

测氡仪 K 值变化对水氡测值的影响及校正^①

苏鹤军^{1,2}, 曹玲玲³, 李春燕³

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃 兰州 730000;
3. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 目前对测氡仪闪烁室 K 值变化引起水氡测值变化的校正方法存在明显的不合理性。利用曲线拟合方法拟合 12 个闪烁室 K 值变化的曲线方程, 结果显示 K 值按二次曲线模型变化。采用该方法对甘肃武山 22 号井水氡进行重新校正, 与之前的校正结果相比, 重新校正的曲线连贯性和稳定性更好, 且更趋于合理。分别分析武山 22 号井水氡新校正曲线、原始测值曲线和去台阶处理曲线与地震的对应关系, 结果显示新校正的水氡曲线不仅在大地震前异常具有重现性特征, 且在同一地震前与震中一定范围内其他台站的水氡异常具有同步性特性。这进一步表明, 根据 K 值的变化机理对水氡测值进行重新校正是非常必要的。

关键词: 水氡误差; K 值; 曲线拟合; 数据校正; 映震效果

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)05-0795-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0795

Influence of Emanometer K -value Change on Water Radon Value and Correction Method

SU He-jun^{1,2}, CAO Ling-ling³, LI Chun-yan³

(1. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;
3. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: This study aimed to develop an accurate correction method of errors in the water radon value caused by a change in the emanometer K value. First, we investigated current methods used to correct radon values and found obvious differences among them. This is because none of these methods capture the real change in the K value. Therefore, in this study, we adopted the curve fitting method to investigate changes in the K value. Fitting models examined in this study include linear, quadratic, logarithmic, cubic, and exponential models. We performed curve fitting for 12 K -value groups and obtained their curve fitting equations. Results revealed that the fitting degree of the quadratic curve was the best. Therefore, we adopted the quadratic curve method for correcting the radon values of No.22 well, which is located in Wushan county, Gansu province. To test the accuracy of the corrected radon value results after curve fitting, we determined the correspondence among changes in the radon value from all types of correction methods and earthquakes. Results revealed that the shape of the corrected radon value curve using the curve fitting method not only has good reproducibility prior to strong earthquakes but also well synchronizes with the curve shapes of water radon values obtained from other stations around the epicenter before a strong

① 收稿日期: 2015-04-01

基金项目: 甘肃省地震局地震科技发展基金(2013M04)

作者简介: 苏鹤军(1973-), 男, 甘肃通渭人, 高级工程师, 硕士, 主要从事地震地下流体和地震预报研究。

E-mail: suhejun@126.com.

earthquake. Furthermore, these results show that it is necessary to correct the water radon error using the K -value change mechanism. The use of the curve fitting method to correct the radon value error caused by a change in the K value is an innovative technique and a significant contribution to the field.

Key words: the water radon error; K value; curve fitting method; data correction; earthquake-reflecting effect

0 引言

无论对水氡进行模拟观测还是数字化观测,对观测仪器的标定都是一个不可或缺的环节。对模拟水氡而言,目前采用的仪器主要为FD-125型水氡观测仪,采用闪烁室闪烁脉冲计数。闪烁室在使用过程中,由于参与计算水氡的 K 值不断发生变化,导致水氡的测量值偏离真实值,为了减小两者之间的误差,需要对 K 值进行标定。《地震水文地球化学观测技术规范》^[1]中规定,每年4月和9月需对闪烁室 K 值进行标定。9月标定的 K 值主要是检验使用 K 值是否在误差允许范围内。在1993—2011年间,只有当4月份标定的 K 值与使用 K 值相差大于5%时,才能启用,而其他年份则无此规定。但在实际使用中发现,更换闪烁室 K 值会引起水氡测值出现“台阶”变化。学者研究认为应该每年更换新标定的 K 值,才能消除或减小水氡测值的台阶式变化^[2-3]。但即使每年更换新标定的闪烁室 K 值,当新旧 K 值相差较大,特别是更换闪烁室时,水氡测值前后无法衔接的台阶依然显著。

目前对闪烁室 K 值变化引起的水氡变化,只对台阶变化进行对接处理。然而 K 值虽然在使用期间一直当常数使用,但它实际是一个变量,因此去台阶法并不能真正达到校正水氡值误差的目的。鉴于此,本文除重点分析目前使用的校正方法存在的问题外,还根据 K 值变化的机理对水氡测值进行校正,进而通过与地震的对应关系对新校正的水氡数据实用性进行检验。

1 K 值变化引起水氡出现误差的原因

(1) 测氡仪测氡原理

目前我国地震系统用于水氡观测的仪器主要是FD-125型测氡仪。测氡仪闪烁室内有硫化锌(银)涂层,当水样中氡经脱气被鼓入闪烁室时,氡及其子体的 α 离子冲击闪烁室内壁的硫化锌(银)闪烁体,激发出光子,经光电倍增管进行光电转换,成为电子,并在阳极负载上形成一脉动电流,输出负压脉

冲,再经电子线路放大、鉴别、整形后被自动定标器记录下来,根据在单位时间内的脉冲计数(脉冲/分)计算出水氡浓度^①。

(2) 测氡仪闪烁室 K 值标定

K 值是闪烁室标准系数的简称,是水氡测量中的换算系数。测氡仪闪烁室标定就是对 K 值的重新确定,指在正常工作环境下,用一已知氡含量的放射性标准源,按测定样品的相同方法和操作步骤进行测量,由此求得闪烁室的 K 值。作为计算未知样品中氡浓度的衡量标准,其表达式为:

$$K = \frac{B_q}{(N - N_0)} \left(\frac{\text{贝克}}{\text{脉冲/分}} \right) \quad (1)$$

其中: K 为闪烁室的标定值; N 为标定读数; N_0 为本底读数; B_q 为氡气源装置上标氡射气计量配置^①。

(3) 水氡值误差形成的原因

由于闪烁室在使用过程中,氡及其子体的 α 离子对闪烁室内壁不断冲击,使硫化锌(银)闪烁体涂层变薄或局部脱落,或有灰尘附着,导致记录到的脉冲数减小, K 值增大。而闪烁室在使用中, K 值通常最短一年更换一次,以致参与水氡计算的 K 值小于真实值,进而使计算的水氡值小于真实值,从而出现误差。为了能掌握真实的水中氡值的变化,在无法直接获得每次参与水氡计算的 K 值的现状下,需要对水氡测值误差进行校正。

2 现有 K 值变化引起水氡测值变化的处理方法及存在的问题

2.1 K 值变化引起水氡变化的处理方式

目前对 K 值变化引起的水氡测值的变化采用的基本处理方式是:(1)保持原始的观测值;(2)去台阶处理,即对台阶之前的所有数据增加或减小一个常数,进而将台阶前后的数据进行平稳对接,常数的大小就是台阶上下值的差。

2.2 K 值变化引起水氡变化处理方法存在的问题

图1给出了甘肃武山22号井水氡原始测值和去

① 陈有发,等.《地震观测技术》(试用).1994.

台阶处理后的水氡测值曲线。对比两图可以看出它们存在着显著的差异:(1)从曲线长趋势变化来看,原始测值成水平变化,经过去台阶处理后,从 2002 年下降转平后一直在低值水平变化;(2)从趋势的稳定性来看,整个观测期间,由于阶梯的存在导致原始测值稳定性和连贯性变差,而去台阶处理后的数据连贯性

和稳定性好;(3)从水氡测值变化幅度来看,观测以来,原始测值的最大变化幅度为 100 Bq/L 左右,而去台阶变化的最大幅度达到 230 Bq/L 左右;(4)从两条曲线水氡绝对数值来看,观测初期原始测值为 310 Bq/L 左右,而去台阶处理后变为 470 Bq/L 左右,两者相差达到 160 Bq/L 左右。

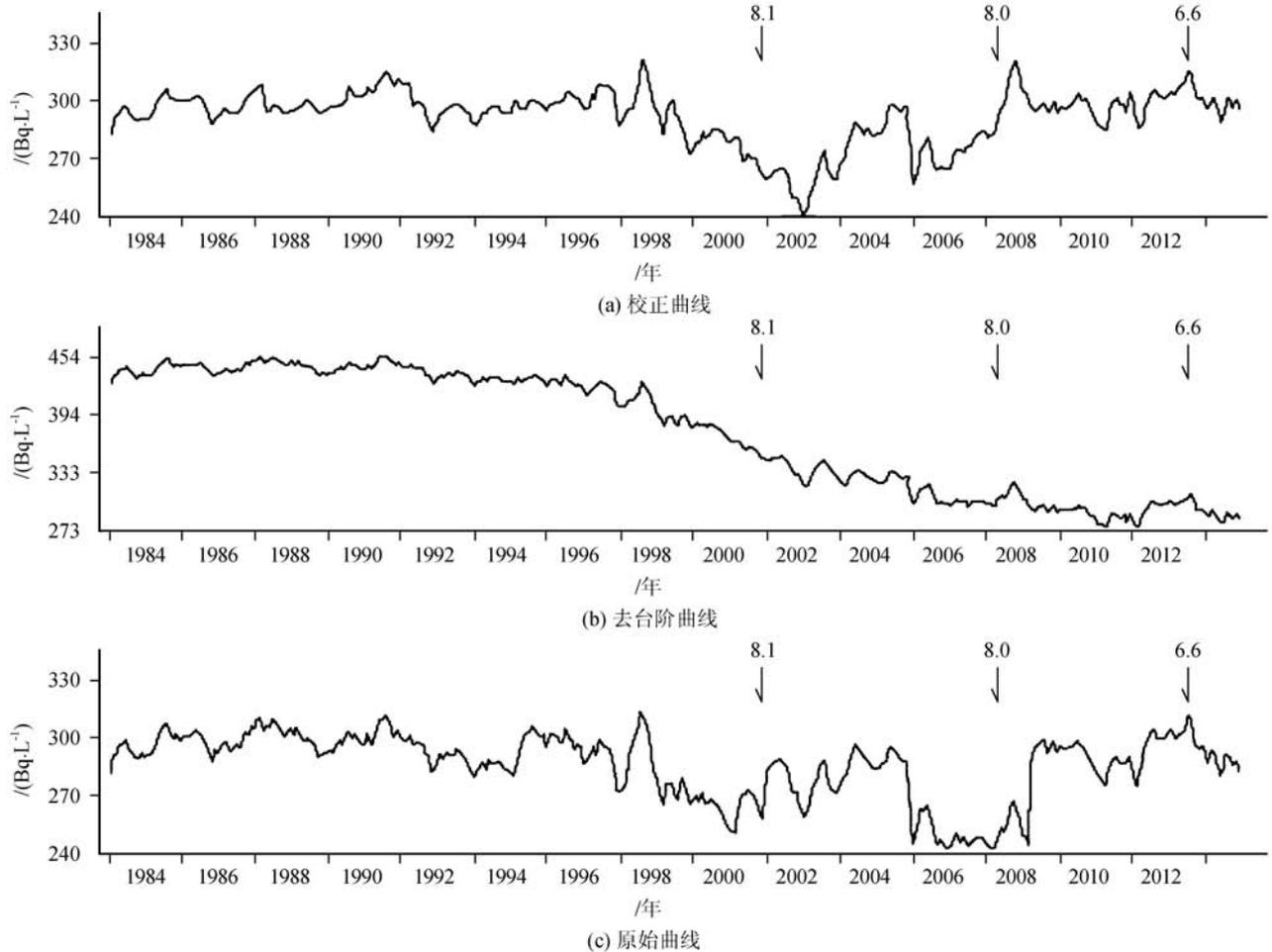


图 1 甘肃武山 22 号井水氡月均值曲线图

Fig.1 The monthly mean value curves of water radon of No.22 well in Wushan county, Gansu province

以上对比结果可以看出,同一测点、同一时段的不同水氡观测值经过去台阶处理后,曲线趋势发生了很大变化,这表明目前采用的对 K 值变化引起水氡变化的处理方法存在着明显的不足,主要表现在:

(1) 保持原始观测值

水氡的原始观测值能够真实地反映数据多年的长趋势变化,但更换 K 值导致水氡出现的台阶变化会使数据使用者难将其与地震异常区分,也使数据的连贯性变差。同时由于是原始观测值,所以起不到校正的作用。

(2) 去台阶变化处理方法

去台阶处理除能增加数据的连贯性和稳定性外,不仅不能对水氡测值起到校正作用,而且还会使

水氡测值更加偏离真实值。这是因为去台阶处理的前提是认定 K 值在使用期间是一个常量,并且新更换 K 值引起水氡变化是 K 值标定误差引起的。因此,就出现校正次数越多,校正之前的水氡值越来越大或之后的值越来越小的现象。这种校正方法使更换新 K 值完全失去意义,也使闪烁室的标定仅起到判断闪烁室能否继续使用的作用。

事实上,在标准源相对固定,且严格按规范标定的前提下, K 值的准确性能达到误差要求,因此更换新 K 值造成的台阶并不是由 K 值的标定误差引起的,而是因为 K 值虽然在使用中当作常数,但实际上是一个变量,新旧标定 K 值差就是闪烁室使用期间 K 值变化的累计量。因此 K 值变化引起的水

氡变化是个缓慢的过程,更换 K 值出现的水氡台阶变化只是 K 值未及时更换的体现,它是水氡变化的累积量。更换 K 值可引起水氡测值出现明显的台阶变化进一步说明这种缓慢下降是不可忽略的。更为重要的是, K 值误差产生在其使用到下次标定之间,因此水氡测值的校正应该限于这期间,而不是之前所有的测值。

综合以上分析可以看出,目前采用的对闪烁室 K 值变化引起水氡变化的处理方法仅起到使数据连贯的作用,非但起不到校正的作用,反而使水氡数值更加偏离真实值,也没有对 K 值引起的水氡测值的趋势变化进行校正。因此从闪烁室 K 值变化的机理出发,定量地分析闪烁室 K 值的变化过程,得出更为真实的水中氡的含量对地震前兆观测手段的选择及有效监测地震都具有重要的意义。

3 测氡闪烁室 K 值变化的定量分析

3.1 使用方法及数据的选择

对闪烁室 K 值变化过程的定量分析采用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 统计软

件,利用曲线回归中的曲线估计方法对 K 值的变化过程进行曲线拟合。

通过对前人研究中提及的闪烁室^[2-3]和甘肃水氡观测使用的闪烁室 K 值进行的细致梳理,选出使用时间长、标准源相对固定、标定 K 值达到 4 个及以上且使用方式没有改变(由于有些闪烁室使用一段时间后,改为备用闪烁室,虽然每年仍进行 K 值标定,但使用情况发生了变化)的 12 个闪烁室,对其 K 值进行拟合分析。遵循 K 值变化逐步增大的规律,拟合曲线模型选择直线、平方、立方、对数、指数等方法(只有 4 个 K 值的闪烁室不做立方分析)。

3.2 结果分析

对比分析每组 K 值选用的各种曲线模型拟合方程的决定系数和模型显著性检验参数,发现二次方程拟合效果最好。12 组 K 值数据二次拟合方程的决定系数 R_{sq} 都大于 0.95。从模型的显著性($P < 0.05$ 为显著)来看,9 组数据二次方程拟合结果 P 小于 0.05,拟合度很好,但有 3 组数据 P 大于 0.05,拟合模型没有达到显著。从表 1 可以看出,这三组数据正好是标定 K 值只有 4 个的闪烁室。从

表 1 闪烁室标定 K 值及拟合方程参数表

Table 1 The calibration K -value and parameters for fitting equations

闪烁室 标号	使用期间的标定 K 值 以时间先后为序	拟合方程	Rsquire	使用属地
530	732 778 810 842 810	$y = 741.843 + 62.508x - 2.717x^2$	0.972	新疆
541	732 776 824 860 904	$y = 737.048 + 90.667x - 12.062x^2$	0.988	新疆
315	780 791 813 830	$y = 779.2 + 12.7x + 1.5x^2$	0.991	福建
589	755 775 792 802 809	$y = 754.886 + 22.929x - 2.357x^2$	0.999	甘肃
144	761 783 808 813 823	$y = 760.514 + 27.971x - 3.143x^2$	0.987	甘肃
1 659	754 764 781 800 832	$y = 754.371 + 6.057x + 3.286x^2$	0.998	甘肃
507	778 791 794 820 834 850 890	$y = 779.976 + 5.071x + 2.095x^2$	0.984	甘肃
1 519	782 806 811 820 832	$y = 784.543 + 17.114 3x - 1.428 6x^2$	0.960	甘肃
367	782 792 798 841	$y = 784.05 - 6.45x + 8.25x^2$	0.959	甘肃
293	747 768 780 798	$y = 747.45 + 18.75x - 0.75x^2$	0.992	甘肃
1 701	776 784 798 807 833	$y = 776.629 + 4.842 9x + 2.214 3x^2$	0.986	甘肃
345	765 771 780 791 807	$y = 765.143 + 4.114x + 1.571x^2$	0.999	甘肃

注:表中 K 值都扩大 1 万倍,方程中 x 代年, y 代表拟合 K 值

拟合方程的二次项系数来看,12 个闪烁室中有 6 个二次项系数为正,6 个二次项系数为负。

综合以上分析,闪烁室在使用中其 K 值按二次曲线模型变化,变化速率是使用初期快还是使用后快,不同的闪烁室并不相同。这究竟是闪烁室的使用差别决定的,还是标定误差引起的,还需以后进行深入的实验分析来判定。闪烁室标定 K 值样本量越多,其变化的拟合效果越好,越能真实地反映 K 值的变化过程。

从拟合曲线的形态(图 2)和二次项系数来看,12 条曲线的弯曲度都不大,且有 3 条接近于直线,因此相邻两个 K 值之间的变化可以近似地看作直线。依此,当闪烁室使用期间只有不超过 3 个标定 K 值而无法拟合时,可以将相邻两个值之间的变化近似看成成直线。

4 实例分析

甘肃武山 22 号井自 1984 年开始进行水氡观

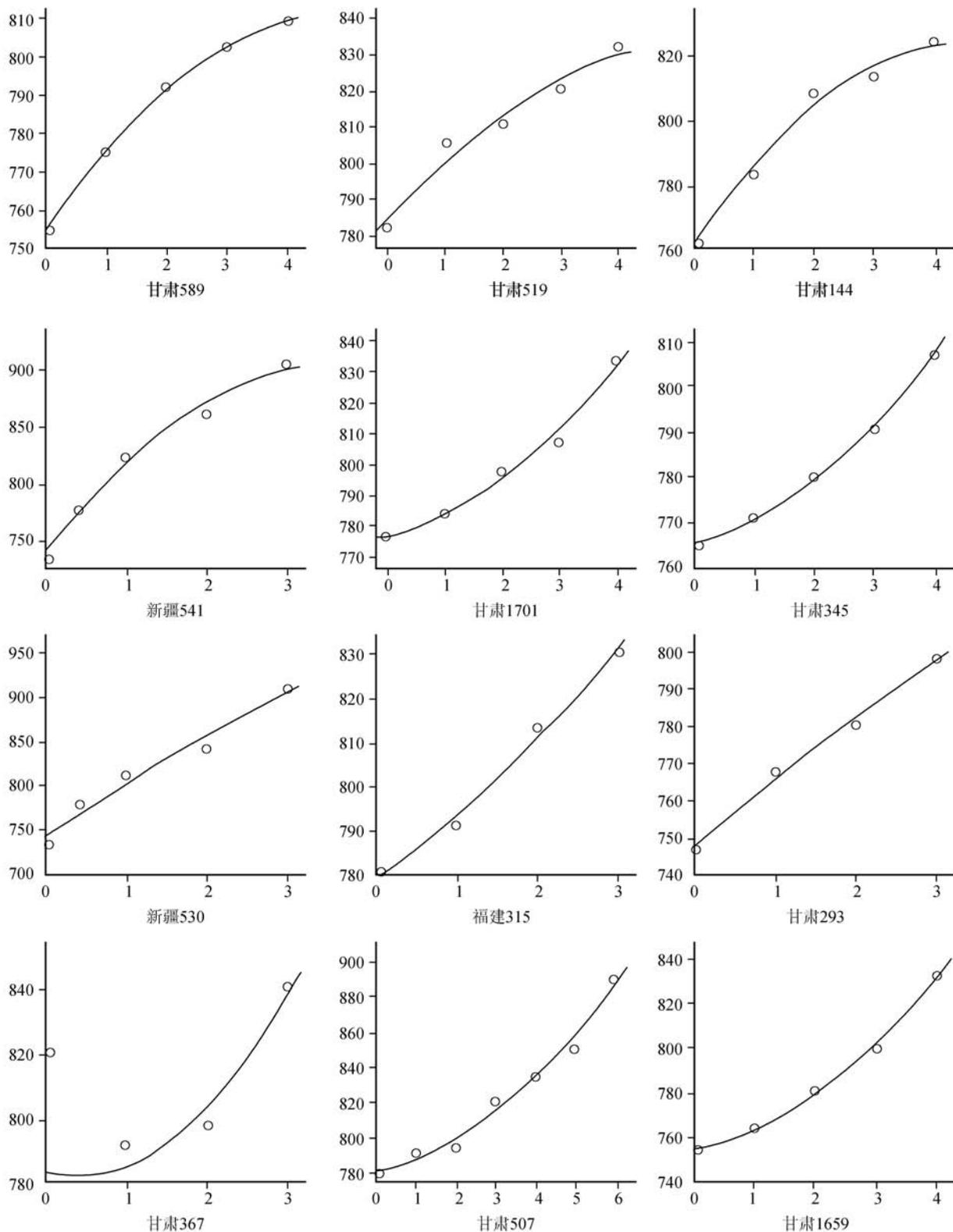


图 2 闪烁室 K 值变化拟合曲线图

Fig.2 The fitting curves of K-value change

测,距今已有 30 年以上的连续观测资料,观测质量良好。观测以来使用的闪烁室标定 K 值都有完整的记录。观测期间其控制范围内发生了多次 5 级

以上地震,特别是 2008 年的汶川 8.0 级地震距离该点仅 440 km,2013 年 7 月的岷县漳县地震更近,只有 68 km,这为水氡测值校正结果映震效果的检

验提供了条件。因此本文选择该井水氡进行实例分析。

4.1 曲线校正

水氡曲线的校正步骤是:首先根据每年标定的 K 值拟合出 K 值变化方程,然后用拟合方程计算出每天的 K 值,最后用新 K 值重新计算每天的水氡值。

曲线校正中对更换闪烁室 K 值的衔接:闪烁室更换通常是原闪烁室 K 值太大或出现故障而无法准确测量,据此判断这时的 K 值标定值也不准确,需要用更换的新闪烁室测量的氡值计算出原闪烁室的 K 值,并且用计算值代替标定值参与曲线拟合。

对于闪烁室使用期间只有不超过三个标定 K 值的,根据本文第三部分的分析结果,将相邻两个 K 值之间看作直线变化。

图1给出了甘肃武山22号井水氡校正曲线。对图1的3条曲线进行对比可以看出,它们之间存在明显的差别:(1)与原始观测值曲线相比,新校正的曲线稳定性和连续性明显增加。从曲线整体变化趋势来看,两者相差不大,但局部差异明显,最显著的是1999年以来的下降,新校正曲线在2003年1月达到最低点,而原始值曲线在2001年3月达到最低点。原始值曲线2006年1月—2009年4月存在明显的低值过程,但经过校正后为缓慢的上升过程;(2)与经过去台阶处理曲线相比,去台阶导致的早期水氡数据越来越大的现象在新校正曲线中并没有出现。对于1999年以来的下降,去台阶处理的曲线在2006年9月才结束,比新校正曲线晚了3年零8个月,并且新校正曲线下降结束后成转折上升变化,而去台阶处理的曲线为转平变化。

综合分析发现,新校正的水氡曲线既增加了数据的连贯性和稳定性,也避免了校正次数越多早期水氡值越来越大的现象。

4.2 水氡三种曲线与地震的对应关系

武山22号井水氡观测期间,2013年甘东南发生了岷县6.6级地震,2008年在距离测点不到500 km的距离发生了汶川8.0级地震,2001年昆仑山8.1级地震虽然距离测点超过1 000 km,但这次地震震级很大,对甘东南地区影响明显^[7]。本文以这三次地震为例,分析震前三条曲线的变化特征。

(1) 新校正的曲线

从图1可以看出,昆仑山8.1级地震前,1996年(震前5年)水氡上升速率加快,1998年8月(震前3年)改变原有趋势呈快速下降变化,地震发生在下降过程中。汶川8.0级地震前,曲线从2003年(震前5

年)改变原有下降趋势转折上升,2005年11月(震前接近3年)开始转折下降,地震发生在低值阶段。岷县6.6级地震前,2012年4月(震前1年3个月)水氡出现快速的上升变化,2012年8月(震前11个月)转平,地震发生在高值阶段。从以上的对比可以看出,在异常变化形态上,三次地震前曲线最初都为加速上升变化,虽然地震发生阶段两次8级地震曲线状态与6.6级地震的不同,但6.6级地震发生在快速上升结束以后,为相对低值。在异常变化时间上,震级越大,距离越远,异常转折的时间越早,这与其他大震前水氡的典型变化一致^[4-8]。

(2) 去台阶处理的曲线

从去台阶处理曲线的变化形态来看(图1),昆仑山8.1级地震发生在曲线平稳变化转为趋势下降的过程中;汶川8.0级地震发生在曲线由趋势下降转为水平变化后;岷县6.6级地震发生在曲线快速上升后的转平过程中。由此可见,去台阶处理的曲线在三次地震前变化形态各不相同。

(3) 原始观测值曲线

从图1可以看出,昆仑山8.1级地震前,曲线从1996年就开始呈下降变化,地震发生在转折上升阶段。汶川8.0级地震前,曲线最初为上升变化,地震发生在2005年底阶降后的缓慢下降阶段。岷县6.6级地震发生在2012年快速上升后的转平高值阶段。对比结果显示,水氡原始值曲线在三次地震前的异常不具备重现性特征。

综合以上分析结果,武山22号井水氡在不小于6.6级地震前,经过拟合校正的水氡前兆异常具有很好的重现性特征,而原始测值和去台阶处理后的水氡并不具备这种特征。

范雪芳等^[9]对汶川8.0级地震震中770 km范围内的水氡典型异常做了分析,确认甘肃武都、四川康定姑咱、西昌新村井和云南景东井四个台站水氡存在典型异常。这些台站月均值曲线最初的异常变化都是趋势上升,地震都发生在转折变化后,这与武山22号井新校正的曲线非常相似。

根据以上分析可以判断,根据 K 值的变化机理,利用拟合方程重新校正的水氡值更接近于真实值,也表明水氡值的变化能够反映强震的孕育过程。

5 讨论与结论

本文通过对甘肃武山22号井水氡原始测值和去台阶处理后的数值对比发现,两组数据存在很大的差别,由此可以判定 K 值变化引起的水氡变化并

不是可以忽略不记的。因此,选取了甘肃省内外 12 个闪烁室的 K 值,应用拟合方法定量分析了其变化过程,并用甘肃武山 22 号井水氡重新校正数据的变化与地震的对应关系对校正结果进行了检验。主要得出以下结论:

(1) 目前使用的对 K 值变化引起的水氡变化的处理方法存在明显的缺陷,它没有考虑 K 值的变化是个连续的过程,因此,不但没有起到校正的作用,而且还造成去台阶变化次数越多之前的水氡数据越大,扭曲了数据的真实性。

(2) 从闪烁室 K 值变化的机理出发,对 12 个闪烁室 K 值变化进行了曲线拟合,结果显示它们按二次曲线模型变化。闪烁室使用期间只有不超过 3 个标定 K 值的,相邻两个 K 值之间可看作直线变化。

(3) 根据 K 值变化拟合结果对武山 22 号井水氡进行了重新校正,结果显示新校正的曲线不仅可去除 K 值更换引起的水氡数据的台阶变化,而且还会避免校正次数越多之前水氡测值越偏离真实值的现象。

(4) 对比分析了武山 22 号井水氡新校正的曲线、原始曲线和去台阶处理三条曲线与地震的对应关系,结果显示新校正的曲线对应地震的能力明显优于其他两条,主要表现在多次地震前异常的重现性和在一次地震中与震中一定范围内其他台站水氡异常变化形态的相似性和时间的同步性。

虽然在理论上闪烁室 K 值是逐步增大的,但对甘肃 1984 年以来使用的部分闪烁室 K 值进行梳理时发现,标定 K 值变小的现象普遍存在。这除了与标定误差有关外,可能还与目前使用的新 K 值的确定有关。目前新 K 值的确定方法是:先利用标准氡源测出 3 个 K 值,然后取其平均值作为新标定的 K 值。如果 3 次测值中有一次偏差较大,则平均值也会有较大偏差。

这种利用 K 值变化对水氡重新校正的方法在时间上比较滞后,但通过武山 22 号井水氡原始测值曲线、去台阶处理测值曲线和新校正曲线的对比发现,在长趋势上原始测值曲线更接近于新校正曲线,因此在地震跟踪中趋势异常的分析可选择原始测值曲线。

参考文献(References)

[1] 国家地震局.地震水文地球化学观测技术规范[M].北京:地震出版社,1985.
State Seismological Bureau. Technical Code for Seismic Hydro-geochemical Observation[M]. Beijing: Seismological Press,

1985.(in Chinese)

[2] 张学敏,兰陵,李艳萍.测氡仪的标定及 K 值使用中存在的一些问题[J].内陆地震,2005,19(1):90-94.
ZHANG Xue-min, LAN Ling, LI Yan-Ping. The Calibration of Examine Radon Apparatus and Some Questiongs Existing in Application of the K Value[J]. Inland Earthquake, 2005, 19 (1):90-94.(in Chinese)

[3] 张清秀,郑小菁,黄小华.测氡仪器 K 值使用中存在的问题讨论[J].华南地震,2011,31(1):110-115.
ZHANG Qing-xiu, ZHANG Xiao-jing, HUANG Xiao-hua. Discussion of the K -value Problems of Using the Radon Apparatus [J]. South China Journal of Seismology, 2011, 31(1): 110-115. (in Chinese)

[4] 车用太,鱼金子.地下流体的源兆、场兆、远兆及其在地震预报中的意义[J].地震,1997,17(3):283-289.
CHE Yong-tai, YU Jin-zi. The Focal Precursors-field Precursors and Remoted Precursors of Ground Fluid before Strong Earthquakes and Their Significance in the Earthquake Prediction[J]. Earthquake, 1997, 17(3): 283-289. (in Chinese)

[5] 高小其,陈华静,高国英,等.新疆地下流体源兆、场兆、大震远兆特征的统计分析[J].地震,2006,26(2):83-94.
GAO Xiao-qi, CHEN Hua-jing, GAO Guo-ying, et al. Statistics and Analysis on Characteristics of Focal Precursors, Field Precursors and Semote Precursors of Ground Fluid for Great Earthquakes in Xinjiang Region[J]. Earthquake, 2006, 26(2): 83-93. (in Chinese)

[6] 张慧,王长岭.大震水化学参量“场兆”与“源兆”判别指标的研究[J].地震,1999,19(2):155-160.
ZHANG Hui, WANG Chang-ling. Study on Judging Indexes between “Field Precursor” and “Focus Precursor” of Hydrochemical Parameters before Strong Earthquakes [J]. Earthquake, 1999, 19(2): 155-160. (in Chinese)

[7] 刘耀炜,曹玲玲,张昱.昆仑山口西 8.1 级地震前后青藏块体东北缘地下流体前兆特征[J].地震,2004,24(增刊):1-9.
LIU Yao-wei, CAO Ling-ling, ZHANG Yu. The Characteristics of Fluid Precursors in the Northeast Margin of Qinghai—Xizang Block before and after M_s 8.1 Earthquake of the West Kunlunshan Pass[J]. Earthquake, 2004, 24(Supp): 1-9. (in Chinese)

[8] 曹玲玲,王宗礼,李春燕.岷县漳县 6.6 级地震前天水花牛水氡异常可靠性分析[J].地震工程学报,2013,35(4):800-807.
CAO Ling-ling, WANG Zong-li, LI Chun-yan. Reliability Study on Water Radon Concentration Anomaly of Huanu Sping in Tianshui befor Minxian—Zhangxian M_s 6.6 Earthquake [J]. China Erathquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 800-807. (in Chinese)

[9] 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):132-140.
FAN Xue-fang, WANG Ji-yi, LU Ming-yong. Preliminnary Study on Some Typical Medium-term Subsurface Fluid Anomalies before the Wenchuan 8.0 Earthquake [J]. Earthquake, 2009, 29(1): 132-140. (in Chinese)