

地下水中氡的不同存在形式及其 映震效能差异性的研究

张新基 张 慧

(国家地震局兰州地震研究所,兰州 730000)

摘要 阐述了氡在地下水中的不同存在形式及不同形式氡的运移机理和传递地壳应力应变信息的机理,结合实际观测结果对其映震效能的差异性进行了研究。结果表明:逸出氡比溶解氡能更好地反映地壳的应力应变的变化,其映震效能明显高于溶解氡。因此,逸出氡可作为新的映震组分纳入水化台网观测,从而成为地震监测与预报的一种较有效的手段。

主题词: 地下水·氡 气体地球化学测量 映震能力

1 前言

自1996年4月塔什干地震研究所B. И. 乌洛莫夫等^[1],在塔什干地区发生的5.3级地震的前兆资料中,发现了水氡浓度有明显异常变化以后,地震前地下水中氡浓度的变化一直受到各国学者的重视。在以后的多次震例中,各国学者相继发现了震前氡浓度变化的实例,同时作为地震的孕育过程及预报地震的一种手段,对氡浓度变化的机理及其与地震的关系进行了广泛、深入的观测与研究。

氡在地下水中具有不同的存在形式,在地下水的运移和地震的孕育、发生过程中,不同形式氡的含量将发生变化,并且其运移机理和传递地壳应力应变信息机理截然不同,因此其映震效能具有很大的差异。本文对这一问题进行了系统的分析和研究。

2 地下水中氡的存在形式

实验和观测结果表明,氡在地下水中的存在形式有两种:即溶解于地下水中和以游离形式存在于地下水中。在一定的温度和压力条件下,自由氡和溶解氡之间存在着动态平衡,当温度和压力条件发生变化时,该平衡将被破坏,自由氡和溶解氡的含量发生变化。现分述如下:

(1)自由氡:在地下水中以游离气体的形式存在、运移的氡称为自由氡。随着地下水向地表的运移,温度和压力降低,自由氡的含量将逐渐增大。

(2)溶解氡:溶解于地下水中的氡称为溶解氡。水化观测点所观测到的是地下水流入脱气装置(指使用连续自记测氡仪)时的温度和压力条件下溶解于水中的氡。在井孔不同深度下温度和压力条件不同,而在不同的温度和压力条件下,溶解于水中的氡和以气态形式存在的氡之间的平衡常数 K 是不同的(自由氡 $\xrightleftharpoons{K}$ 溶解氡),所以在不同深度时,溶解于水中的氡和以气

体形式存在的氢的含量是不同的。

(3)逸出氢:以自由气形式自地下水表面分离出来的氢称为逸出氢。在地下水从深部向地表运移流出井孔的过程中,随着温度压力条件的变化,这部分氢以气体形式从地下水中逸出。必须说明的是,在井口处所测量的逸出氢包括地下水中以游离气体形式存在的自由氢和在地下深部压力很大的条件下溶解于水中的部分氢。随着地下水向浅部运移,压力减小,这部分溶解于水中的氢也从地下水中逸出而成为逸出氢。

由于取样方法的限制,现行的所有水化观测点观测到的都是混合氢,即在取样时温压条件下溶解于水中的溶解氢和少量以游离气体形式存在的自由氢。只是由于各观测点地下水中游离气体含量不同以及取样位置不同,气水混合比不同而已。

3 地下水中不同形式氢的运移机理及传递地壳应力应变信息的机理

3.1 溶解氢和逸出氢的运移方式——水载和气载机理

众所周知,氢射气分布到围岩空间的能力称为岩石的射气作用。决定氢射气的作用大小的参数主要有射气强度、射气能力、射气系数3种。氢射气应该包括溶解氢和逸出氢两部分,它们在地壳中和地下水中的运移是一个非常复杂的过程。目前多数人认为氢射气在地下水中的迁移机制主要有两种,即水的携带作用和气体的携带作用。由于氢溶解于地下水中随着地下水运移而迁移,因而地下水就成为其迁移的载体,这就是地下水中氢运移的水载机理。又由于氢是一种微量气体元素,在很多情况下,地下深部岩石孔隙和地下水中的封闭氢、吸附氢和自由氢以其它浓度大的未溶解于地下水中的气体(如 H_2 、 O_2 、 CO_2 、 CH_4 等)作为载体,在其扩散压力的推动下向地表快速迁移,这就是地下水中氢运移的气载机理。地下水中溶解的和游离的气体其成因主要有两大类^[2],即地球内部生成的和自地球外部运移来的,当这些不同成因的气体进入地下水循环后对氢的迁移起着相当重要的作用,并且已有很多资料证实氢、甲烷等气体都是氢的很好的载体。此外,当地下水向地表运移时,随着温度、压力的降低,氢运移的载体将发生变化,一部分水载氢从地下水中脱出而进入自由气体中,因此其运移赋存的载体也发生了变化,从水载而变为气载了。

3.2 不同形式氢的迁移速率的差异

水化观测井(泉)中流动的是水与气体的机械混合物,在此混合物自深部向地表运移的过程中,随着压力的降低,气泡和水一起运动的同时,彼此之间发生着相对运动。按照气体在地下水中自深部向浅部运动过程中所受力的作用来看,由于地下水中自由气泡底部的压力大于气泡顶部的压力,自由气泡在压力差的作用下以加速度快速上升。这种压力差对于液体水来说同样存在,但是气体在愈接近地表时体积愈大,水对其向上的浮力也就愈大,加速度也就愈大。因此,对于地下水气混合物这个系统而言,气体向地表的运移速率要比水大得多。实际观测结果*也证明了这一点,在干扰因素较小的情况下,一般地逸出氢往往超前于溶解氢到达极值点(极大值和极小值),这也说明了逸出氢比溶解氢在地下水中的运移速率大。

3.3 传递地壳应力应变信息机理的差异

3.3.1 测试仪器对不同形式氢浓度变化的反应

实际观测试验资料表明,地下水中逸出氢的含量(浓度)远远大于溶解氢的含量(浓度),表1给出了一些具有代表性的泉、井地下水中逸出氢和溶解氢含量的对比^[2,3]。从表中可以看出,

* 张新基.地下水中逸出氢、溶解氢微动态特征的对比研究.国家地震局分析预报中心硕士学位论文,1992.

不论是热水井还是冷水井,其共同特点是地下水逸出氮的含量均高出溶解氮含量数倍,甚至几十倍。又由于上述逸出氮的运移速率要大于溶解氮,这些特点决定了测试仪器对不同形式氮变化反应的差异。实验表明,测试仪器对实验样品的反应幅度随着样品的浓度不同而有很大的差别。当同一体积但不同浓度的样品进入测试仪器时,仪器对试样反应幅度表现出如下特征:即样品浓度大时仪器对其反应幅度大;反之,则反应幅度小,其响应特征示意图见图 1。由于逸出氮和溶解氮在地下水中运移载体、运移速率和含量均具有很大的差异性,因此,测氮仪器对逸出氮浓度变化的反应幅度变化大于对溶解氮浓度变化的反应幅度变化。

表 1 地下水中逸出氮和溶解氮含量对比表

水 点	北京 东三旗	河北 怀来 3	海南 海口	河北 雄县	广东 汕头	哈萨克 亚木孔湖	俄罗斯 No. 3 泉	俄罗斯 No. 18 泉	乌兹别克 别兹纳泉
水温℃	25	88	48	67	102	24	41	15.5	22
溶解氮 Bq/L	14.7	16.3	14.3	7.8	28.6	11.1	399.6	351.5	370
逸出氮 Bq/L	58.7	205.4	152.0	55.5	1900	162.8	4255	5735	1665
逸出氮/溶解氮	4.0	12.6	10.6	7.1	66.8	14.7	10.7	16.3	4.5

3.3.2 地下水出水系统结构
对不同形式氮浓度变化的调制

目前,我们观测的地下水均来自于天然泉或人工成井,由于这一特殊的出水系统,决定了地下水到达地表出口的表面积远远小于井(泉)所揭示的含水层(体)的横截面积(图 2)。因此该特殊结构决定了地下水两相体(气相和液相)传递地壳应力应变变化的灵敏程度上的差异。

当地壳岩石的应力增加时,含水体的孔隙压力也随之增加,因此,孔隙水对氮的溶解度也随之增大。随着应力的进一步增强,含水体内许多微裂隙的开启、贯通,其内的自由氮气随着岩石内的封闭气体一起被释放出来。另外,微裂隙的开启和新裂隙的形成所产生的超声振动使聚集在岩石颗粒表面的吸附氮转化为自由氮而进入游离气体或溶解于地下水中,又由于地壳岩石应力的增加,氮在孔隙水中的溶解度随之增大,孔隙水中的氮含量也因而增高。但是由于地下水系统结构的特殊性,决定了地下水中逸出氮对地壳岩石应力应变具有放大作用。当地壳岩石应力增量为 $\Delta\sigma$ 时,岩石中逸出

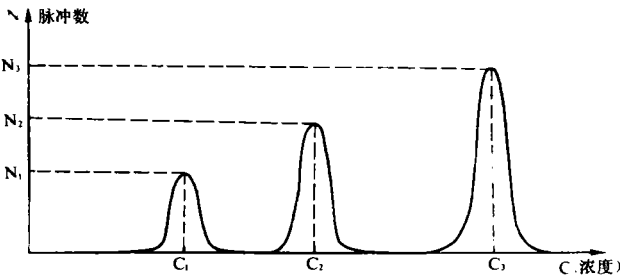


图 1 仪器对不同浓度样品反应幅度特征示意图

Fig.1 Reaction amplitude of instrument to samples with different densities.

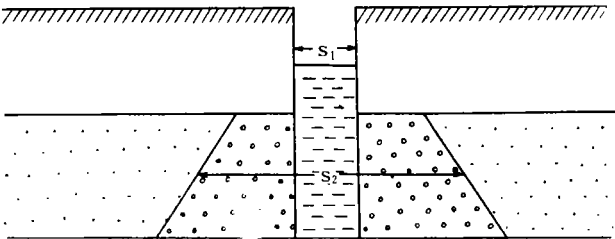


图 2 地下水系统模型

Fig.2 Model of groundwater system.

由于地壳岩石应力的增加,氮在孔隙水中的溶解度随之增大,孔隙水中的氮含量也因而增高。但是由于地下水系统结构的特殊性,决定了地下水中逸出氮对地壳岩石应力应变具有放大作用。当地壳岩石应力增量为 $\Delta\sigma$ 时,岩石中逸出

氢增量为 ΔW (ΔW 为地壳岩石应力增大时释放出的气体中所含的自由氢、封闭氢和吸附氢)。设地下水—气—岩系统中释放出 V_2 体积的气体, 则:

$$V_2 = S_2 \cdot \Delta H$$

式中 V_2 为释放出的气体体积, S_2 为井(泉)所揭示的含水层(体)的横截面积。而井口处相应的体积变化为:

$$V_1 = S_1 \cdot \Delta H$$

式中 V_1 为井口处气体体积, S_1 为井(泉)出口面积, ΔH 为 S_1 到 S_2 的距离。

而且 $S_2 = n S_1$ (n 为倍数)

又设井口处的初始氢浓度(即无应力增加时)为 W_0 , 应力增加后的氢浓度为 W , 则有如下关系式:

$$V_1 \cdot W = V_2 \cdot \Delta W + V_1 \cdot W_0$$

则 $S_1 \cdot \Delta H \cdot W = n S_1 \cdot \Delta H \cdot \Delta W + S_1 \cdot \Delta H \cdot W_0$

所以有 $W = n \Delta W + W_0$

故井口处氢浓度对地下深部氢浓度的变化有 n 倍的放大作用。同样道理, 地壳岩石所受应力降低, 地下深处岩石中氢释放量减小, 则井口处氢浓度对其减小的量同样具有 n 倍的放大作用, 使井口处的氢浓度降低显著。而对于溶解氢而言, 地下水系统结构对其浓度的变化没有影响和调制作用, 因为溶解氢是以水载的形式自地下深部向地表迁移。因此, 当地壳岩石应力应变增强时, 考虑到水的脱气等效效应后, 假设地下水中氢的浓度变化量为 ΔW , 则岩石应力变化后地下水在井口处的溶解氢浓度为:

$$W = \Delta W + W_0$$

式中 ΔW 为深部地下水中溶解氢浓度的变化量, W_0 为岩石应力变化前井口处地下水中溶解氢浓度。溶解氢的变化量在整个发生应力应变的含水水体中都是几乎一样的(同时考虑地下水自深部到地表的脱气作用)。

4 不同形式氢的映震效能的差异性

研究结果表明, 不论是在地壳岩石应力应变的正常阶段, 还是在异常变化阶段, 地下水中逸出氢和溶解氢对地壳岩石应力应变的反应灵敏程度具有很大的差异性。

(1) 在正常变化阶段, 地壳岩石所受的比较明显的周期应力应变现象是地球固体潮的影响, 由日月引潮力所引起的地壳岩石呈有规律的变化, 由此必将引起岩石介质体系中流体的响应。地下水中的逸出氢和溶解氢均会产生相应的变化。通过多台长时间的对比观测发现, 地下水中逸出氢的潮汐变化更具有普遍性, 并且其变化形态清晰完整, 而地下水中溶解氢只是在干扰小的时段才能够显示出潮汐变化的特征来。

(2) 在异常变化阶段, 地下水中逸出氢和溶解氢对地壳岩石的异常应力应变的反应灵敏程度及异常幅度大小均显示出了明显的差异性。对几次震例的研究发现, 地下水中逸出氢不仅能够反映较强地震(如 1989 年 7 月 21 日北京海坨山 4.5 级地震, 1989 年 10 月 18 日山西大同—阳高 6.1 级地震, 1991 年 11 月 9 日山西榆次 4.8 级地震等), 而且能够反应一些小震, 甚至于一些小震群(如 1991 年 11 月 13 日至 15 日云南洱源发生的 9 次小震, 最大震级为 $M_L 3.2$)。但是溶解氢除了对上述几次较强地震有所反映外, 对小震及小震群均没有反映(图 3)。此外, 震前地下水中逸出氢的前兆异常形态特征比溶解氢的更为明显, 异常幅度大, 易于识别和辨认。表 2 列出了几次地震前地下水中逸出氢和溶解氢异常幅度, 从表 2 中可以明显地看出, 逸出氢

的映震效能大大高于溶解氡。

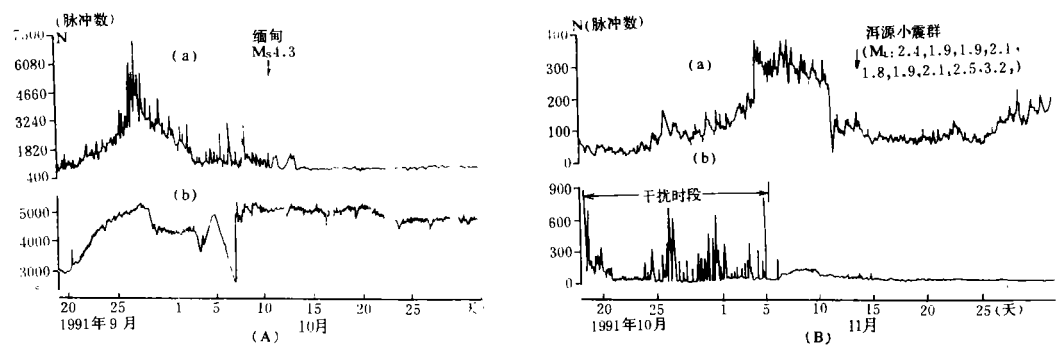


图 3 震前逸出氡(a)和溶解氡(b)异常特征曲线
(A)保山井; (B)洱源井

Fig. 3 Curves of anomalous character of escaping radon(a) and dissolved radon(b) before earthquakes.

表 2 几次地震前地下水中逸出氡和溶解氡异常幅度对比表(超出基值的倍数)

测项	地震	大同—阳高	山西榆次	缅甸	洱源
		6.1	4.8	4.3	小震群
逸出氡	异常	10	9.8	7.0	4.0
溶解氡	幅度	2.4	4.0	2.5	0

5 结束语

综上所述,氡在地下水中具有不同的存在形式,且不同形式的氡其含量、赋存介质、运移速率和运移机理以及传递地壳应力应变变化的机理具有很大的差异,因此,决定了它们反应地壳应力应变变化和映震效能上的差异。所以选择何种形式的氡进行地震监测预报更有利,更能灵敏地反映地下深部信息是一个值得深入探讨的问题。依据对大量的资料的分析和对比研究,可以认为,地下水中逸出氡反映地壳应力应变灵敏程度大于溶解氡,震前逸出氡的异常幅度明显大于溶解氡,因此,地下水中逸出氡的映震效能明显高于溶解氡,它是一种比溶解氡反映地震更加灵敏的新信息源。因此,逸出氡作为新的地震前兆观测项目,具有广阔的发展前景,观测地下水中的逸出氡可能会更易获得地下深部的信息。今后应对逸出氡进行深入的研究,早日在地震监测与预报中应用,这无疑将对提高水化学预报地震的水平起到促进作用。

本项工作是在张炜研究员的指导下完成的,特表示衷心的感谢。
(本文 1994 年 8 月 26 日收到)

参考文献

1 Г М 瓦尔沙尔.地震水文地球化学前兆.张炜等译.北京:地震出版社,1989.
2 张炜,等.水文地球化学预报地震的原理与方法.北京:教育科学出版社,1988.
3 Л С Балашов, Н М Елманова. Об организации режимных наблюдений за содержанием радона в подземных водах при поиске предвестников землетрясений гидрогеохимические предвестники землетрясений. Москва, Наука, 1985.

THE STUDY ON DIFFERENT EXISTENCE FORMS OF RADON IN GROUNDWATER AND DIVERSITY OF REFLECTING EARTHQUAKE

Zhang Xinji and Zhang Hui

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou,SSB, Lanzhou 730000*)

Abstract

In this paper, the different existence forms of radon in underground water are expounded, the mechanisms in which different forms of radon travel and pass the information of crustal stress and strain are discussed and the differences of their reflecting earthquake efficiency are studied. The results show that escaping radon reflects better the crustal stress and strain and earthquake than dissolved radon. Thus, escaping radon can become a new and sensitive reflecting earthquake component of observation net of hydrochemistry for predicting earthquake.

Key words: Ground water, Radon, Gas geochemical surveys, Reflecting earthquake ability

(上接第 7 页)

FEATURES OF HYDROCHEMICAL PRECURSORY FIELDS FOR STRONG EARTHQUAKES

Wang Changling, Tao Shufen, Zhang Shiqin, Zhang Xinji, Zhang Hui and Zhang Peishan

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou,SSB,Lanzhou 730000*)

Abstract

The features of Hydrochemical precursory fields of the Tangshan and Songpan $M_s > 7.0$ earthquakes have been studied. The results show that the precursory fields of the two earthquakes have the similar property. The proportion of long-term and imminent anomalies to all anomalies is inversely proportional to epicentral distances. The long-term and imminent anomalies in the focal areas emerge earlier than those in the area far away from foci. All the long-term anomaly patterns show gradually rising. The formation of hydrochemical precursory field has something to do with regional stress field, but has even closer relation with focal stress field. Focal stress field in the precursory process may play a main role.

Key words: Strong earthquake, Hydrochemistry, Earthquake precursor, Anomalous character, Precursory field