

2012 年金塔 5.4 级地震前兆异常时空演化特征研究^①

杨 莉¹, 高曙德¹, 张立红¹, 徐锡泉², 王军燕¹, 叶媛媛¹, 韩 英¹

(1. 甘肃省地震局 甘肃 兰州 730000; 2. 内蒙古地震局, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要:利用甘肃前兆台网观测资料进行时空扫描,发现地下流体参量、地倾斜等在甘肃酒泉金塔 5.4 级地震前 10 天内出现了一系列异常变化,鼎新—德令哈基线在两年半的时间内缩短 5 mm;短临异常主要出现在距震中 200 km 范围的台站,时间是 3 月中旬和 4 月下旬;临震异常集中出现的时间是 4 月 28 日至 5 月 1 日。距离震中较近的高台倾斜完整记录下酒泉金塔 $M_s5.4$ 地震发生过程中岩土石受力变化的全部过程,提供了地震孕育和发生的完整演化资料,对完善地震理论模型和地震预测有积极的研究价值。

关键词:金塔地震;前兆异常;时空演化特征;地震预测

中图分类号:P315.7

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2015)04-1095-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.1095

Study of Time-space Evolution Characteristics of Precursor Anomaly before the Jinta $M_s5.4$ Earthquake of 2012

YANG Li¹, GAO Shu-de¹, ZHANG Li-hong², XU Xi-quan², WANG Jun-yan¹,
YE Yuan-yuan¹, HAN Ying¹

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

2. Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: An earthquake of $M_s5.4$ occurred at the boundary between Jinta County, Jiuquan City, Gansu Province and Ejina County, Alashan City, Inner Mongolia Autonomous Region in the north Jinta—Huahai Basin (south margin of Beishan) of the active Altun fault belt on May 3, 2012. We found that the values of groundwater radon from Jiayuguan, Lanzhou, Wushan, and Pingliang stations exhibit synchronous abnormal variations before and after April 22 within 90~900 km from the epicenter by time-space scanning of the observed data from the Gansu precursor network and calculating the slip change rate of groundwater radon and variation rate of base value. These abnormal variations were mainly presented as increasing groundwater radon value from 5.6% to 37%. From April 22, 2012, the daily measured water level parameter increased a step with the amplitude increasing initially from 0.36% to 1% and then decreasing. The relationship between the abnormal variations in groundwater radon values observed from the Wushan, Pingliang, and Shilidian stations far from the epicenter and this earthquake must be further studied; however, this phenomenon is objective.

Deformation anomaly information from the observatory primarily indicates that the ground

① 收稿日期:2015-01-05

基金项目:甘肃省地震局地震科技发展基金(2014Y03);国家自然科学基金(41174059)

作者简介:杨 莉(1972—),女(汉族),工程师,主要从事地震监测等研究。E-mail: yangli@gssb.gov.cn.

通信作者:高曙德,男,副研究员,主要从事地震监测、预报等研究。E-mail: gsd_gsd@126.com.

tilt in the EW and SN directions measured at the Gaotai station, 170 km from the epicenter, decreases rapidly after April 11, 2012. The value of ground tilt in both the SN and EW directions increases abruptly from April 19 and April 24, respectively, and the amplitude reaches 100% at 11:38 a.m. on April 30 and continues until 10:07 a.m. on May 2. In the EW direction, the value decreases rapidly to the minimum value from 10:00 a.m. on May 2 to 11:39 a.m. on May 3 and then increases rapidly and recovers to the level measured on May 2, which is contrary to the trend observed in the SN direction. The ground tilt values in both the EW and SN directions reach the maximum value after 11:39 a.m. on April 3 and stay out nearly 6 hours; subsequently, Jinta, Jiuquan experienced an earthquake of $M_s5.4$ at 18:19. The increase in Dingxin-Delingha baseline shortening velocity in 2010 indicates that the northeastern Qinlian Structure Belt was squeezed and the baseline shortened by 5 mm in two and a half years before the Jinta $M_s5.4$ earthquake.

A series of abnormal variations occurred 10 days prior to the Jinta $M_s5.4$ earthquake. The short-impending anomaly primarily appeared at the stations at a distance of 200 km from the epicenter from mid-March to late April. The impending earthquake anomaly occurred primarily between April 28 and May 1. The Gaotai station recorded the ground tilt data and the complete rock stress change process during the occurrence of the Jinta, Jiuquan $M_s5.4$ earthquake, thus providing complete evolution data with earthquake development and occurrence and has significant research value for the developing a perfect seismic theoretical model and earthquake prediction.

Key words: Jinta earthquake; precursor anomaly; time-space evolution characteristics; earthquake prediction

0 引言

地震的发生既有随机性,又有必然性。目前地震界的众多学者面临的最大挑战是如何把地震预报从统计方法变为物理预测^[1]。尽管目前人类对地震的认识还很肤浅,但从地震观测所得到的资料,如地震前兆的空间分布和时间变化,应力分布、动态破裂等一系列现象中,仍能找到一些与地震孕育和发生的耦合因素。本文对 2012 年 5 月 3 日发生在甘肃酒泉金塔的 $M_s5.4$ 地震,利用甘肃前兆台网观测资料进行时空扫描,发现地下流体参量、地倾斜等在地震前 10 天内出现的一系列异常变化,以期能对地震的预测有所启发。

1 祁连山西段地区发震背景

2012 年度甘肃地震局地震趋势会商会上全面分析了祁连山西段地区的阿尔金断裂、早峡—大黄酒金塔断裂、中祁连北缘断裂、昌马断裂、疏勒南山断裂等多组全新世活动断裂的构造活动特征和发震周期,提出了该地区一年内有可能发生 5~6 级地震的中期预测意见^①。主要依据是:1900 年以来,祁连山西段中强以上地震存在一定的准周期活动特征,每个(组)地震之间一般存在 5~8 年的平静,而 2002

年玉门 5.9 级地震至今已平静 9 年;该地区存在 5 级地震背景空区、 b 值空间异常等。地震活动性跟踪分析结果显示:该地区存在持续 2 年的 4 级地震平静,自 2010 年 8 月开始沿柴达木地块及其周缘 4 级地震异常平静;也存在频度、 b 值、 C 、 D 、 η 值、缺震、小震调制比等地震活动时间参数异常和嘉峪关气氛等前兆观测异常。2011 年最新 GPS 基线长度分析、剖面计算及负位错反演显示该区存在中强以上甚至强震孕震背景。

2012 年 5 月 3 日 18 时 19 分 35 秒,在甘肃省酒泉市金塔县、内蒙古自治区阿拉善盟额济纳旗交界 (40.6°N , 98.6°E) 发生 5.4 级地震,震源深度 8 km。该地震发生在花海—金塔盆地以北的甘肃北山地区,宏观震中位于老君庙一带,极震区烈度为Ⅶ度,震中距离甘肃省地震局划定的年度地震重点危险区 70 km。地震序列为主震-余震型,震源机制解为走滑兼部分逆冲,主压应力轴方位 NNE 向,地震的发震构造位于神螺山—野马并断层^[2-4];甘肃省地震局从震中 90~900 km 敷设了测震、电磁、形变、流体学科观测台项(图 1)。根据历史地震资料分析,该

① 甘肃省地震局.2012 年度甘肃省地震局地震趋势会商报告,2012.

区属构造相对稳定的地区,现今构造活动相对较弱,主要以剥蚀为主,地震前没有明确的短临预测意见。地震后董治平等^[4]从地震构造、电磁前兆等方面作了相关的研究。本文拟从流体、形变前兆资料的变化方面对此次地震做一些探讨。

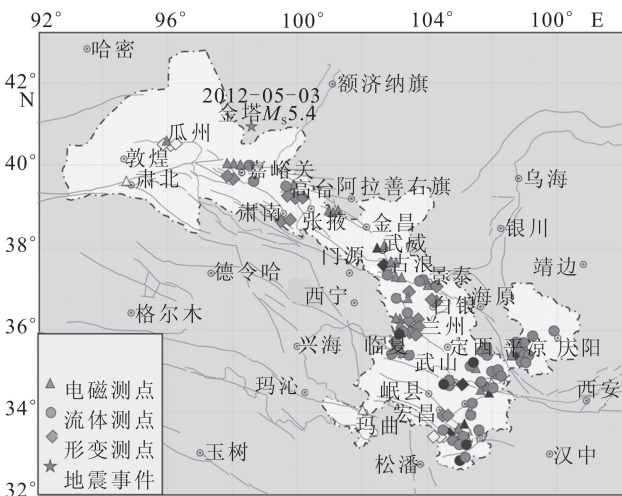


图 1 甘肃地震台网监测点与金塔震中所处位置图

Fig.1 Location of observation points of Gansu Seismic Network and the epicenter of Jinta $M_{S5.4}$ earthquake

2 前兆资料分析

对 2012 年甘肃地震局观测台站的基本情况调研、资料背景及观测日志做全面分析,剔除工程建设和有其他的干扰资料后,进行时空扫描,发现嘉峪关气氡 2011 年就存在异常变化,部分台站的气氡、水温、地倾斜等前兆手段在 2012 年 4 月下旬开始出现不同程度的短临变化,这些变化是否与酒泉金塔 5.4 级地震有关?文中做详细探讨。

2.1 氡值异常

地下流体前兆的物理力学机制主要是基于强震孕育的动力学原理,即在区域应力作用下当地壳介质受到力的作用而发生变形破坏时,赋存于介质中的流体在动力作用、热力作用和化学作用下发生的动态变化。刘耀炜等^[5]认为,中强震流体前兆主要表现在异常时间发展的阶段性、加速性和群体性等特征上;邢玉安等^[6]统计多次震例资料表明,水氡的高值异常区,即水氡的基值变化率 $R_i \geq 0.06$ 的地区是未来中强震发生区域;范雪芳等^[7]通过多次震例总结发现中强震前水氡的滑动变化率随时间而增大,在增大过程中发生地震,震后滑动变化率继续增加达到高值,最后下降恢复到低值。

2.1.1 水氡滑动变化率和基值变化率的计算方法

用水氡滑动变化率(R)可作为单点的氡值变

化、中期和短期地震异常的判定方法。其计算步骤如下:

(1) 水氡月均值的平滑滤波

取水氡月均值作为基本的数据序列。为抑制水氡的年变化和短期突变异常,突出中短期异常,可采用 13 点滑动平均法求出月均值的滑动平均值 $\bar{c}_l$:

$$\bar{c}_l = \frac{1}{13} \sum_{k=0}^{12} c_{l-k}$$

式中: c_i 为水氡月均值。

(2) 水氡滑动变化率的计算

其计算式为:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{c}_l - \bar{c}_{i-24}}{\bar{c}_{i-24}}$$

式中: $\bar{R}_i$ 为水氡滑动变化率。

(3) 水氡基值变化率的计算

水氡的基值变化率为水氡月均值的滑动平均值与基值之差再除以基值,即

$$R_i = \frac{\bar{c}_l - c_o}{c_o}$$

式中: R_i 为水氡基值变化率; c_o 为基值。

中短期异常判定中,观测值曲线打破年变形态被认为是水化学参量中短期异常的重要特征^[5]。一般通过多年曲线特征对比来分析这些破年变异常,而不能给出“破年变”的“程度”,为此引入了滑动变化率方法来定量描述这类异常,也就是用定量值来确定本年相对上年在同一月的变化程度,如果出现明显的变化差则表明破年变程度较大;变差率较小时则表明本年与上年的年动态相似。依据上述公式对嘉峪关的气氡进行计算分析。

(1) 嘉峪关气氡

嘉峪关地震台距酒泉金塔 5.4 级地震 90 km,由于该台所在地气候属温带大陆性荒漠气候,年均气温在 6.7~7.7 °C 之间,自然降水量年平均 85.3 mm/a。观测土壤溢出气氡受自然条件的干扰较小,年动态为夏高冬低。对嘉峪关 2001 年至 2012 年 5 月的气氡资料进行氡值基值变化率和滑动变化率计算绘图[图 2(a)~(d)]。2001 年以来距嘉峪关台 300 km 内共发生 5.0 级以上地震 12 次,统计发现发生在基值变化率上升阶段的地震共 10 次,下降段 2 次(表 1);从滑动变化率计算结果看出,在 2003 年至 2004 年 5 月 7 次地震中 $\bar{R} \geq 0.05$,表明在这些地震前滑动变化率变大;2008 年 3 月开始滑动变化率 $\bar{R} < 0.05$,持续到 2011 年 11 月,这几年变化率是低值变化,但该台 300 km 内只发生两次 5.0 级以上

地震,这种低值变化是否与全球远距离大震活跃有关,将另文讨论;2011 年 12 月 $\bar{R} \geq 0.05$,基值变化率曲线在上升段时发生酒泉金塔 $M_s5.4$ 地震,这说明地震发生在中期异常时段。从以上的统计结果得

到,嘉峪关气氛在基值变化率和滑动变化率增大时连续达到 6 个月,本区 300 km 范围内发生 5.0 级以上地震的可能性达 83%。

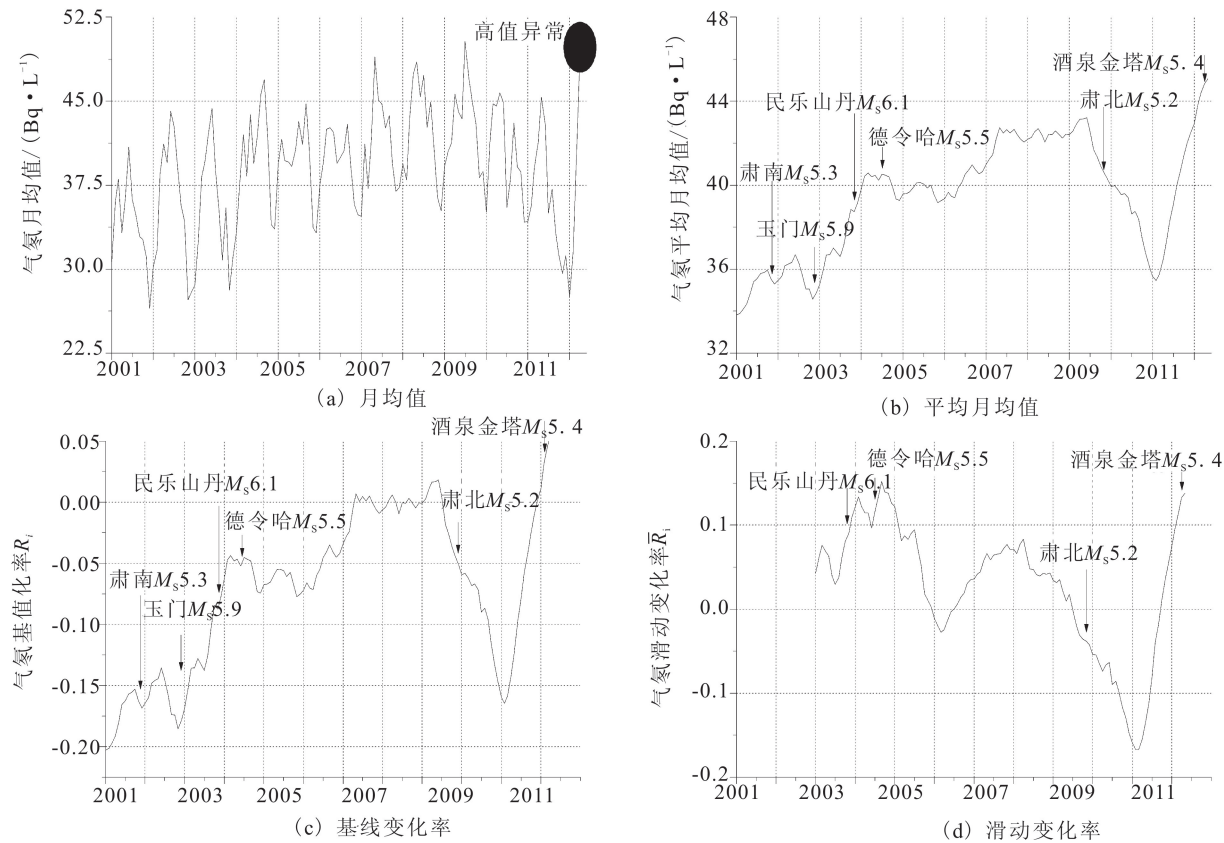


图 2 嘉峪关气氛月均值原始数据曲线和基值变化率以及滑动变化率分析曲线

Fig.2 Original data of monthly mean value of radon in groundwater and analysis curves of variation rate of base value and slide variation rate at Jiayuguan station

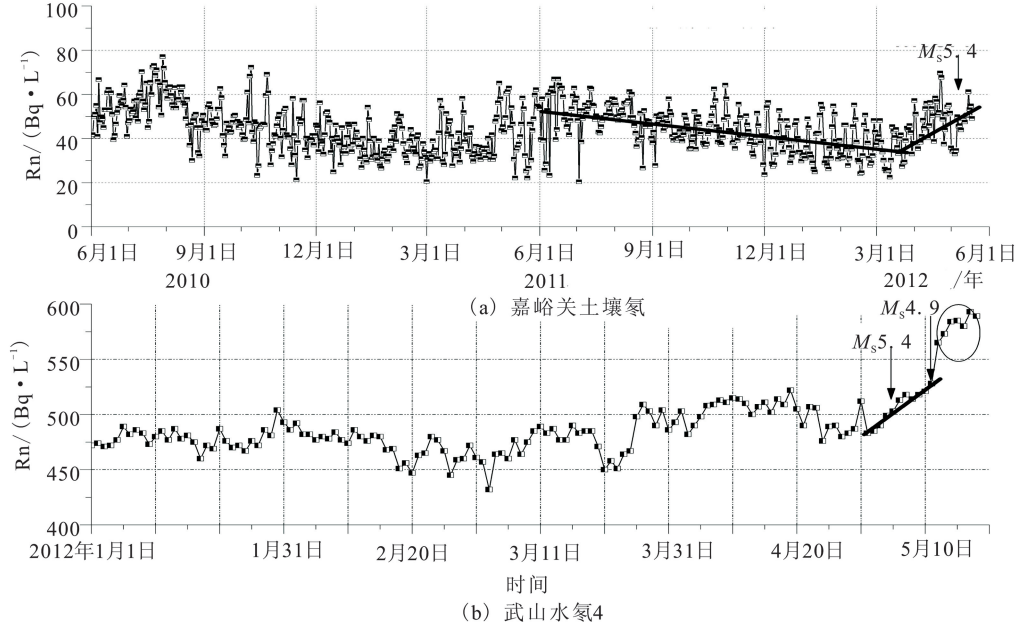


图 3 甘肃嘉峪关台和武山台氡值变化曲线

Fig.3 Change curves of the radon value at Jiayuguan and Wushan stations in Gansu Province

嘉峪关气氡短临变化:2012 年 3 月 22 日气氡值转折上升,4 月 22 日出现了 2012 年前半年最高值 70 Bq/L,5 月 1 日至 3 日测值变化相对前两天下降幅度达 37%,5 月 3 日发生 5.4 级地震后,5 月 4 日回到正常波动值[图 3(a)]。

表 1 嘉峪关气氡滑动变化率指标的超前时间表

Table 1 Leading time of the index of slide variation rate of gas radon at Jiayuguan station					基值变化率(R 上升+)(R 下降-)	指标 I ($\bar{R} \geq 0.05$) ΔT_{I} /月	指标 II ($\bar{R}_{\text{max}}$) ΔT_{II} /月	指标 III ($\bar{R} < 0.05$) ΔT_{III} /月
序号	时间	地震地点	震级/ M_s	震中距/km				
1	2001-07-11	甘肃肃南	5.3	72	-	-	-	-
2	2002-12-14	甘肃玉门	5.9	83	-	-	-	-
3	2003-04-17	青海德令哈	6.6	288	-	3	2	1
4	2003-10-25	甘肃省民乐、山丹	6.1	297	-	2	上升	3
5	2003-10-25	甘肃省民乐、山丹	5.8	290	-	2	上升	3
6	2004-02-25	青海德令哈	5.0	282	-	4	上升	-
7	2004-03-17	青海德令哈	5.2	282	+	1	上升	-
8	2004-05-04	青海德令哈	5.5	289	+	2	上升	-
9	2004-05-04	青海德令哈	5.1	291	+	2	上升	-
10	2009-10-02	甘肃肃北	5.2	197	-	-	-	17
11	2009-12-21	青海德令哈	5.0	187	-	-	-	19
12	2012-05-03	甘肃酒泉金塔	5.4	90	+	6	2	23

(2) 武山水氡

武山 1 号泉出露于近 SN 向的聂河断裂与 NW 向的蔡家河—马长庄断裂交汇部位,主要含水层为花岗岩。武山台距酒泉金塔 5.4 级地震 860 km,从图 3(b)看出,2012 年 1—4 月测值波动不大,4 月 30 日从高值点下降,5 月 1 日转折回升,5 月 11 日又快速上升,这期间发生 5 月 3 日 $M_s5.4$ (相对 30 日测值变化幅度 5.6%) 和 5 月 11 日肃南县与天祝县和

青海省门源县交界 $M_s4.9$ 地震,此后测值处于上升趋势。

(3) 兰州十里店溢出气氡

兰州十里店台距酒泉金塔 5.4 级地震 660 km。从图 4(a)看出,十里店气氡 2012 年 1 月至 3 月 4 日测值比较平稳,3 月 5 日转折测值线性上升,4 月 23 日下降,28 日转折快速上升,出现了 V 字型的变化,测值上升幅度达 17%。

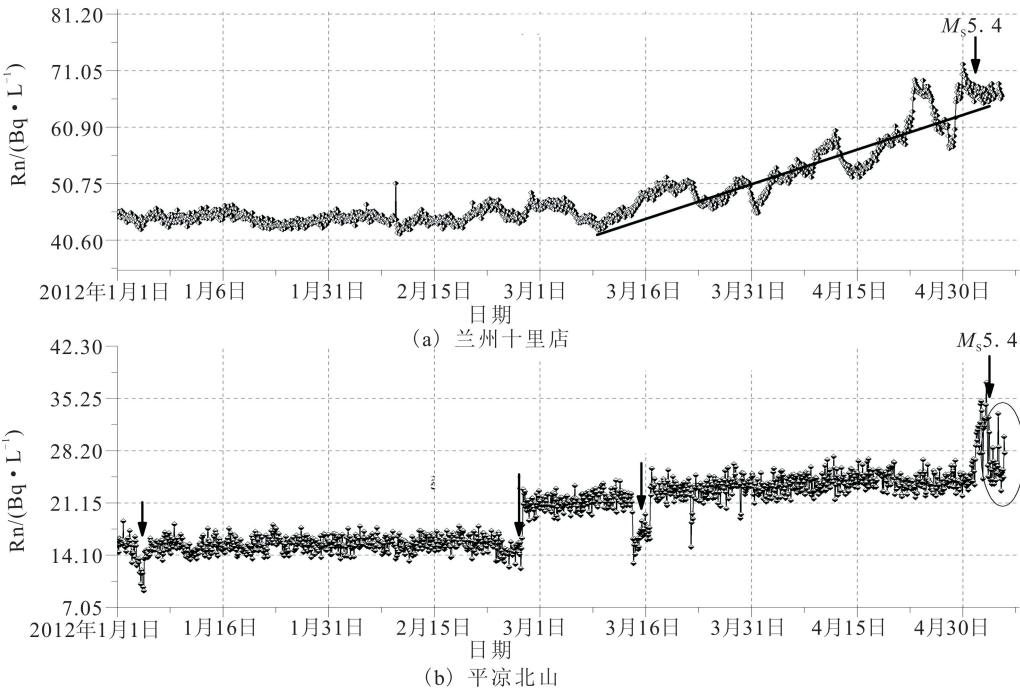


图 4 甘肃兰州十里店和平凉北山氡值变化曲线

Fig.4 Change curves of the radon value at Shilidian station in Lanzhou and Beishan station in Pingliang

(4) 平凉北山溢出气氦

平凉北山气氦台地处六盘山断裂东侧,井水出露于泾河Ⅰ级阶地上,主要含水层为砂砾岩,距酒泉金塔 5.4 级地震 910 km。从图 4(b)看出,平凉北山 2012 年 1—4 月测值有几个特殊变化:1 月 3 日气路堵塞测值下降;2 月 28 日的台阶是清理集体装置的沉淀物造成;3 月 14—16 日凹形变化是水路堵塞造成,此后测值平稳变化。5 月 1 日测值快速上升,最大变化幅度达 54%。

武山、平凉、兰州十里店观测点远离震中,氦值变化是否与这次地震有关还待商榷,但这个现象是客观的。

2.2 水位异常

地下水对上地壳中发生的各种地壳动力作用的响应具有灵敏性,其动态对地震活动与构造活动的响应十分灵敏,同时多种自然环境变化对其的影响也较大。车用太等^[8]指出地震发生之前地下水前兆异常的确认原则,提出了从成因、空间、时间和作用强度 4 项相关性原则识别干扰异常。本文从以上几个方面进行了干扰和异常排查工作。

(1) 高台水位

高台水位从 2012 年 4 月 1 日呈下降趋势,4 月 11 日苏门答腊 8.6 级地震时出现同震效应,然后转折持平,4 月 22 日测值上升了一个台阶,变幅达 0.36%,然后呈缓慢上升,变幅达 0.12%[图 5(a)]。经调查该台此时间段内周围环境正常,无大面积抽水,气象降水也比较正常,但 4 月 22 日突跳变化与本台的倾斜变化基本同步,与车用太等(2011 年)指出判定地震前兆的地下水异常可考虑其他测项或其他学科的异常相匹配变化相一致。5 月 3 日距震中 170 km 的酒泉金塔发生 5.4 级地震。

(2) 横梁水位

从图 5(b)看出横梁水位从 4 月 1 日至 4 月 8 变幅不大,9 日开始快速突跳,幅度达到 2.6%,10 日至 11 日高值变化,11 日苏门答腊 8.6 级地震时出现同震效应,12 日又上升一个台阶,13 日转折下降,4 月 28 日测值上升后转折,变幅达 1%,然后逐步下降。5 月 3 日距震中 540 km 的酒泉金塔发生 5.4 级地震。

2.3 倾斜异常

藤井阳一郎^[9]根据 30 个震列归纳了应变积累的三个阶段特征;Rundle^[10-11]阐述了借用热力学概念的热力学弹性回跳模型,认为应力变化已经积累到超过引发破裂的程度,地震并非立即发生,而是首

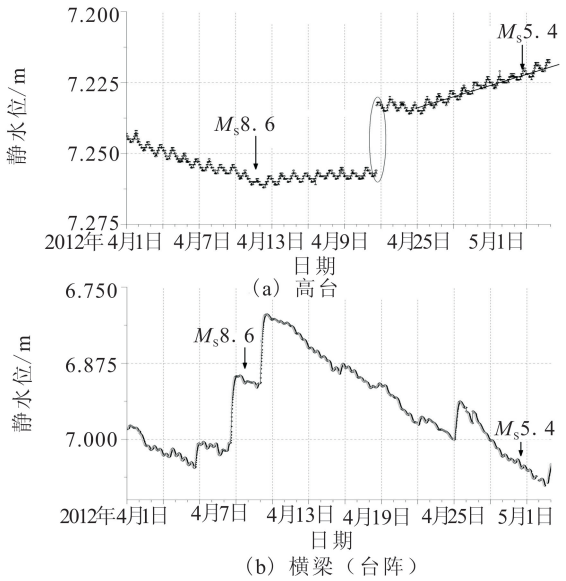


图 5 甘肃高台、横梁水位变化曲线
Fig.5 Change curves of water level at Gaotai station and Hengliang seismic array

先要度越地层位错完成后建立的新亚稳态与新稳态之间的一个势垒,因此需要一段弛豫时间。应力积累到最大,即最大规模的构造活动完成后,要经过一段弛豫时间地震才会发生。

高台倾斜观测井地表覆盖层为只有几 dm 的岩石分化层,其他都为花岗岩地层。该台敷设 CZB-2A 型竖直摆倾斜仪观测到的潮汐变化非常清楚,5 月 3 日观测到酒泉金塔 5.4 级地震前后岩石应力积累和破裂过程(图 6)。

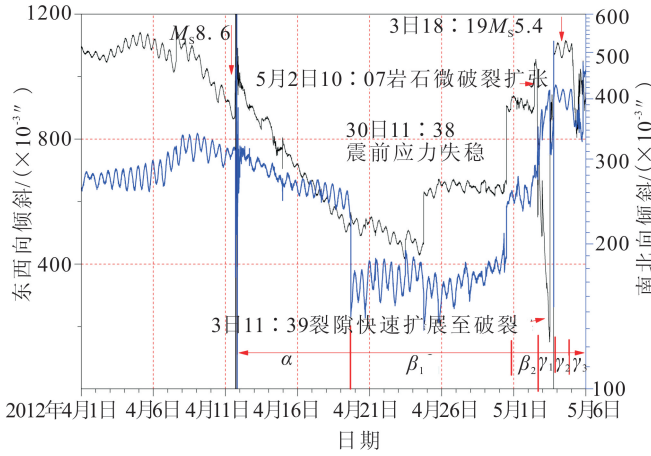


图 6 高台 CZB-2A 竖直摆倾斜仪在酒泉金塔 5.4 级地震时应变积累的三个阶段特征
Fig.6 Three stage characteristics of strain accumulation from CZB-2A vertical pendulum tiltmeter of Gaotai station before Jinta M_s 5.4 earthquake

2012 年 4 月 7 日高台倾斜仪东西向测值出现台阶式快速下降,2012 年 4 月 11 日发生苏门答腊

8.6 级地震,同震效应十分显著。4 月 11—19 日东西向、南北向测值都呈快速下降趋势,这 9 天称为应力积累 α 阶段(岩石压密过程);4 月 19 日南北向测值突跳(台阶)和 4 月 24 日东西向测值突跳(台阶),至 4 月 30 日 11:38 东西向、南北向测值突跳,其幅度达到 100%,这 12 天称为是应力的持续加压 β_1 阶段;4 月 30 日外界爆破加压南北向和东西向测值上升到高值段,持续到 5 月 2 日 10:07 两个方向开始突变,这 3 天称为失稳 β_2 阶段;5 月 2 日 10 时后东西向测值急速变小,且持续到 3 日 11:39 达到最低点,然后转折剧烈上升回到 5 月 2 日观测值水平,而南北向测值从上升突然转折下降,与东西向同步镜像变化,这 12 小时称之为震前突变 γ_1 阶段;5 月 3 日 11:39 后东西向、南北向测值都达到了最大值,持续近 6 个小时后,18:19 分发生了酒泉金塔 $M_s 5.4$ 地震,这 6 个小时本文称之为震时变化 γ_2 阶段(岩石破裂到发震弛豫时间);5 月 3 日 18:30 至 5 月 5 日为震后应力调整 γ_3 阶段。

从力学观点分析,4 月 19 日至 4 月 30 日是岩石弹性应变的过程,4 月 30 日外界加压,两个测向的变化表明观测场地岩土应力失稳进行调整;5 月 2 日 10 时岩石的微裂隙开始扩张,把这段时间看作岩石的硬化过程,此时地层东西向西倾斜,南北向向北倾斜,东西向变化幅度要大于南北向;5 月 3 日 11:39 岩土层受力达到最大,岩土层裂隙快速扩展至贯通,东西向表现为测值剧烈上升,南北向为快速下降,把这段时间看作岩石超过了弹性范围而发生脆性变形,5 月 3 日 11:40 后的近 6 个小时中岩石受力塑性变形,18:19 岩石断裂发生 $M_s 5.4$ 地震,与潘鹏志等^[12]、黄达等^[13]所做岩石加卸载试验的结论是一致的。

2.4 GPS 观测鼎新一德令哈基线变化

鼎新、德令哈 GPS 观测站位于祁连山构造带西段,鼎新一德令哈基线与祁连山构造带大致垂直。用这两个站 13 年的观测资料计算,再去除线性趋势变化后鼎新一德令哈基线变化特征,来研究祁连山构造带及周边地区的构造活动。

从图 7 中看出,1999—2001 年 7 月基线缩短,说明祁连山构造带遭受挤压,这是伴随昆仑山口西 8.1 级地震的孕育而发生的,显示了应变能的积累。在昆仑山口西 8.1 级地震前,基线在 3 个多月内出现显著的拉伸变化,幅度达到 9 mm,说明祁连山构造带产生拉张活动,在此过程中发生了昆仑山口西 8.1 级地震。地震后能量释放应力松弛,2004—

2009 年基线变化幅度相对较小,祁连山构造带未产生较大的挤压或拉张活动;2010 年以来基线缩短增强,说明祁连山构造带北东方向遭受挤压,金塔 5.4 级地震前两年半的时间内基线缩短 5 mm,发生了金塔 5.4 级地震后,祁连山构造带的挤压仍在持续,应关注该地区的震情活动。

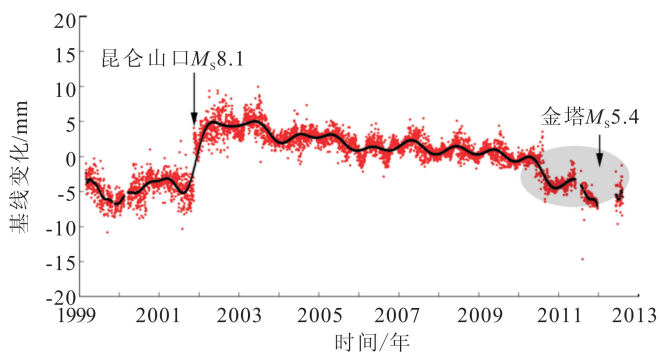


图 7 鼎新—德令哈基线去除线性趋势变化

Fig.7 Variation of Dingxin-Deleingha base line after removal of linear trend

3 结论和讨论

3.1 结论

从以上资料的分析中发现,在酒泉金塔 5.4 级地震发生前甘肃地震台网一部分前兆资料打破了正常的变化形态,从时间和空间上分析:距离震中西南方向($\Delta=90$ km)的嘉峪关土壤溢出气氦基值变化率和滑动变化率打破年变化,2011 年出现中期异常变化,2012 年 3 月 22 日出现短临异常,5 月 1 日出现临震异常;距离震中东南方向的高台($\Delta=170$ km)水位从 2012 年 4 月 22 日出现短临异常,倾斜 2012 年 4 月 19 日出现短临异常,4 月 30 日出现临震异常;震中距 $\Delta=540$ km 的横梁水位从 2012 年 4 月 13 日出现短临异常,4 月 28 日出现临震异常;兰州十里店、武山、平凉的测氦 5 月 1 日同步变化。异常特征:短临异常主要出现在距震中 200 km 范围的台站,时间是 3 月中旬和 4 月下旬;临震异常集中出现在 4 月 28 日至 5 月 1 日,距离台站较近的高台钻孔倾斜变幅最大。

可以得到:

(1) 金塔 5.4 级地震前,祁连山构造带西段受到长时间抵压,鼎新一德令哈基线在两年半的时间内缩短 5 mm,出现长趋势异常。

(2) 嘉峪关气氦在金塔 5.4 级地震前出现了中期异常变化,甘肃台网的部分流体测项震前 5 天出现了丛集变化。

(3) 高台倾斜仪完整地记录下这次地震孕育、发展、发生的动力力学过程。

3.2 讨论

通过 2000 年以来发生在距嘉峪关气氛测点 300 km 范围的 5.0 级以上地震分析,气氛的基值变化率上升段发生地震比较多,而在下降段则较少;高台倾斜仪完整记录酒泉金塔 $M_s 5.4$ 地震发生过程中岩土石受力变化的全部过程,不仅提供了地震孕育和发生的完整资料和 GPS 基线伸长和缩短对发生地震时间、位置研究提供佐证,对完善地震理论模型和从统计预测向物理预测也有重要的研究价值。地震监测部门选择有优势的观测手段,合理敷设在地质构造带敏感部位上,对地震的监测和预测是有积极意义的。

致谢:感谢审稿人提出指导性意见和建议及甘肃省地震局预报中心马海萍提供 GPS 数据,本文使用的前兆数据来自甘肃省地震局台网中心。

参考文献(References)

- [1] 许绍燮.地震存在“时空关联”《中国科学报》(2012-04-14 A1 要闻), (科学网)
<http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2012/4/256772.shtml>
- [2] 张津,郭安宁,雷中生.甘宁陕明代新增的十次中强历史地震[J].地震工程学报,2014,36(1):144-152.
ZHANG Jin, GUO An ning, LEI Zhong-sheng. Ten New Added Moderate Strong Historical Earthquakes Occured in Ming Dynasty in Gansu, Shaanxi and Ningxia Provinces [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36 (1): 144-152. (in Chinese)
- [3] 雷中生,袁道阳,郑文俊,等.756 年张掖—酒泉地震考[J].西北地震学报,2012,34(1):72-77.
LEI Zhong-sheng, YUAN Dao-yang, ZHENG Wen-jun, et al. Textural Research of Zhangye—Jiuquan Earthquake in 756 A. D. [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 72-77. (in Chinese)
- [4] 董治平,程建武,钟美娇,等.2012 年 5 月 3 日甘肃省金塔县 $M_s 5.4$ 地震[J].内陆地震,2014,28(4):291-297.
DONG Zhi-ping, CHENG Jian-wu, ZHONG Mei-jiao, et al. Jin-ta Earthquake with $M_s 5.4$ in Gansu on May 3rd, 2012 [J]. In-land Earthquake, 2014, 28(4): 291-297. (in Chinese)
- [5] 刘耀炜,施锦.强震地下流体前兆信息特征[J].地震学报,

2000, 22(1): 102-107.

- LIU Yao-wei, SHI Jin. Information Characteristics of Ground Fluid Precursors of Strong Continental Earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22(1): 102-107. (in Chinese)
- [6] 邢玉安,王吉易.水氢动态图强震危险区预测的新方法[J].地震,2000,20(4):1-6.
XING Yu-an, WANG Ji-yi. The New Method of Prediction for the Earthquake Risk Area with Evolutionary Diagrams of Radon in Ground Water [J]. Earthquake, 2000, 20(4): 1-6. (in Chinese)
- [7] 范雪芳,张淑亮,王吉易.水氢滑动变化率法对发震时间的预测检验[J].山西地震,2006,125(1):22-28.
FAN Xue-fang, ZHANG Shu-liang, WANG Ji-yi. Test for Prediction of Time of Earthquakes Occurrence by Using Slide Variation Rate Method to Radon in Groundwater [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2006, 125(1): 22-28. (in Chinese)
- [8] 车用太,鱼金子,刘成龙,等.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,2011,33(6):800-808.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi, LIU Cheng-long, et al. Principles on Distinguishing Interference from Seismic Precursor of Underground Water Variation and Its Application [J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(6): 800-808. (in Chinese)
- [9] 国家地震局科技监测司.地震地形变观测技术[M].北京:地震出版社,1995.
Scientific and Technological Monitor Department of CEA. Seismic Ground-deformation Observational Technology [M]. Beijing: Seismological Press, 1995. (in Chinese)
- [10] Rundle J B. A Physical Model for Earthquakes; 2. Application to Southern California [J]. J Geophys Res, 1988, 93 (B6): 6255-6274.
- [11] Rundle J B. A Physical Model for Earthquakes; 3. Thermodynamical Approach and Its Relation to Neoclassical Theories of Nucleation [J]. J Geophys Res, 1989, 94 (B3): 2839-2855.
- [12] 潘鹏志,冯夏庭,申林方,等.裂隙花岗岩各向异性蠕变特性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(1):36-44.
PAN Peng-zhi, FENG Xia-ting, SHEN Lin-fang, et al. Study of Anisotropic Creep Behavior of Fractured Granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (1): 36-44. (in Chinese)
- [13] 黄达,黄润秋,张永兴.三轴加卸载下花岗岩脆性破坏及应力跌落规律[J].土木建筑与环境工程,2011,33(2):1-6.
HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Characteristics of Brittle Failure and Stress Drop Under Triaxial Loading and Unloading [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2): 1-6. (in Chinese).