

汶川映秀地震台井孔逸出氢观测实验*

陈学芬¹, 吴微微^{1*}, 刘雪梅¹, 赵晶², 赵天霞², 梁宏¹, 黄雪影¹

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 西昌地震中心站, 四川 西昌 615000)

摘要: 为进一步认识汶川余震区破碎断裂带逸出氢的动态特征, 选择位于北川—映秀断裂的映秀地震台观测井开展井孔逸出氢观测实验。实验数据显示: 映秀台井孔逸出氢浓度较高, 日变幅较大且具有明显的日变规律, 呈现与气压变化同步及负相关的特征, 日变形态与气温、水温、静水位相关性较小。通过不同仪器与采样方式进行观测实验, 结果表明: 映秀地震台井孔逸出氢浓度动态清晰、测值平稳, 作为地震前兆观测地下逸出氢项目是可行的。

关键词: 断层气; 井孔逸出氢; 氢浓度; 实验观测; 影响因素

中图分类号: P315.724

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)04-0638-06

0 引言

在地球演化过程中, 地球内部气体及其挥发组分主要沿活动板块、块体边界、活动断裂及其他地壳薄弱地带向地球表面迁移和释放(陈万春, 1996)。断裂带的裂隙发育是地热流体垂向运移和气体排放的良好通道(Tao *et al.*, 2005), 构造活动和地震活动强烈的断裂带及大地震的震中区是断层气释放强度较高的区域。在地震孕育过程中, 震中区的岩石力学性质发生变化, 断层气在地球内部压力作用下向外释放, 引起震中区附近大气组分(Rn, He, H₂, Hg, CO₂, CO等)改变, 从而为地震预测提供依据, 使断层气观测成为地震前兆监测的有效手段之一(汪成民等, 1991; 汪成民, 李宣瑚, 1991)。

氢(H₂)具有粒子半径最小、质量最轻、迁移速度最快等优越性(蒋凤亮等, 1989)。空气中氢的含量一般为0.5 ppm, 地壳中氢的含量是大气中的几千至几十万倍, 并且主要沿断裂带分布, 特别是沿现今活动的断裂带和活动板块边界带集中分布和大量释放, 与地震活动关系密切(车用太等, 2015; Li *et al.*, 2018)。氢在土壤及地下水中的背景值较低, 因此, 其出现异常的幅度较高, 异常特征显著, 易于被识别(Satake *et al.*, 1984;

Ito *et al.*, 1999; Hirose *et al.*, 2011; 王基华, 孙凤民, 1991; 范树全等, 1993; 刘耀炜等, 2012; 范雪芳等, 2012)。

连续观测痕量氢仪器能够记录氢浓度的微动态变化过程, 使连续观测氢浓度成为可能。目前, 在山西、新疆、云南、四川等地均进行了断层气氢的示范性实验观测, 取得了较好效果(范雪芳等, 2016, 2020)。氢的逸出浓度与断层活动、地震活动关系密切, 具有强烈的时空不均性, 涨落现象突出, 在非地震活动时期氢浓度表现出微弱中有差异、平稳中有起伏的动态特征(汪成民等, 1991)。川滇国家地震预报实验场高精度氢观测台阵的资料显示, 在安宁河断裂和则木河断裂上的5个野外断层土壤逸出气观测点的氢浓度背景值为0.1~0.8 ppm, 背景值较低且稳定(柯云龙等, 2018; 梁宏等, 2018)。中强地震后在震区能探测到高浓度氢的分布(王先彬等, 1992; 刘耀炜等, 2012)。2018年汶川地震后, 龙门山断裂带一直是国内外学者们重点关注的区域, 地震形成的断裂破碎带利于开展断层气观测。为了进一步获取汶川余震区断裂带逸出氢的动态特征, 笔者选择位于汶川映秀地震台的观测井开展断层井孔逸出氢的实验观测, 并验证在断裂带上的井孔中开展地下逸出氢观测的可行性。

* 收稿日期: 2019-11-22.

基金项目: 四川省地震局地震科技专项(LY2011), 川滇国家地震预报实验场专项经费(20150113)和四川省地震科技创新团队专项(201804)联合资助.

✉ 通讯作者: 吴微微(1982-), 女, 高级工程师. 主要从事地震预报研究. E-mail: wuweimei06@mails.gucas.ac.cn.

1 映秀地震台概况

映秀地震台位于四川省阿坝藏族羌族自治州汶川县映秀镇 (103.48°E, 31.06°N), 距离2008年汶川8.0级地震微观震中9 km, 地处龙门山断裂带中段的北川—映秀断裂。北川—映秀断裂总长约300 km, 总体走向N35°-45°E, 倾向NW, 由数条次级逆断裂组成叠瓦状构造, 是龙门山构造带几条主干断裂活动构造地貌中保存最为完好、活动性较强的断裂, 也是2008年汶川8.0级大地震的主要发震断裂。汶川8.0级地震发生后, 破裂自映秀SW开始, 沿龙门山构造带的北川—映秀断裂向NE方向扩展, 形成长约220~240 km的地表破裂带, 其中北川—映秀断裂的北中段全部破裂贯通 (徐锡伟等, 2008)。

2017年7月, 映秀地震台建成观测井, 井深400 m, 开孔直径219 mm, 终孔直径146 mm, 净空直径 $\lt 150$ mm, 垂直度90° (偏差度 $\gt 3^\circ$)。井孔岩性主要为花岗岩, 整个井孔穿过龙门山断裂带, 岩石比较破碎, 观测井内全井安装钢管护壁, 0~100 m采用217 \times 7钢管, 100~400 m采用168 \times 7滤水钢管护壁。观测井目前有静水位和水温观测项目, 静水位埋深68 m左右, 水位传感器安装在水面以下约8 m处 (探头距井口约为76 m), 水温传感器安装在水面以下100 m处。

2 实验数据

2.1 仪器设置

映秀地震台使用ATG-6118H型痕量氢在线分析仪进行实验观测, 仪器检出限为 0.01×10^{-6} (0.01 ppm), 测量范围0.01~5 000 ppm, 平均相对误差 $\delta \leq 5\%$ 、线性回归直线相关系数 $\gamma^2 \geq 0.996$ 。每次采样前, 抽气泵先将气路中的残余气体抽排到空气中, 再将新气体样品采集到检测单元测试氢浓度。检测工作流程为: 抽气排空→采样→检测。该仪器配置环境气温传感器和气压传感器, 同步给出氢浓度、气温和气压观测值。

映秀地震台观测井上盖有观测房, ATG-6118H型痕量氢在线分析仪放置于观测房内的井孔旁边, 采样气路由外直径3 mm、内直径2 mm、长0.2 m的聚四氟乙烯管转接外直径6 mm、内直径

为4 mm、长0.6 m的聚四氟乙烯管组成, 采样端伸至井下0.3 m。通信采用无线通信方式, 可远程完成数据采集与仪器控制。

ATG-6118H型痕量氢在线分析仪的测量时间间隔可设置为10, 20, 30, 60, 120 min, 设置采样间隔为60 min, 即整点采样, 采样时间设置为30 s。由于观测井孔安装有静水位与水温观测设备, 因此井孔未做密封处理, 采样端直接安放至井孔内并固定, 直接抽取井孔内逸出气进行氢浓度测定。

2.2 数据分析

仪器安装后工作状态稳定, 数据记录连续、完整。氢浓度日均值为1.5~2.8 ppm, 每日最高值可达2~9 ppm, 高于空气值几倍至十几倍, 最低值为0.3~0.5 ppm, 最低值与空气背景值相当。与范雪芳等 (2014a, b) 在山西中条山山前断裂5个土壤逸出氢观测点和川滇国家地震预报实验场项目在安宁河断裂带与则木河断裂带上的5个野外断层土壤逸出氢观测示范点观测到的氢浓度背景值数据 (柯云龙等, 2018) 进行对比发现, 映秀地震台并孔逸出氢浓度的背景值明显偏高 (表1), 且日变幅较大。

以2018年9月12—16日的数据为例, 用ATG-6118H型痕量氢在线分析仪产出的氢气浓度、

表1 不同测点氢气浓度对比

Tab. 1 Comparison of hydrogen concentration at different measuring points

测点名称	所属断裂	观测孔(井)深/m	观测方式	背景值/ppm
夏县1孔	中条山山前断裂	7.4	土壤逸出	1.50
夏县2孔	中条山山前断裂	4.0	土壤逸出	0.65
夏县3孔	中条山山前断裂	8.6	土壤逸出	0.59
赤峪孔	中条山山前断裂	7.0	土壤逸出	0.25
东郭孔	中条山山前断裂	6.5	土壤逸出	1.44
羊福山	安宁河断裂	8.0	土壤逸出	0.69
大箐梁	则木河断裂	8.0	土壤逸出	0.17
小庙1	安宁河断裂	8.0	土壤逸出	0.54
小庙2	安宁河断裂	8.0	土壤逸出	0.66
小庙3	安宁河断裂	8.0	土壤逸出	0.56
映秀地震台	北川—映秀断裂	400.0	井孔逸出	2.48

注: 表中部分数据来自范雪芳等 (2014a, b)、柯云龙等 (2018)。

气温、气压数据，与珠海泰德水位水温观测仪产出的水温、静水位数据，绘制氢气浓度与气压、水温、静水位、气温的整点值对比曲线图（图 1）。

同时，以 2018 年 12 月的数据为例，绘制氢气浓度、气压、静水位和气温的整点值月观测曲线如图 2 所示，综合分析观测数据发现：

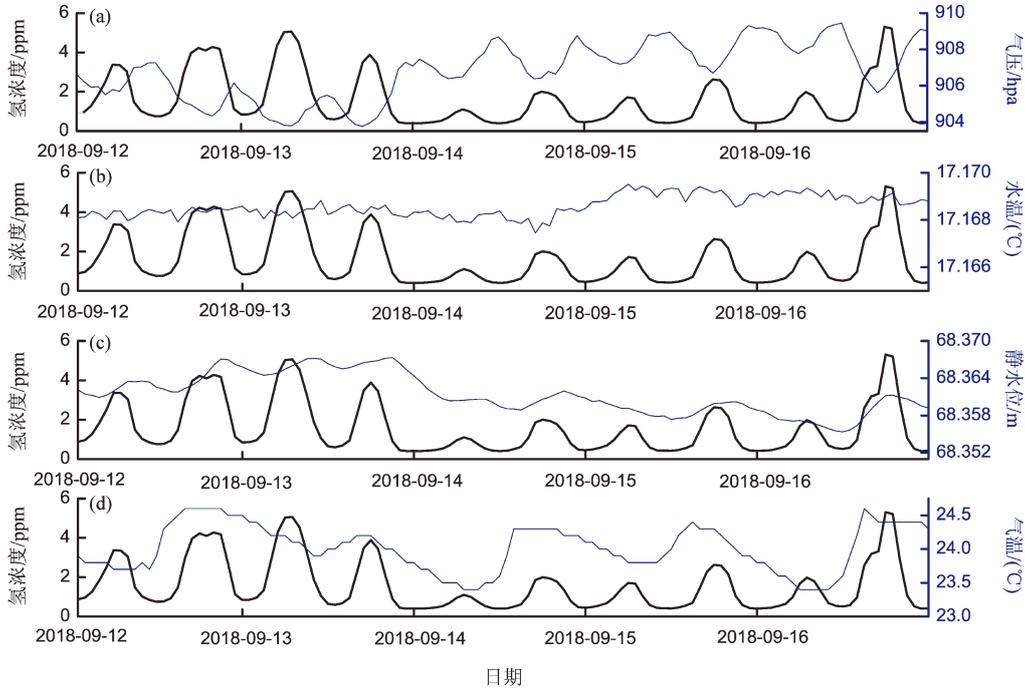


图 1 2018 年 9 月 12—16 日氢浓度与气压 (a)、水温 (b)、静水位 (c)、气温 (d) 对比曲线

Fig. 1 Comparison curves of hydrogen concentration with air pressure (a), water temperature (b), static water level (c) and air temperature (d) from Sep. 12 to Sep. 16, 2018

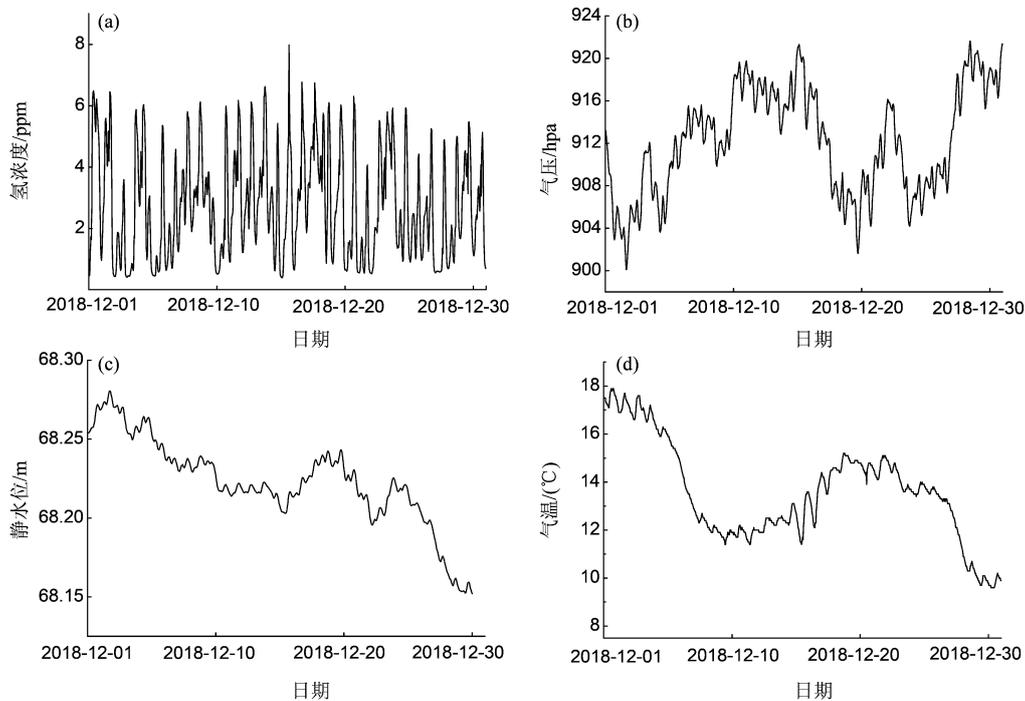


图 2 2018 年 12 月氢浓度 (a)、气压 (b)、静水位 (c)、气温 (d) 观测曲线
Fig. 2 Curves of hydrogen concentration (a), air pressure (b), static water level (c) and temperature (d) on Dec. , 2018

(1) 映秀地震台井孔逸出氢浓度动态平稳，有明显的日变规律，日变形态为光滑的双波曲线形态。由图1可见，每日上午5时左右氢浓度达到第一高值后开始逐步下降，上午11时左右降至第一低值后逐渐增加，下午17时左右达到第二高值后下降，至23时左右为最低值，如此循环。每日最低值为0.3~0.5 ppm，接近于空气值，最高值高于空气值几倍至十几倍，在2~9 ppm 浮动，日变幅较大。

(2) 实验观测相同时间段内氢浓度与气压测值出现准同步现象，曲线变化形态基本一致，但方向相反，即在气压最高值附近，氢浓度最低，气压最低值附近，氢浓度最高(图1a)。

(3) 从图1b可看出，在测试期间水温一直保持17.168℃左右的稳定变化，但氢浓度有明显起伏变化，两者之间的关联性不大。图1c、d显示，氢浓度与静水位、气温有一定的相关性，但相关性较小。

(4) 从图2可以看出，在地震平静期月尺度及更长时间尺度上，氢浓度在0.3~9 ppm 起伏波动，没有出现随气温、气压、静水位的趋势性变化。

3 逸出氢井孔观测可行性分析

为了进一步验证水位观测井开展井孔逸出氢观测的可行性，笔者在实验观测期间分别进行了测点空气背景值观测实验、井口与井下5 m 不同采样深度逸出氢观测实验、不同仪器对比观测实验。由于映秀地震台气温、水温、静水位对氢气浓度影响不显著(图1b~d)，因此，主要通过氢浓度与气压关系分析氢观测结果的可靠性。

3.1 测点空气背景值观测实验

在测点仪器安装调试阶段，首先进行空气背景值的测试。仪器开机预热稳定后不连接井下气路，直接抽取观测室空气进行测定，采样间隔设

置为30 min，采样时间设置为30 s，观测5组测值，测得氢浓度平均值为0.503 ppm。连接井下气路正常观测一段时间后，再次断开井下气路，观测24 h，对室空气值进行观测，测得氢浓度平均值为0.537 ppm，空气测值变化平稳，未表现出与气压的相关关系(图3)。测点空气背景值实验结果证明仪器工作正常，不受气压影响。

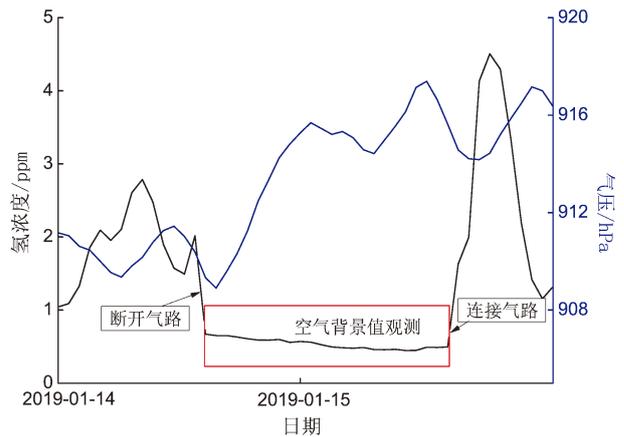


图3 空气背景值观测实验中氢浓度与气压对比曲线

Fig. 3 Comparison curve of hydrogen concentration and pressure in air background observation experiment

3.2 井下不同采样深度观测实验

仪器首次调试安装设置如下：气路总长度为0.8 m，井下深度为0.3 m，采样间隔60 min，采样时间30 s。安装完成后，氢浓度曲线显示氢浓度出现规律的日变特征，其形态为光滑的双波曲线，与气压数据曲线形态相似、方向相反。2018年9月17日，更改气路长度，气路总长5.5 m，井下深度5.0 m，采样间隔60 min，采样时间30 s。观测发现，井下深度为0.3 m和5.0 m，氢浓度变化不大，观测曲线形态相似，呈现与气压反向变化的日动态特征(图4)。

此实验结果说明测点在井口与井下5.0 m 观测到的氢浓度相当(表2)，观测井中的氢浓度与气压有较明显的相关关系。

表2 不同采样深度氢浓度对比

Tab. 2 Comparison of hydrogen concentration at different depths

实验时段	气路总长/m	井下深度/m	最大值/ppm	最小值/ppm	均值/ppm
2018年9月12—17日	0.8	0.3	5.30	0.39	1.61
2018年9月17—22日	5.5	5.0	6.09	0.29	1.63

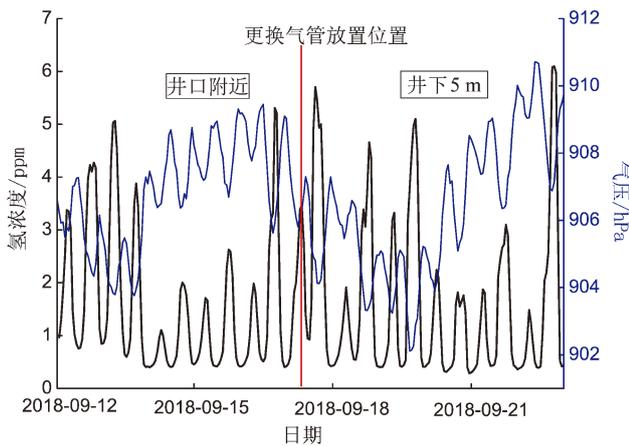


图4 不同采样深度氢浓度与气压对比曲线

Fig. 4 Curves of hydrogen concentration and pressure at different depths

3.3 不同仪器对比观测实验

笔者于2019年1月14—15日进行了ATG-3000型便携式测氢仪与ATG-6118H型痕量氢在线分析仪对比观测实验。这两种仪器为同一厂家生产,便携式测氢仪主要用于大气、水和沉积物中痕量氢的野外流动观测或现场测定,特点是体积小、灵敏度高、功耗低、数据自动存储、操作简单。仪器检出限为0.005 ppm,测量范围0~1 000 ppm,平均相对误差 $\delta \leq 10\%$ 、相关系数 $\gamma^2 \geq 0.996$ 。

实验过程中断开ATG-6118H分析仪井下气路,原气路连接至ATG-3000测氢仪进行观测。ATG-3000测氢仪采样间隔设置为60 min,采样时间设置为30 s,观测持续24 h。图5b显示氢浓度曲线依然清晰地记录到了气压的影响,测值与气压测值出现准同步反向变化,与ATG-6118H分析仪观测到的动态相似(图5a)。

不同型号的氢观测仪器对比观测实验证明,水位观测井可以观测到氢浓度变化的动态特征,这对于获取地下岩石介质在构造活动中氢气释放特征具有重要意义。

4 结论

本文通过对汶川映秀地震台井孔逸出氢进行观测实验,得到以下结论:

(1) 映秀地震台井孔逸出氢实验观测数据动态清晰、氢浓度较高、日变幅较大,测值明显高于山西中条山山前断裂、四川安宁河断裂和则木

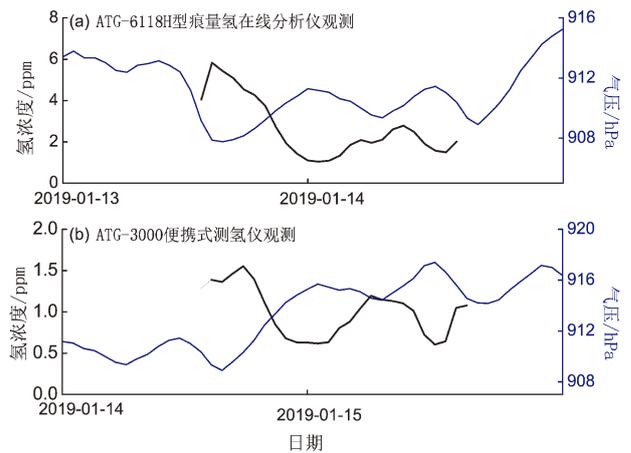


图5 不同仪器氢浓度与气压对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of hydrogen concentration and pressure in comparative observation experiment

河断裂等的观测结果。氢气以汶川地震形成的断裂破碎带为通道向地表运移扩散而产生高值,断裂带内逸出氢的浓度与断裂的破裂程度、断层活动性和地震活动性密切相关,不同构造环境下氢浓度的背景与其动态特征各不相同。

(2) 实验观测结果表明,在非地震活动时期稳定的观测条件下,映秀台井孔逸出氢浓度具有规律的日动态,呈现出与气压变化相似但反向的典型日变特征,且氢浓度日动态与气压相关性显著,与气温、水温、静水位相关性不明显。在月尺度及更长时间尺度上,氢浓度不随气温、气压、静水位的趋势变化而变化,这一特征值得进一步研究分析。

(3) 不同型号的氢观测仪器均能有效观测到氢浓度变化的动态特征,表明活动断裂带上的钻孔揭示的岩层中氢浓度较断裂带浅层土壤气中的氢浓度背景值高,这也为获取岩石受构造活动及其应力应变作用过程中氢浓度的变化提供了良好的观测场地,为拓展氢观测站点选择提供了重要依据。

本文获得了映秀实验点井孔逸出氢浓度的动态特征,证明了在断裂带上的井孔中开展地下逸出氢气观测是可行的,但是否可以有效反映和揭示龙门山断裂带气体运移过程及其机理,还需使用更长时间的观测数据进行验证与分析。

本文在撰写过程中得到刘耀炜研究员和李大虎博士的帮助,在此向他们表示衷心感谢。

参考文献：

- 车用太,刘耀炜,何镛. 2015. 断层带土壤中 H_2 观测——探索地震短临预报的新途径[J]. 地震, 35(4): 1-10.
- 陈万春. 1996. 地震断层气监测的现状与展望[J]. 四川地震, (2): 56-61.
- 范树全,苏盛虎,李霓. 1993. 京棉二厂井氨、氢气体的地震前兆异常特征及与地震关系的研究[J]. 地震学报, 15(4): 490-497.
- 范雪芳,黄春玲,刘国俊,等. 2012. 山西夏县痕量氢观测资料的初步分析[J]. 山西地震, 7(3): 7-12.
- 范雪芳,李自红,刘国俊,等. 2014a. 断层气氢浓度观测技术试验研究[J]. 中国地震, 30(1): 43-54.
- 范雪芳,刘国俊,黄春玲,等. 2014b. 山西东郭断裂气氢浓度异常调查与研究[J]. 地震研究, 37(2): 171-177.
- 范雪芳,张磊,李自红,等. 2016. 断裂带土壤气高精度氢异常分析[J]. 地震地质, 38(2): 303-315.
- 范雪芳,杨芷萌,李宏伟,等. 断层带土壤 H_2 浓度变化特征及影响因素研究[J]. 地震研究, 43(2): 302-309.
- 蒋凤亮,李桂如,王基华,等. 1989. 地震地球化学[M]. 北京:地震出版社, 11, 51-61.
- 柯云龙,刘耀炜,张磊,等. 2018. 川滇地震预报实验场高精度氢观测台阵建设分析[J]. 地震, 38(3): 35-48.
- 梁宏,陈学芬,刘雪梅,等. 2018. 高精度氢实验台网观测数据浅析[J]. 四川地震, (4): 1-7.
- 刘耀炜,方震,张永久,等. 2012. WFSO 钻孔气体氢浓度动态与断裂构造及地震的关系[J]. 国际地震动态, (6): 270.
- 汪成民,李宣瑚,魏柏林. 1991. 断层气测量在地震科学中的应用[M]. 北京:地震出版社.
- 汪成民,李宣瑚. 1991. 中国断层气测量在地震科学研究中的应用现状[J]. 中国地震, 7(2): 19-23.
- 王基华,孙凤民. 1991. 张家口南部地区活动断裂带气体地球化学特征[J]. 地震工程学报, 13(1): 26-31.
- 王先彬,陈贱发,徐胜,等. 1992. 地震区温泉气体的地球化学特征[J]. 中国科学:化学, 22(8): 849-854.
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等. 2008. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 597-629.
- Hirose T, Kawagucci S, Suzuki K. 2011. Mechanoradical H_2 generation during simulated faulting: implications for an earthquake-driven subsurface biosphere [J]. Geophysical Research Letters, 38: (L17): 303.
- Ito T, Nagamine K, Yamamoto K, et al. 1999. Preseismic hydrogen gas anomalies caused by stress-corrosion process preceding earthquakes[J]. Geophysical Research Letters, 26(13): 2009-2012.
- Li D, Liao H, Ding Zh, et al. 2018. Joint inversion of the 3D P wave velocity structure of the crust and upper mantle under the Southeastern Margin of the Tibetan Plateau using regional earthquake and teleseismic data[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 92(1): 16-33.
- Satake H, Ohashi M, Hayashi Y. 1984. Discharge of from the Atot-sugawa and Ushikubi Faults, Japan, and its relation to earthquakes[J]. Pure and Applied Geophysics, 122(2/4): 185-193.
- Tao M, Xu Y, Shi B, et al. 2005. Characteristics of mantle degassing and deep-seated geological structures in different typical fault zones of China[J]. Science in China(Series D), 48(7): 1074-1088.

Observational Experiment for Escaped Hydrogen from Wellbore at Wenchuan Yingxiu Seismic Station

CHEN Xuefen¹, WU Weiwei¹, LIU Xuemei¹, ZHAO Jing²,
ZHAO Tianxia², LIANG Hong¹, HUANG Xueying¹
(1. Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China)
(2. Xichang Seismic Central Station, Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract

In order to further understand the dynamic characteristics of escaped hydrogen from the fractured fault zone in the Wenchuan aftershock region, we selected the observational hole (the Yingxiu Seismic Station) which located in the Beichuan-Yingxiu fault, and carried out the observation of escaped hydrogen from the wellbore. The experimental data show that the hydrogen concentration of the Yingxiu well is high, the daily variation amplitude is large and has obvious daily variation law, showing the characteristics of synchronous and negative correlation with the change of air pressure, the daily variation is less correlated with temperature, water temperature and static water level. Observational experiments by different instruments and sampling methods show that, the dynamic characteristics of hydrogen concentration escaping from the observation well at Yingxiu seismic station is clear and the measured value is stable, as an earthquake precursor, it is feasible to observe hydrogen escaping from underground.

Keywords: fault gas; escaped hydrogen of wellbore; hydrogen concentration; experimental observation; interference factor