,1 项分布在第 4 象限,大致在 $-45^{\circ}\sim 115^{\circ}$ 之间。9 项短临异常全部分布在第 1 象限,在 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间,所有异常点的震中距都在 300 km 范围内,由于形变观测点少且分布不均,震前异常空间分布不明显。本文所得到的岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前甘东南地区的前兆异常分布特征可为今后异常分析研究提供借鉴。

本文形变部分内容与甘肃省地震局姜振海高级工程师进行了有益的讨论,在此表示感谢!

参考文献:

- 车用太,鱼金子,刘成龙,等. 2011. 判别地下水异常的干扰性与前兆性的原则及其应用实例[J]. 地震学报,33(6):800-808.
- 杜学彬,严玲琴,范莹莹,等. 2013. 2013 年岷县漳县 $M_s6.6$ 地震前后地电观测引起的思考[J]. 地震工程学报,35(3):513-521.
- 范雪芳,王吉易,陆明勇. 2009. 汶川 8.0 级地震前典型流体中期前兆异常的初步研究[J]. 地震,29(1):132-140.
- 付虹,郭成栋,赵小艳,等. 2014. 云南开远井水位异常分析[J]. 地震学报,36(2):292-298.
- 姜振海,史小平. 2006. 兰州 CZB-1 型竖直摆倾斜仪观测资料初步分析[J]. 地震研究,29(1):55-59.
- 姜振海,翟玮,王小娟. 2013. 甘肃岷县漳县 $M_s6.6$ 地震与甘肃形变异常情况探讨[J]. 地震工程学报,35(3):549-556.
- 王吉易,宋贯一,曹志成,等. 2003. 地下水诱发的浅层前兆异常及其机理与有关的地震预报问题(3)[J]. 华北地震科学,21(1):1-10.
- 王燕,杨兴悦,陈雪梅,等. 2013. 甘肃模拟水位资料处理方法研究及映震效能评估[J]. 地震研究,36(1):24-33.
- 王燕,杨兴悦,周建华. 2009. 天水地震台流体异常与汶川 8.0 级地震关系探讨[J]. 防灾科技学院学报,11(4):71-75.
- 杨兴悦,陈连旺,杨立明,等. 2013a. 巴颜喀拉块体周缘几次强震对甘肃地区地震形势的影响[J]. 地震,33(3):77-89.
- 杨兴悦,王燕,缙亚江,等. 2011. 甘肃东南部水氢中期异常特征研究[J]. 地震研究,34(1):8-18.
- 杨兴悦,王燕,王建荣,等. 2013b. 甘东南地下流体异常与甘肃岷县 6.6 级地震关系探讨[J]. 地震工程学报,35(4):808-815.
- 杨兴悦,王燕,闫万生. 2006. 武山 22 号井水氢中期异常与地震关系的探讨[J]. 西北地震学报,28(4):379-380.
- 杨兴悦,杨立明,康云生,等. 2012. 天水地震台井下地电观测系统介绍及其分析[J]. 地震研究,35(1):92-97.
- 张国民,傅征祥,桂燮泰,等. 2001. 地震预报引论[M]. 北京:科学出

版社.

意义探讨[J]. 地震研究, 33(3): 253–258.

张学民, 李美, 关华平. 2009. 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析[J]. 地震, 29(1): 108–115.

中国地震局监测预报司. 2008. 地形变测量(第一版)[M]. 北京: 地震出版社.

张昱, 刘小凤, 常千军, 等. 2010. 大震前水氡同步异常变化及其预测

Analysis on the Some Typical Precursory Anomalies before Minxian – Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake in Southeast Area of Gansu Province in 2013

ZENG Wen-hao¹, YANG Xing-yue¹, SHI Ji-ping¹, HUANG Cheng-cheng², SONG Ting¹

(1. *Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

(2. *Earthquake Administration of Danjiangkou Multiply, Danjiangkou 442700, Hubei, China*)

Abstract

By analyzing the precursory data in the southeast area of Gansu Province before Minxian – Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on Jul. 22, 2013, we found that there appeared the obvious mid-short anomalies and typical short impending anomalies in the precursory data in the area of 300 km from the epicenter. Then we quantitatively extracted the mid-short term anomalies of water radon and water level by subordinate function method, and took a brief analysis of anomalies characteristics of it. Then we focused on analyzing the anomalies characteristics of water radon, water level, water temperature, geoelectrical resistivity and deformation data before Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake, and obtained that there existed obvious mid-short impending anomalies in several ground deformation data, and the obvious short impending anomalies in some data of water radon, water level, water temperature, geoelectrical resistivity in the southeast area of Gansu Province.

Key words: Minxian – Zhangxian $M_s6.6$ earthquake; precursory anomaly; underground fluid; geoelectrical resistivity; ground deformation; southeast area of Gansu Province