

岷县漳县6.6级地震前天水花牛水氡异常 可靠性研究

曹玲玲¹, 王宗礼², 李春燕¹

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 西部环境与气候变化研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 2013年岷县漳县6.6级地震前甘肃天水花牛的水氡出现了与汶川8.0级地震极为相似的异常变化并在震前已被重点跟踪。为了对花牛水氡2013年出现的异常与岷县漳县地震的关系给出合理的判断, 本文分析了花牛水氡正常的趋势背景和年变化形态, 给出了正常背景和异常变化的判别指标; 分析了花牛水氡的主要影响因素, 认为气温是花牛水氡出现年变的主要因素, 日降雨量达到一定量级才能引起水氡的短暂变化; 着重从水氡测值的可靠性、影响因素的不一致性、多学科前兆变化的协调性、异常的重现性、异常与岷县地震的时空相关性等方面对2013年4月以来的异常进行了详细的分析和论证。研究结果可以判定, 2013年4月以来天水花牛水氡出现的异常作为岷县漳县6.6级地震的异常是可信并可靠的。

关键词: 天水花牛泉; 水氡; 岷县漳县M_{6.6}地震; 异常; 可靠性

中图分类号: P315.724 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)04-800-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.800

Reliability Study on Water Radon Concentration Anomaly of Huanui Spring in Tianshui before Minxian-Zhangxian M_{6.6} Earthquake

CAO Ling-ling¹, WANG Zong-li², LI Chun-yan¹

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

2. Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Since April 2013, the water radon concentration of Huanui Spring has shown abnormal changes that are very similar to the precursory anomaly of the Wenchuan M_{8.0} earthquake. From the beginning, it was tracked as important anomaly. Although this change began three months prior to the Minxian - Zhangxian M_{6.6} earthquake, we could not conclude that it was a precursor to this earthquake. Further research is needed to determine a reasonable relationship between the anomaly of water radon concentration and the Minxian - Zhangxian M_{6.6} earthquake. In the present study, we analyze the tendency of annual changes in radon concentration of Huanui Spring, Tianshui, China, which began in April 2013 and terminated after the Minxian - Zhangxian M_{6.6} earthquake. The results show a decline tendency with a fixed rate. The annual change is high in summer and low in winter, and the radon concentration is higher than that recorded during the corresponding period of the previous year. In addition, we analyze the main factors that influence the radon concentration,

收稿日期: 2013-09-02

基金项目: 甘肃省地震局地震科技发展基金(2013M04).

作者简介: 曹玲玲(1972-), 女, 硕士, 从事地下流体预报地震研究. E-mail: caoll@gssb.gov.cn

通讯作者: 王宗礼(1974-), 男, 硕士. E-mail: zlwang@lzu.edu.cn

and we determine that the annual change is caused by atmospheric temperature. Abnormal changes in radon concentration occur when the rainfall reaches a particular value; however, the duration is short. Analysis of the reliability of the radon concentration anomaly indicates that although the result is shown to be dependable, it is not consistent with the influencing factors. Moreover, we analyze the relationship of the radon concentration in Huaniu Spring and the earth resistivity and water temperature in Tianshui. The results show that their anomalies began at the same time; however, their change directions differed. The water temperature and earth resistivity showed high anomalies, and the radon concentration anomaly was low. We also analyze the reproducibility of the radon concentration anomaly. The anomaly characteristics of the radon concentration beginning in April 2013 were very similar to the precursory anomaly of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. Finally, we examine the temporal and spatial relationship between the radon concentration anomaly and the Minxian - Zhangxian earthquake. We conclude that the radon concentration anomaly of Huaniu Spring beginning in April 2013 is a credible and reliable precursory anomaly of the Minxian - Zhangxian $M_s6.6$ earthquake.

Key words: Huaniu Spring of Tianshui; water radon concentration; Minxian - Zhangxian earthquake; anomaly; reliability

0 引言

氡作为地下流体映震的灵敏组分,是地震科学研究中观测时间最长,研究最广泛的地下流体测项之一^[1]。从已经出版的《中国震例》^[2-4]可以看出,在中强以上地震以前,只要震中距一定范围内有氡测点分布,通常就会有氡异常出现,表明氡的映震效果比较好。许多地震学者通过对震例的分析提取出了一系列地震预报指标^[5-8]。但一个不争的事实是大多公开发表且被人们广泛使用的异常大多是震后总结出来的,即以震找异常,只要满足时间和空间关系的异常变化都归结为地震异常。还有一个不可忽略的事实是数据产出者和数据使用的脱节导致使用者对明确干扰造成的数据变化无法掌握,导致误将干扰当作地震异常。这些已被地震学者认识到,因此地震异常信度的研究越来越被人们重视。如邱泽华等^[9]对汶川地震前姑咱应变的异常变化进行了深入分析,钱家栋等^[10]对汶川地震前成都地电阻率异常进行了全时段分析,等等^[11]。但即便这样,当遇到对对来地震发生的三要素进行判定时仍然显得束手无策。出现这种情况的主要原因是地震前兆的复杂性,表现为不仅不同测点对同一地震的异常存在着差别,而且同一测点对不同部位或不同震级的前兆异常重现性也很低。因此,结合震例对每个测点异常进行深入细致的分析和论证是非常必要的。

甘东南流体观测以来(1984年以来),岷县漳县6.6级地震是发生在甘东南的唯一一次6级以上地震^[12],这为甘东南地区水氡异常的深入分析提供了条件。本文选取距离震中较近(150 km)且震前出现明显变化的天水花牛水氡为研究对象,深入分析这次异常变化与6.6级地震的关

系。

1 天水花牛泉测点概况

天水花牛水氡位于天水市麦积区花牛镇,处于西秦岭北缘断裂带南侧,为冷水下降泉。主要含水层为黄土层孔隙裂隙,由大气降水补给。降水沿黄土层中的孔隙裂隙下渗,汇集于泥岩顶部,因冲沟侵蚀下切,在沟底低洼处沿接触面溢出地表^[13]。

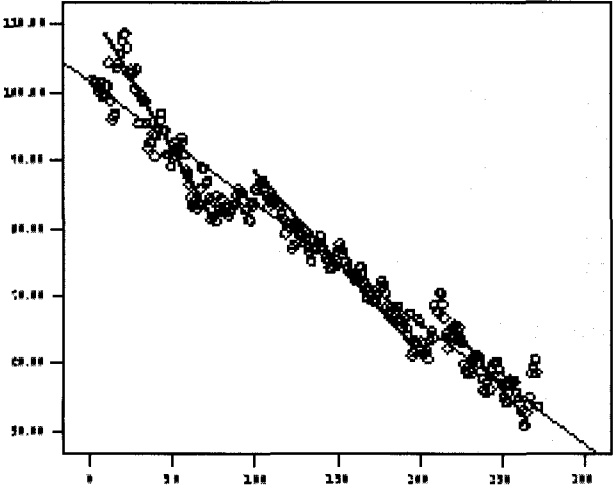
2 天水花牛水氡正常动态特征

水氡测值正常背景的确定是识别异常的前提。这里对花牛水氡观测以来的数据做月均值处理,然后分析其随时间变化的正常长期动态和年变动态特征。

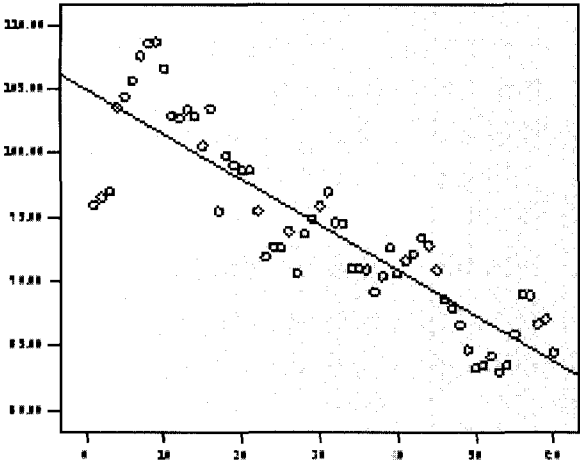
2.1 长期动态特征

从花牛水氡观测以来月均值时间序列变化图来看(图1),总趋势呈下降变化,并且具有很好的线性特征。对变化趋势进行数学拟合得出拟合函数为 $y = -0.178t + 101.5$ (图1(a))。但从阶段性变化来看,下降过程可分为三个不连续的阶段:1992年-1996年为第一下降阶段,其趋势拟合函数为 $y = -0.353t + 105$ (图1(b)),1997年出现第一个原有下降过程不连续的拐点;2000年-2007年为第二个下降阶段,其趋势拟合函数为 $y = -0.214t + 83.8$ (图1(c)),2008年出现第二个下降过程不连续的拐点;2009年-2012年为第三个下降阶段,其趋势拟合函数为 $y = -0.228t + 64.5$ (图1(d)),2013年出现第三个下降过程不连续的拐点。从三段的拟合函数系数来看,三段的下降速率不同,说明拐点不仅改变了下降的连续性,也改变原有的下降速率。对比整个观测时段与地震的

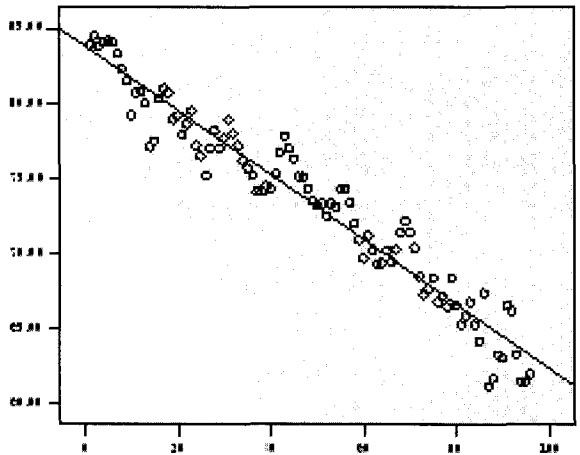
关系(图2)可以看出,第一和第三时段,甘东南没有5级及以上地震发生。第二个时段虽然有三次5级以上地震,但震级都不大,最大的才5.2级,其它两次为5级,并且测点距离这些地震都接近200 km,因此这三次地震都没有引起曲线趋势下降速率的变化。



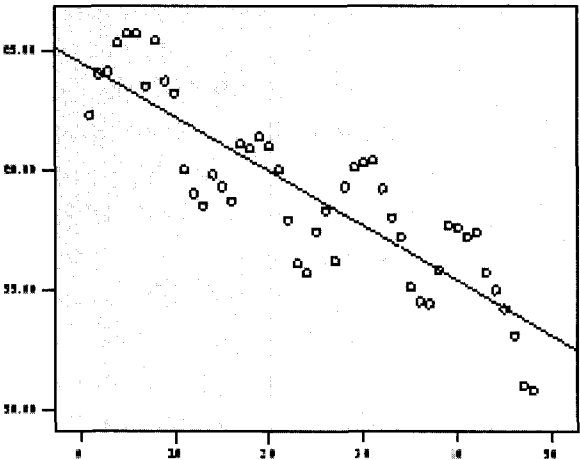
(a) 1991-2013年



(b) 1992-1996年



(c) 2000-2007年



(d) 2009-2012年

图1 天水花牛水氡观测以来以及三个下降阶段月均值趋势拟合曲线图

Fig.1 The fitting curves of water radon at well in Tianshui in Huanui three different stages and whole observing period

综合以上分析可以判断,一次持续几年的速率没有明显改变的下降过程为花牛水氡的正常变化动态。

2.2 正常年变动态

从图2可以看出花牛水氡具有年变形态,特别2008年以来年变形态更加清晰可辨。2008年之前虽然有些年份年变不是十分完整,但大多年份仍可分辨出,它们呈夏高冬低型,最低值一般出现在12或1月,最高值出现在6月或7月,年变幅度通常为3~4 Bq/L。根据有震年份和无震年份的年变形态的对比可以判断,花牛水氡的正常年变形态为年变幅度在3~4 Bq/L的夏高冬低型。

综合以上既可以给出花牛水氡的正常变化动态,同时可以给出花牛水氡的异常判断指标:形态上为趋势下降速率改变的拐点,数值上为测值高于上一年的同期测值,当月测值高于年初最低点4 Bq/L以上甚至达到正常水平的两倍。

3 天水花牛水氡的主要影响因素

对于水温变化不大的水氡测点,长期存在的可能影响因素主要是气温和降雨。由于本文主要分析2013年异常与地震的关系,因此只选择分析第三个趋势下降时段,即2009-2012年气温降雨对水氡的影响。

(1) 温度对水氡的影响

2009年-2012年,水氡的年变非常清晰(图2),并且年变形态与气温的年变形态相近。分别计算这四年水氡月均值与气温月均值的相关系数,结果依次为0.717、0.800、0.735,2012年因为年变峰值出现偏早导致水氡与气温不具相关性。由此可以看出,水氡的正常年变主要是气

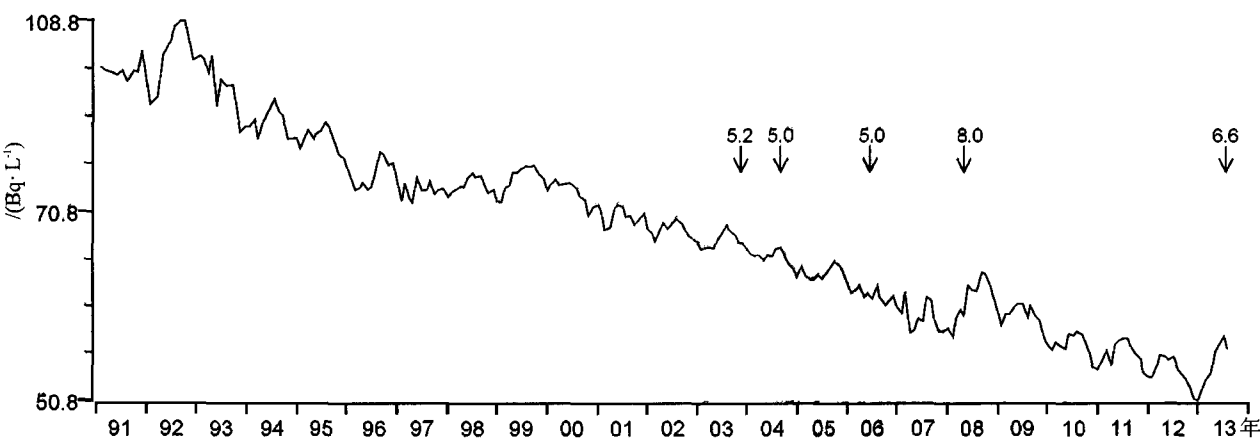


图2 花牛水氡月均值曲线图
Fig.2 The monthly average curve of water radon at Huanui

温的变化引起的。

(2) 降雨对水氡的影响

降雨对水氡的影响主要分为渗入混合引起氡值的变化和降雨产生附加应力场引起氡值的变化。降雨如果渗入到泉水中,通常氡值会出现下降,而降雨入渗到泉水首先会出现泉水流量的增大,因此可根据流量有无变化来判断降雨是通过何种方式引起水氡测值的变化。

降雨是一种季节性的影响因素,如果降雨对泉水流量影响明显,则流量会出现年变现象。但通过对花牛流量的分析发现它根本不存在年变,这表明降雨对流量不会造成趋势性的影响。那是否存在降雨引起流量短时间

内的变化呢? 由于汶川地震造成花牛泉流量的大幅上升直至2009年底才接近恢复正常,对2010到2012年每次降雨当天和次日流量的变化进行了全时段扫描,结果显示当降日降雨量达到30 mm以上时会造成泉水流量的上升,当日降雨量达到40 mm以上时水氡同期会出现下降,但幅度不大,并会很快恢复(图3)。没有引起流量变化的降雨对水氡几乎没什么明显的影响。

可以看出,降雨对花牛水氡的影响主要是降雨入渗并与泉水混合引起的,降雨对水氡的趋势变化影响不明显,大的降雨会引起水氡短期的下降,但会很快恢复。

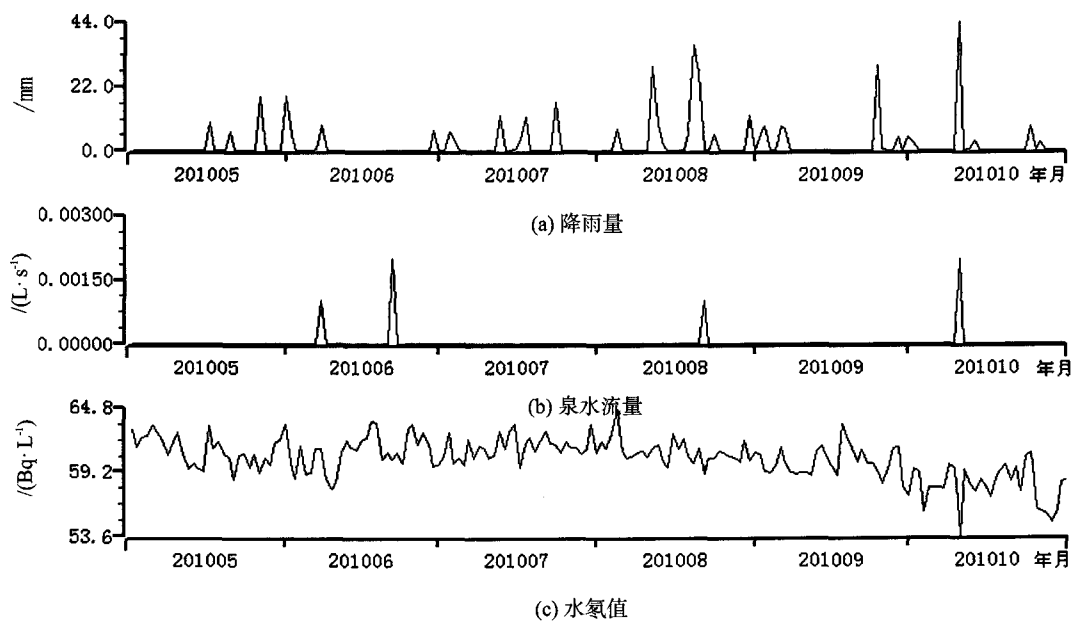


图3 天水花牛水氡、降雨及泉水流量日值对比图(2010-2012)
Fig.3 The comparison of water radon,dayly rainfall and water flux(2010-2012)

4 岷县6.6地震前花牛水氡异常的可靠性判断

天水花牛水氡2013年出现了动态趋势下降速率改变的拐点,4月份开始测值超过2012年同期水平,达到异常标准,地震前一个月在变化相对平稳的背景下又出现了高值异常直至地震发生。

4.1 测值的可靠性

天水花牛水氡为国家级专业台站,至今已有20多年的观测资料。观测方式一直是在取样点用扩散瓶取样,然后在实验室用FD-125观测仪进行观测,为人工观测,每日一次。这种测氡方式原理清楚,技术成熟。观测人员都为专业人员,并且人员稳定。2013年对闪烁室如期进行了标定,原闪烁室仍可用。启用新 K 值后,测值并没有出现台阶式变化,衔接平稳。出现异常变化后多次对观测仪器进行了检查,仪器没有故障。测点周围环境也进行过多次排查,环境并没有改变。因此测值的变化是真实可靠的。

4.2 异常变化与环境干扰的不一致性

花牛水氡年变化的主要影响因素是气温,气温升高,氡值升高。从图1可以看出2013年4月花牛水氡开始快速上升。通过对2010—2013年4—7月的月平均气温的对比可以看出(表1),4月份的气温,2013年比2011年和2012年低接近3度,5月份也是四年中最低的,6月份均值高于往年,但与2011年差别不大,7月份也是四年中最低的。由此可以看出,2013年4月以来在气温低于往年的前提下水氡测值不降反升。

表1 2010—2013年4—7月天水气温月均值平均值

Table1 The monthly average air temperatures in Tianshui from April to July in 2012—2013

月份	月均气温值/℃			
	2010年	2011年	2012年	2013年
4月	4.56	8.9	8.03	5.67
5月	14.22	13.4	13.3	12.7
6月	13.3	16.96	15.76	17.3
7月	19.5	18.99	18.56	18.4

2013年6月22日水氡测值在相对平稳变化的背景下出现了高值异常。分析了6月份以来气温日值的变化,发现6月20日—29日气温不仅不是升高,反而是下降恢复的过程,特别是7月9日以来气温反而比6月份还低,但测值一直在高值波动。由此可以判断6月22日至地震发生阶段水氡测值的高值不是气温的变化引起的。

根据本文前述分析的降雨对氡的影响结果,在日降雨量达到40 mm时会引起氡值短时间的下降变化。2013年6月以来降雨比以往几年同期都要频繁且雨量大,单日降雨量达到40 mm以上的就有3次(2010—2012年三年内

总共才出现4次),并且单日雨量也是四年来最大的。最大降雨量出现在6月20日,达到了114 mm,这次大的降雨后水氡的测值不但没有出现大幅的下降(下降6.7%,为数据正常的波动范围),22日反而出现了较大幅度的上升。

综合以上的分析,2013年4月测值的趋势上升和6月22日开始的快速上升与正常的气温降雨影响正好相反,与环境干扰不一致。因此这段时间氡值的变化可以排除气温降雨等干扰的引起。

4.3 异常协调性关系

岷县漳县6.6级地震前,天水除没有可利用的形变资料外,地电阻率和水位水温台项都有数据产出。这里选取数据连续可靠的天水中心地震台的深井电阻率和水温变化与水氡的变化进行对比分析。由于水温和电阻率观测时间都比较短,对它们的趋势正常背景无法判断,因此无法研究三个测项趋势异常的协调性变化。这里仅分析它们短临异常变化的协调性特征。

从它们的日均值(水氡为日值)(图4)可以清楚的看出,天水地电阻率北南向测道(其它测道也出现了同样的变化,这里只选择其中一道)在持续一个多月的高值平稳变化后6月20日出现了快速下降变化,之后平稳波动,期间发生了岷县漳县6.6级地震。天水水温从2013年以来的变化来看,除2月份的高值过程外,总体成波动上升趋势,但6月22日开始趋势转折明显,成下降变化状态,并在下降过程中发生了地震。花牛水氡4月15日以后,测值在平稳缓升的背景下,6月22日开始出现台阶式的高值变化过程,并在高值过程中发生了地震。综合这三个测项的变化可以发现,它们都出现了短临异常,并且在时间上具有很好的同步性。

4.4 异常特征的重现性

花牛水氡正常的趋势变化动态是按一定的速率下降,并且测值低于上一年同期水平。

从图1和图2可以看出2008年和2013年都是氡值趋势速率改变的拐点。图5显示了2001年以来花牛水氡的年变幅度(2008年为5月份和1月份的差值),从图可以清楚的看到,大多年份的年变幅在3~4 Bq/L之间。2008年虽然最高值出现在7月份,但2月份的测值已经高于2007年3月份的测值,5月时氡值已经高于2007年的最高值,幅度高达8 Bq/L,满足了异常的判定条件,之后发生了汶川8.0级地震。由于汶川地震发生在5月12日,5月均值高值是否是地震震后效应造成的?为此计算了5月1日到12日的均值和5月全月的均值,计算结果为前者为69.48 Bq/L,后者为68.61 Bq/L,震前12天的均值明显高于全月均值,因此5月的高值出现在震前。2013年4月份的

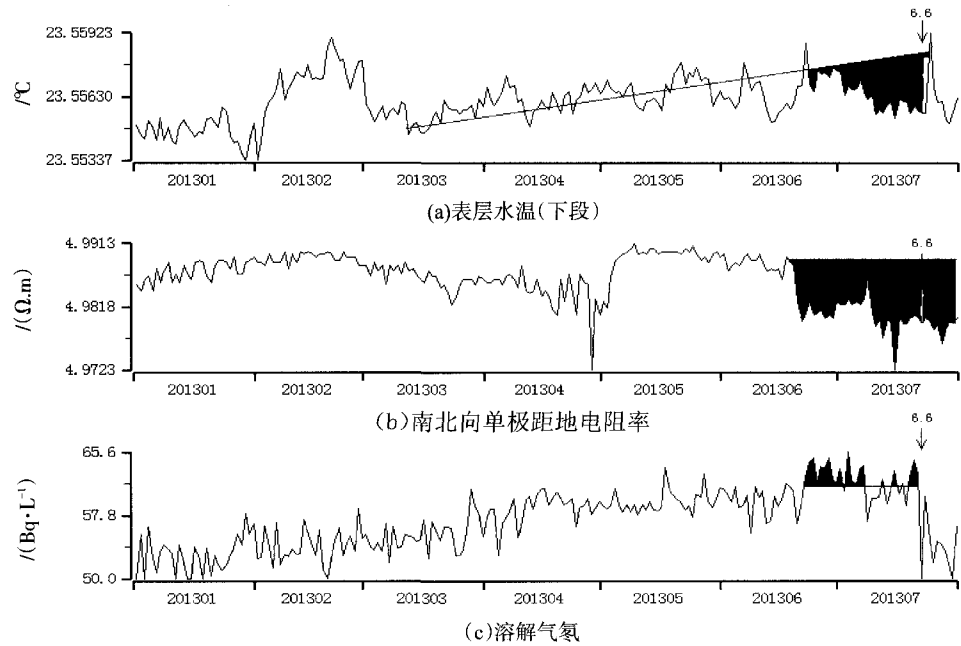


图4 多学科前兆异常对比

Fig. 4 Comparison among the precursor anomalies in Some observing Subjects in Tianshui

氡值高于2012年同期水平,并且年变幅达到7.8 Bq/L,为2012年的2.4倍,同样满足异常判定的条件,之后发生了岷县漳县6.6级地震。由此可以看出花牛水氡在这两次地震震前3个月的短期异常重现性很好。

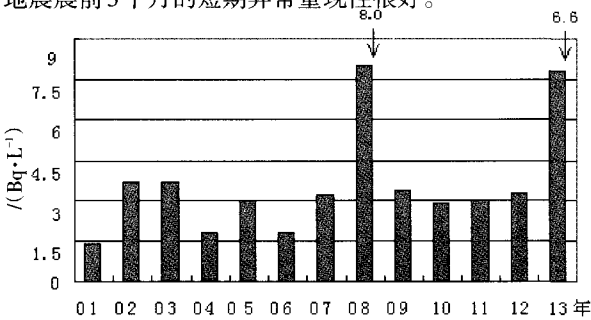


图5 花牛水氡月均值年变幅

Fig. 5 The yearly variation ranges of water radon in Huaniu

4.5 2013年花牛水氡异常与岷县地震的相关性

(1) 空间的相关性

花牛水氡测点位于西秦岭北缘断裂带南侧,岷县漳县地震震中位于临潭宕昌断裂北侧,它们都位于西秦岭构造带内,具有相同的构造背景(图6),根据中国地震局地壳应力所的研究结果,岷县漳县地震周边区域构造应力场水平最大主应力优势分布方位为近东西向^[14],结合发震的断层面解反映的最大主应力轴方位为近东西向(中国地震局地壳应力所网站),这与花牛水氡和震源的方位关系极为接近。花牛测点距离岷县地震震中160 km左右,根据《中国震例》异常范围的统计标准,6级地震异

常范围300 km计算,测点在异常范围内且距离震中较近。因此花牛水氡的异常与地震的孕育不仅具有构造相同的背景,并且在距离上符合孕震的影响范围,它们在空间上是具有相关性。

(2) 时间上的相关性

震前2013年4月氡值超过2012年同期的测值,根据花牛水氡异常的判定指标可以判定异常的出现时间为4月份,距离岷县6.6级地震发生3个月,因此满足3个月短期异常的条件。6月22日氡值在平稳上升的背景下出现了阶跃式高值变化,这在时间上距离地震发生一个月,满足短临异常的条件,在变化特征上也符合短临异常的特征。

震后7月22日地震发生的当天,测值出现了大幅的下降变化,这个测值的取样几乎在地震发生的同时,并且7月21日的暴雨为当地造成了严重的自然灾害,也使花牛泉上方的土涯充满雨水,并局部出现裂缝,因此21日单点的低值与降雨的关系比较大。之后测值一直在较低部位波动。但对降雨引起花牛水氡变化的分析结果可以判断,降雨对水氡的影响持续时间比较短,并且会很快恢复。因此7月23日以来测值经过较小幅度的恢复后的波动变化不是降雨所致。通过与前后一年总共3年都没有地震发生的2011测值年相比(图6),可以判断7月23日以来的测值已恢复到正常变化水平。

由此可见,在时间变化上异常的出现与岷县漳县地震孕育的阶段性具有很好的配套性,特别地震发生后异

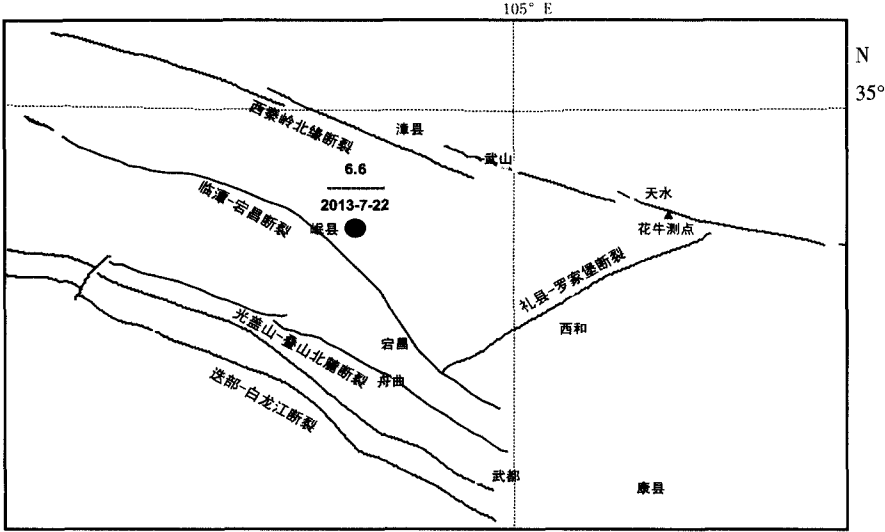


图6 岷县漳县6.6级地震和花牛水氡测点构造背景图

Fig.6 The structural map of Minxian-Zhangxian $M_{6.6}$ Earthquake and observation of water radon at Huaniu

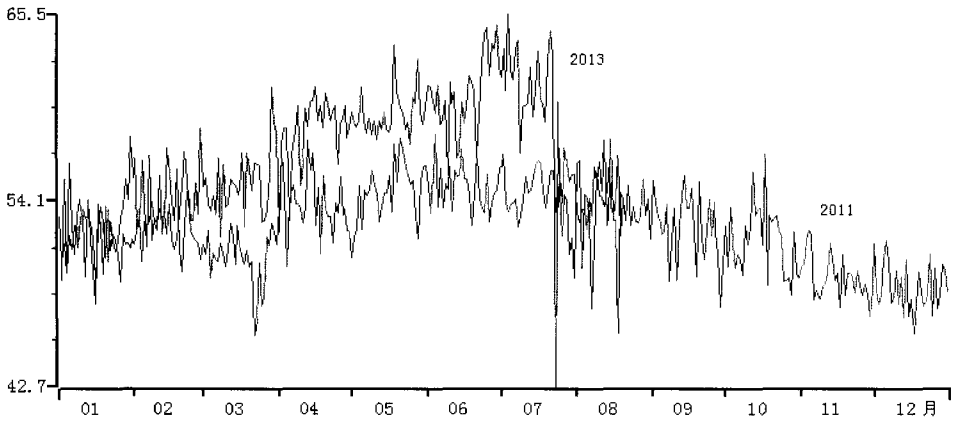


图7 天水花牛水氡2013年和2011年日值对比图

Fig.7 Comparison of daily value of water radon between 2013 and 2011

常已经结束,测值目前趋于正常水平。因此异常与地震在时间演化上具有很好的相关性。

综合以上五个方面的分析,可以判断花牛水氡2013年4月以来的加速上升变化作为岷县漳县6.6级地震的短期异常,6月22日以来的高值过程作为该次地震的短临异常是可信并且可靠的。

4 结论与讨论

通过以上分析可以得出如下结论:

(1) 天水花牛水氡长期正常动态背景为按一定速率成直线状态下降,正常年变是年变幅为3~4 Bq/L的夏高冬低型年变。

(2) 天水花牛水氡的异常在形态上表现为趋势下降速率改变或下降过程中断的拐点,测值上表现为测值高

于上一年的同期测值,地震通常发生在月氡值高于年初最低点4 Bq/L以上甚至达到正常水平的两倍的时候或以后很短时间。

(3) 气温是花牛水氡出现年变形态的主导因素。当日降雨达到40 mm以上,会造成流量和水氡的变化,但影响幅度不显著,并且影响时间较短,会很快恢复。

(4) 2013年4月开始天水花牛水氡的快速上升作为岷县漳县地震的短期异常,6月22日以来的高值过程作为岷县漳县地震的短临异常是可信并且可靠的。需要说明是这次异常过程在4月份一出现就引起了关注,并多次进行了电话落实,6月22日以来的高值也多次进行了电话落实,但由于这种变化仅有汶川8.0级地震一次震例,因此震前对预期的地震并没有给出预测。

需要讨论的是虽然岷县漳县6.6级地震前天水花牛

水氡的异常与汶川地震前的异常重现性非常好,但从整个曲线的变化来看(图2),这种趋势速率改变的拐点不只出现这两次,1997年为第一次出现,可这期间花牛水氡泉周围300 km范围并没有6级及以上地震发生。但这与结论并不矛盾,因为1997年仅满足下降趋势中断和趋势速率改变的拐点,但一个至关重要的条件没有出现,即测值的大幅升高并且高过1996年的同期测值。但这次变化与后两次变化还是有很大的区别的,首先,1997年虽然趋势下降速率发生了改变,但高值并没有超过1996年。其次1998年和1999年成转平变化,并没有按一定的斜率成下降趋势。因此,单纯从拐点的出现还无法判断是否是地震异常,测值高于上一年同期是必不可少的条件。

当然以上的判断结果仅有两个震例出现,对其可靠性的判断还需要进一步的机理分析和震例验证。

致谢:在本次研究的地质构造方面得到了董志平研究员的悉心指导,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- [1] 刘耀伟,任宏微.汶川8.0级地震氡观测值震后效应特征初步分析[J].地震,2009,29(1):121-131.
LIU Yao-wei, REN Hong-wei. Preliminary Analysis of the Characteristics of Post-seismic Effect of Radon after the Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Earthquake, 2009, 29(1): 121-131. (in Chinese)
- [2] 陈棋福.中国震例(1995-1996)[M].北京:地震出版社,2003.
CHEN Qi-fu. Earthquake Cases in China(1997-1999)[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 陈棋福.中国震例(1997-1999)[M].北京:地震出版社,2003.
CHEN Qi-fu. Earthquake Cases in China(1995-1996)[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 陈棋福.中国震例(2000-2002)[M].北京:地震出版社,2008.
CHEN Qi-fu. Earthquake Cases in China(2000-2002)[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 刘耀伟,施锦.强震地修流体前兆信息特征[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] 范雪芳,王吉易,陆明勇.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,2009,29(1):132-130.
FAN Xue-fang, WANG Ji-yi, LU Ming-yong. Preliminary Study on Some Typical Medium-term Subsurface Fluid Anomalies before the Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Earthquake, 2009, 29(1): 132-130. (in Chinese)
- [7] 杨明波,王吉易,刘喜兰,等.北京及邻近地区中等以上地震地下流体异常识别与特征研究[J].地震,2006, 26(3):53-63.
YANG Ming-bo, WANG Ji-yi, LIU Xi-lan, et al. Study on Recognition of Fluid Anomaly and its Characteristics for Moderately Strong Earthquakes in Beijing Region and its Adjacent Area[J]. Earthquake, 2006, 26(3): 53-63. (in Chinese)
- [8] 刘耀伟,曹玲玲,平建军.地下流体短期前兆典型特征分析[J].中国地震,2004,20(4):372-379.
LIU Yao-wei, CAO Ling-ling, PING Jian-jun. Study on Typical Characters of Fluid Short-term Precursory[J]. Earthquake Research in China, 2004, 20(4): 372-379. (in Chinese)
- [9] 邱泽华,张宝红,池顺良,等.汶川地震前姑咱台观测异常应变变化[J].中国科学:D辑,2010,40(8):1031-1039.
QIU Ze-hua, ZHANG Bao-hong, CHI Shun-liang, et al. Abnormal Strain Changes Observed at Guza before the Wenchuan Earthquake[J]. Sci China: D Series, 2010, 40(8): 1031-1039. (in Chinese)
- [10] 钱家栋,马钦忠,李劲松.汶川8.0级地震前成都台NE测线地电阻率异常的进一步研究[J].地震学报,2013,35(1):4-17.
QIAN Jia-dong, MA Qin-zhong, LI Shao-nong. Further Study on the Anomalies in Apparent Resistivity in the NE Configuration at Chengdu Station Associated with Wenchuan M_s8.0 Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(1): 4-17. (in Chinese)
- [11] 张景廉,杜乐天,曹正林,等.再论汶川大地震与深部气体的关系[J].西北地震学报,2011,33(1):96-101.
ZHANG Jing-lian, DU Le-tian, CAO Zheng-lin, et al. More Discussion on the Relationship between Wenchuan Earthquake and Deep Gas[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(1): 96-101. (in Chinese)
- [12] 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等.1970年以来甘肃台网地震观测报告收集整理及其重新定位研究[J].西北地震学报,2012, 34(3):291-296.
FENG Jian-gang, JIANG Chang-sheng, HAN li-bo, et al. Collection and Rsestablish Work for the Earthquake Observation Reports of the Gansu Seismographic Network since 1970 and Earthquake Relocation[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 291-296. (in Chinese)
- [13] 张新基.甘肃省地震监测志[M].兰州:兰州大学出版社, 2005:119-120.
ZHANG Xin-ji. The Monitoring Records of Gansu Province [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2005: 119-120. (in Chinese)
- [14] 卜玉菲,张元生,万永革,等.P波极性揭示的甘东南地区构造应力场特征[J].地震工程学报,2013,34(1):160-165.
BU Yu-fei, ZHAN Yuan-sheng, WAN Yong-ge, et al. Tectonic Stress Field in Southeastern Area of Gansu province Deduced from Wave Polarity Data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 34(1): 160-165. (in Chinese)