

方震,黄显良,陶月潮,等. 2023. “霍山窗”地区 H_2 浓度异常与小震活动关系分析[J]. 地震研究, 46(2): 237–244, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0025.

Fang Z, Huang X L, Tao Y C, et al. 2023. Analysis of soil hydrogen anomaly in the Huoshan Seismic Window Area[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(2): 237–244, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0025.

“霍山窗”地区 H_2 浓度异常与小震活动关系分析*

方震^{1,2}, 黄显良^{1,2,✱}, 陶月潮¹, 李伸亮³, 陶方宇⁴, 杨源源¹, 朱厚林⁴, 陆栋梁⁴

(1. 安徽省地震局, 安徽 合肥 230031; 2. 蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽 蒙城 233500;
3. 合肥地震监测中心站, 安徽 合肥 230000; 4. 金寨地震监测中心站, 安徽 金寨 237300)

摘要: 基于2018年12月4日至2020年8月15日“霍山窗”地区全时段的断裂带土壤气 H_2 的观测资料, 根据测量值的分布范围对资料的可靠性进行了评价, 对其气象影响因素也做了分析。结合“霍山窗”地区的小震集中活动, 分析了断裂带 H_2 异常与小震活动性的关系。结果表明: 土地岭—落儿岭断裂带 H_2 浓度前兆异常幅度较大, 对观测点所在断裂上的地震活动反应灵敏, 映震效果较好。研究区变质岩含有丰富的 H_2 气源, 应力积累加速了断裂带内 H_2 的释放, 张性断裂为 H_2 的运移提供了良好的通道。

关键词: 断层 H_2 浓度; H_2 来源; 小震活动; “霍山窗”地区

中图分类号: P313.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)02-0237-08

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0025

0 引言

地球内部存在着力学和物理化学方面的动态平衡。地球内部通过固、液、气的相互作用、能量传递和物质交换, 把深部信息传递到地球浅部区域(李民, 2007; 董树文等, 2008; 魏乐军等, 2008; 周晓成等, 2012; 鲍志诚等, 2022)。地下流体是地球内部最活跃的物质, 与地球内部活动关系密切(张泽明, 1988; 罗立强等, 2004a, b; Tang et al, 2014)。地球上大部分地区, 地球的脱气是以小规模、低速度的形式进行的, 而在地壳的某些薄弱部位, 如洋中脊、火山、温泉、活动断裂带等, 脱气非常强烈(Chiodini et al, 2010; Chavrit et al, 2014)。随着断裂带气体观测技术和气体逸出理论不断发展, 利用断裂带上的气体以及溶解于水、吸附于土壤中的气体的浓度变化开展地震预测研究已经成为国内外研究的热点

(Lombardi, Voltattorni, 2010; Zhou et al, 2016; 车用太等, 2015; 王博, 周永胜, 2017)。

20世纪70年代, 中国、日本、美国、前苏联学者对断裂带 H_2 观测及其与构造活动的关系进行了研究(林元武等, 1994; 栗启初等, 1992; Wakita et al, 1980; Jiang, Li, 1981; Sato, McGee, 1981; Shirokov et al, 2015; Fu et al, 2017), 认为 H_2 含量的异常变化能够作为一种监视断裂活动(李营等, 2009; 孙小龙等, 2016; 周晓成等, 2017; Kita et al, 1980; Dogan et al, 2007; Ignatenko et al, 2016)、地震短临预测研究(张培仁, 王基华, 1993; 车用太等, 2002; 王喜龙等, 2022; Sugisaki, 1984; King, 1986; Ito et al, 1999; McMahon et al, 2016)和隐伏断层探测的有效手段(陈刚, 严佳奎, 1995)。王基华等(1982a, b)、车用太等(1999, 2002)、杉崎隆一等(1986)、杜乐天(2005)、张培仁和王基华(1993)、范雪芳等(2012, 2016)以及邵济安等(2010)对 H_2 的前兆异常特征与断层

* 收稿日期: 2022-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41802224); 地震预测开放基金项目(AH22030D); 武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站开放研究基金(WHYWX202110)。

第一作者简介: 方震(1984-), 高级工程师, 主要从事地震地下流体与地球化学研究。

E-mail: fzhen215@126.com.

✱通讯作者简介: 黄显良(1972-), 正研级高级工程师, 主要从事地震活动性研究. E-mail: hxl818@sina.com.

活动以及地壳应力变化水平进行了研究。

从 2013 年开始, 由杭州超距科技有限公司研制的 ATG-6118H 型痕量氢气在线分析仪在中国近 10 个省、市、自治区近 20 个台站试用, 产出的 H_2 动态数据可靠, 观测值异常与地震活动关系明显, 地震预测效果良好 (车用太等, 2015)。本文利用该仪器在小震频发的“霍山窗”地区进行连续观测, 分析 H_2 浓度变化与小震集中活动的关系, 对 H_2 的地震前兆机理进行探讨。

1 研究区概况与观测方法

1.1 地质概况

“霍山窗”地区 ($31.0^\circ \sim 31.83^\circ N$, $115.0^\circ \sim 116.5^\circ E$) 地处大别山隆起地块、华北地块与扬子地块接触带附近的北大别山沉降带南缘 (陆镜元等, 1992), 华北地块和扬子地块在此处碰撞发生造山作用。郟庐断裂带位于大别造山带东缘, 长期控制两侧的构造格局。区内主要发育有 NW 向的肥西—韩摆渡断裂和梅山—龙河口断裂、NW 向青山—晓天断裂、NE 向落儿岭—土地岭断裂。梅山—龙河口断裂断层面向南西陡倾, 性质为正断兼左旋走滑, 断裂沿线呈现强烈的动力变质作用, 糜棱岩、碎裂岩和断层泥发育 (李浩民, 2018)。落儿岭—土地岭断裂地表断面走向为 $50^\circ \sim 60^\circ$ (南东或北西), 倾角为 $64^\circ \sim 84^\circ$, 深部断面产状目前尚不清楚。沿该断裂线状沟谷极为发育, 构造变形带也有发育, 韧性变形的糜棱岩、脆性变形的角砾岩和较崭新时代形成的断层泥均有发育, 断裂沿线历史上曾发生一系列中强地震。受特殊的构造和动力学环境影响, 研究区地震活动比较活跃。1336 年以来共发生 9 次 5 级以上地震和 2 次 6 级以上地震, 包括 1652 年霍山 6 级地震和 1917 年霍山 $6\frac{1}{4}$ 级地震。刘泽民等 (2015) 通过震源机制解、余震精定位和地震等烈度线等分析认为, 2014 年 4 月 20 日霍山 $M_s 4.3$ 地震是在区域应力场的作用下, 在落儿岭—土地岭断裂发生的 1 次右旋张性活动 (图 1)。

1.2 观测点概况

H_2 观测点选址与断层的性质、断层是否出露以及气源等有关。首先, 观测点必须选在断层破碎带上, 如果是压性断裂, 测点必须选在断层的

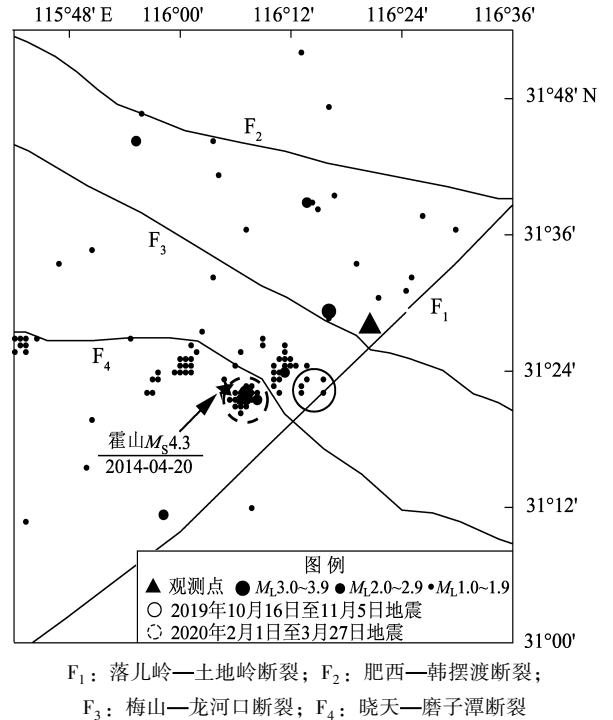


图 1 研究区 H_2 观测点区域地质构造及 2008 年 12 月 4 日至 2020 年 8 月 15 日 $M_L \geq 1.0$ 地震分布
Fig. 1 Geological settings and $M_L \geq 1.0$ earthquakes (Dec. 4th, 2008 – Aug. 15th, 2020) in the study area

上盘, 即断层活动的主动盘, 如果是隐伏断裂带, 要选在断裂带正上方, 选点误差不应超过 10 m; 岩浆岩发育区具有丰富的 H_2 气源, 更容易产生 H_2 。观测点的选址还应考虑地下水位埋深和土壤潮湿度等。总体上, 要遵循观测条件最佳、断裂破碎密度大、气量丰富的原则 (车用太等, 2015)。断层土壤气的观测点孔深的选择, 应综合考虑地貌、断层覆盖层厚度、植被、浅层地表水位等多种因素 (陈华静等, 1999)。根据“霍山窗”地区地震和断层的分布情况, 笔者实地踏勘了晓天—磨子潭断裂、落儿岭—土地岭断裂、梅山—龙河口断裂与落儿岭—土地岭断裂交汇部位。晓天—磨子潭断裂与落儿岭—土地岭断裂交汇部位多为完整基岩出露, 山体海拔较高, 施工难度较大, 且很难找到有覆盖层的断裂破碎带, 而梅山—龙河口断裂与落儿岭—土地岭断裂交汇部位地势较为平缓, 多为山村和田地, 具备施工条件。

2018 年 3 月和 9 月, 笔者在落儿岭—土地岭断裂交汇部位开展了 2 期跨断层土壤气 Rn 和 H_2 的观测 (图 2), 考虑了 Rn 和 H_2 的浓度值、地势、地下水埋深、运输的便利性、用电的方便性

等因素,观测点选址在霍山县但家庙镇观音岩村的7号高值点附近。

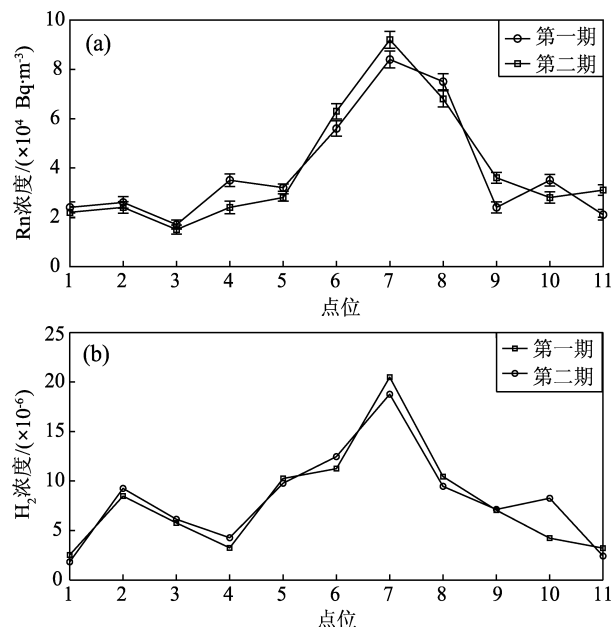


图2 流动观测土壤气 Rn (a) 和 H_2 浓度 (b) 分布
Fig. 2 Distributions of Rn concentration (a) and H_2 concentration (b) by mobile measurements

1.3 H_2 观测方法

2018年11月,笔者在7号点附近开挖了1个深2.8 m,长、宽各1 m的观测孔。为防止因浅层地表水位上升致使潮湿气体进入取样管,且便于气体流动,在集气孔底部铺设40 cm厚、透气性好的砾石层,砾石层中的气体通过扩散很快达到新的平衡。砾石层上方放置直径为0.60 m的集气装置,集气装置四周铺设双层塑料厚膜密封。集气装置上方与直径110 mm、长2.5 m的PVC集气管相连,在顶部用橡皮塞密封,用导气软管连接PVC导气管,并连接痕量氢自动分析仪。观测孔集气装置结构见方震等(2020)所述。气体富集与采样时间可在仪器上直接设定,设定采样时间间隔为1小时,1次连续10 s采集300 mL气体,抽气总气量需0.05 L。

2 观测资料可靠性及影响因素分析

2.1 观测资料可靠性分析

图3为2018年12月4日至2020年8月15日“霍山窗”地区土壤 H_2 的观测数据。从图中

可以看出,土壤 H_2 浓度含量较低,一般为 0.5×10^{-6} ,多数情况下低于 0.5×10^{-6} 。对该测点2018年12月—2020年3月产出的8 832个数据,按照不同测量值的分布进行统计,根据 H_2 浓度大小分为4个区间,利用 Grubbs 法和 $X \pm 2S$ 法计算得到背景值为 0.58×10^{-6} ,将超出2倍均方差设为高值界,为 1.26×10^{-6} 。测值大小分布情况见表1。理论上应该产出10 866个数据,实际产出8 832个数据,数据完整率为81.28%;缺数情况一般是人为因素造成的。从产出 H_2 浓度测值大小的分布范围分析,超过60%的数据位于高值界以下,超过 10×10^{-6} 的值较少,基本符合正态分布。得到的 H_2 浓度的完整率和测值分布范围进一步说明痕量氢观测仪器稳定、观测数据准确、资料可靠。

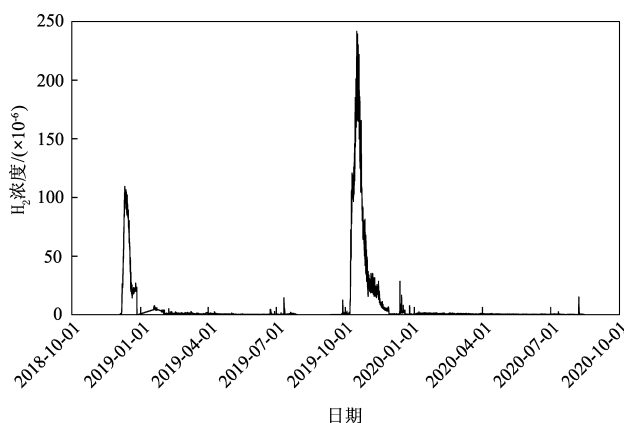


图3 “霍山窗”地区土壤 H_2 浓度观测曲线
Fig. 3 The observation curve of high-precision soil hydrogen in the area of Huoshan Seismic Window

表1 H_2 浓度 ρ 测值分布统计

Tab. 1 Statistics of distribution of high-precision soil hydrogen concentrations

测值大小/($\times 10^{-6}$)	$\rho \leq 0.58$	$0.58 < \rho \leq 1.26$	$1.26 < \rho \leq 10$	$\rho > 10$
数据个数	2 991	2 557	1 092	2 192
所占百分比 (%)	33.87	28.95	12.36	24.82

2.2 影响因素分析

相对于震源深度,地震前兆的观测深度非常有限,所以地面因素对其造成了不可避免的干扰(曹玲玲,高安泰,2014)。一般来说,断层气浓度变化受诸多因素影响,例如断层开合、采样深度、采样孔周围地温变化以及气象三要素变化等,

均会导致断层气浓度呈现规律性的年变和无规律的突变。不同地点的气体浓度年变规律也不相同,所以不同地区 H_2 浓度的多年变化特征并不是唯一的(钟骏等, 2021)。观测点的岩性、构造、覆盖层等地质因素基本固定,在采样、仪器测试条件不变的情况下, H_2 浓度的规律性变化需予以识别。从已有的观测资料来看, H_2 浓度多年季节变化在有些观测点呈现出“夏高冬低”季节规律性变化(Dogan *et al.*, 2007; 向阳等, 2018)。

本文使用的 ATG6118H 痕量氢自动分析仪内置温度和气压传感器,每产出 1 个 H_2 浓度数据,同时产出气压、温度数据。2019 年 4 月 H_2 浓度数据变化平稳,主要集中在 $0.58 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-6}$,未见高值异常,因此,本文选择该月数据进行气象因素分析(图 4)。从图 4 中可看出,高精度氢浓度与温度相关系数为 -0.4 ,与气压的相关系数为 0.4 ,温度与气压的相关系数为 -0.67 。表明 H_2 浓度与温度呈弱的负相关,与气压呈弱的正相关。由于观测时间较短,2019 年出现高出背景值几百倍的异常,未能看出季节性变化规律。而且,从震例总结的 H_2 异常幅度通常都达到正常背景值的几倍、十几倍、几十倍甚至上百倍(车用太等, 2015),因此,7 号观测点季节性变化或气象因素引起的规律性变化不影响 H_2 高值异常的识别。

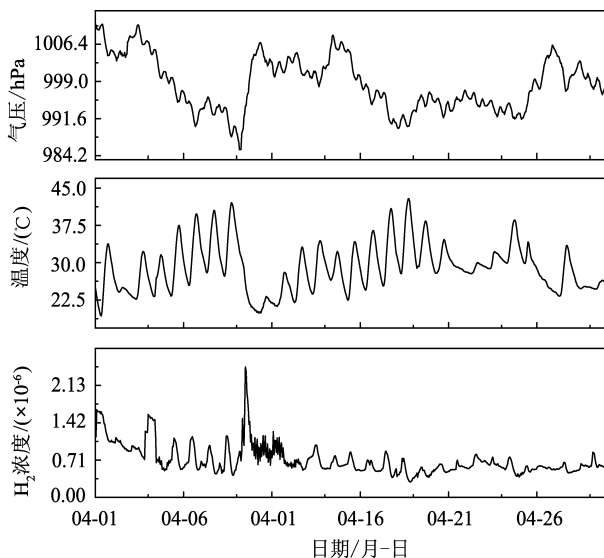


图 4 7 号点 H_2 浓度与气压、温度变化

Fig. 4 High-precision soil hydrogen varying along with pressure and temperature

3 H_2 浓度异常与地震的对应关系

3.1 断层 H_2 浓度异常的判别方法

断层 H_2 浓度动态变化,无论有无年变规律,在几天至几十天的时间尺度上,多呈现出突然升高或锯齿状起伏的特点(范雪芳等, 2016)。笔者根据 2018 年 12 月 4 日以来研究区的数学统计分析结果得出, H_2 浓度低于背景值观测数据的占 40.84%,在背景值至高值界之间的占 30.32%,大于 10×10^{-6} 的占 15.9%。因此,本文确定痕量氢异常识别以大于 10×10^{-6} 作为判据,即观测值大于 10×10^{-6} 为异常。

3.2 震例的选择

2018 年 12 月 4 日(即 H_2 浓度观测起始时间)至 2020 年 8 月 15 日安徽地震台网共记录到在“霍山窗”地区共发生 796 次 $M_L > 0$ 地震,其中 $M_L \geq 3.0$ 地震 2 次, $2.0 \leq M_L < 2.9$ 地震 8 次, $1.0 \leq M_L < 2.0$ 地震 151 次,本文选取 $M_L \geq 1.0$ 地震进行分析(图 1)。

3.3 H_2 浓度异常与地震活动对应关系

观测期间, H_2 浓度值出现 4 次大于 10×10^{-6} 异常,其中 2 次较大幅度的异常出现在 2018 年 12 月、2019 年 10—11 月(图 5b),另外 2 次较小幅度的异常分别出现在 2019 年 7 月(图 5a)和 12 月(图 5c)。2018 年 12 月,由于仪器进水故障导致高值异常,因此,本文只讨论 2019 年全年观测数据与“霍山窗”小震活动的关系,小震活动频次以步长 1 d、窗长 7 d 统计,10 点滑动计算 H_2 浓度与地震活动频次的相关系数。

2019 年 5 月 24 日起,小震活动频次增加,相关系数相继上升(图 5a),7 月 10—12 日, H_2 浓度超过 10×10^{-6} ,最高达 14.4×10^{-6} 。异常核实发现:2019 年 6—7 月,该地区有 2 个工地在施工,大多小震由工地爆破引起。7 月 9 日,金寨县发生 $M_L 2.7$ 天然地震, H_2 浓度高值异常在该地震发生后出现,所以推断该时间段的高值异常与小震活动或者 $M_L 2.7$ 地震无关。

2019 年 10 月 7 日开始, H_2 浓度超过 10×10^{-6} ,高值异常一直持续到 11 月 7 日,最高达 $234.268 0 \times 10^{-6}$ 。10 月 16 日小震活动频次开始增加,10 月 22 日频次达最高,为 14 次,相关系

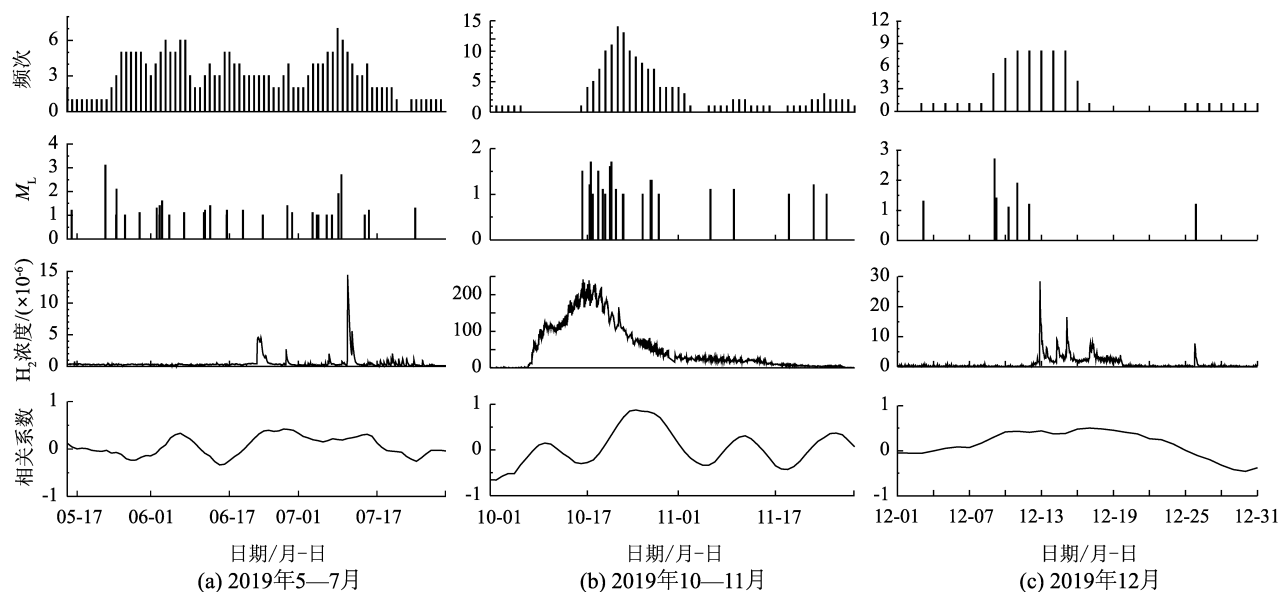
图5 “霍山窗”地区 H_2 浓度与小震活动的关系

Fig. 5 Relation between the hydrogen concentration and the small-earthquake activity in the area of the Huoshan Seismic Window

数也相应发生快速上升(图5b),于11月5日降为0,期间共发生 $M_L \geq 0.0$ 小震88次,其中 $M_L \geq 1.0$ 小震18次,最大震级为10月17日 $M_L 1.9$ 。 H_2 浓度高值异常出现在小震活动前9 d。

2019年12月13日, H_2 浓度持续上升,至12月19日高值异常结束,期间最高值为 28.4×10^{-6} 。从频度和相关系数变化图(图5c)来看,本次 H_2 浓度高值异常与小震活动同步,相关系数增大,呈弱的正相关。

2020年2月1日至3月27日,“霍山窗”小震再次活跃,共发生 $M_L \geq 0.0$ 地震82次,其中 $M_L \geq 3.0$ 地震1次、 $M_L \geq 2.0$ 地震2次、 $M_L \geq 1.0$ 地震12次。而本时间段, H_2 浓度未见高值异常,从图1可以看出,相较于2019年10月,本次小震活动向西南青山—晓天断裂迁移,而2019年10月的小震活动距离梅山—龙河口断裂较近,位于土地岭—落儿岭断裂上。

4 讨论

4.1 H_2 的来源与运移机制讨论

断裂带中的 H_2 来源于地幔的原生 H_2 、地壳深部高温高压下岩石的变质作用及地壳浅层的生物和化学作用(陈丰,1996; Hirose *et al.*, 2011;

Frieder *et al.*, 2013)。 H_2 通常会在相对封闭的地质条件下留存。在岩石形成及地壳运动过程中,地壳深部上涌气体一部分被封存在与外界隔绝的岩石孔隙、裂隙和矿物晶格中(Kita *et al.*, 1982; 车用太等, 2015)。在许多基性—超基性岩中含有大量的 H_2 , 火山岩中 H_2 体积含量与岩石体积比可达3.96%(刘刚等, 1996)。火成岩(如玄武岩等)中含有较多的被封存的 H_2 , 标准温度压力下,每立方米火成岩和变质岩中含有 $5\,000\text{ cm}^3$ 的 H_2 , 沉积岩(如灰岩)中 H_2 很少,同样单位的花岗岩和安山岩释放的 H_2 含量约为拉长石的1.5倍(Freund *et al.*, 2002)。火成岩和变质岩中含有丰富的 H_2 源。“霍山窗”地区主要发育韧性变形的糜棱岩、脆性变形的角砾岩等变质岩,为 H_2 封存提供了良好的条件。

断裂带中的 H_2 主要通过断裂带岩石、土壤(包括断层泥)和深循环地热水向地表迁移,从断层泥、破碎带中逸出的 H_2 含量高于断层附近出露的泉水中的 H_2 含量(Sugisaki *et al.*, 1980)。尽管破碎带本身不能储存 H_2 ,但当破碎带的底部或者上部处于封闭状态时,破碎带将既可以作为运移通道,又可以在相对封闭的体系中储存一定量的 H_2 (罗立强等, 2004b)。与不活动断层相比,活动断层气体的释放更为剧烈(王博,周永胜,

2017)。正断层往往通过断裂张开增加了有效应力,逆断层由于断裂闭合表现为较低的孔隙率,在这种模式下,逆断层周围更易表现为高压流体。Ware 等(1984)在观测不同类型的断层 H_2 释放浓度时,发现正断层和走滑断层 H_2 的释放浓度最高达 80×10^{-6} 。本文研究的 H_2 的观测点所处的梅山—龙河口断裂性质为质正断兼左旋走滑,落儿岭—土地岭断裂为张性断裂,为断裂带中的 H_2 释放提供了良好的通道,易于深部 H_2 的释放。

4.2 H_2 浓度异常机理讨论

2019 年 10 月出现的 H_2 浓度高值异常幅度最大,约为背景值的 460 倍,且异常出现在小震活动前 9 d。小震集中活动前,应力积累,岩石形成众多的微裂隙,断层处的裂隙通道更加畅通,形成相对低压区,周围的地下气体在应力场作用下,向低压区的断裂气孔汇集,气体扩散加快,断裂带深源气体混合比例大量增加,打破了正常状态的气体平衡,进而使得观测到的断层 H_2 浓度出现了不同幅度的正异常(高清武等,1992;张培仁,王基华,1993)。震后,应力释放,裂隙闭合,气体扩散通道被关闭,运移到地表的 H_2 量减少,使观测的土壤 H_2 含量减少至背景值(范雪芳等,2016)。

2019 年 10 月 16 日至 11 月 5 日,小震在张性的落儿岭—土地岭断裂上集中活动,深部变质岩为断裂带 H_2 提供了丰富的来源,张性断裂为 H_2 的释放提供了发育的运移通道,形成了小震集中活动的 H_2 浓度正异常。这表明, H_2 的前兆异常特征与构造环境即岩性、发震构造、断层性质等都有密切的联系。在地震孕育过程中,由于地应力增强,岩石产生超声振动,微破裂发育,可直接释放一部分封闭 H_2 和吸附 H_2 (冯玮等,1985),断层的机械变化也可释放出 H_2 (孙小龙等,2017)。2019 年 7 月爆破引起的高值异常和 12 月小震活动的同步异常,笔者认为地壳浅部应力、应变效应作用的结果,地壳表层受挤压作用而使其间的气体组分重新运动、再分配、再富集,异常变化幅度不大。

本文虽提出“霍山窗”地区 H_2 的异常与小震活动频次及发震构造之间有一定关系,但断裂带内 H_2 的释放与地震的发震时间、地点、震级之间的关系是极其复杂的,还需要更多的观测和研究。

5 结论

2018 年,在“霍山窗”地区土地岭—落儿岭断裂与梅山—龙河口断裂交汇部位开展 1 年多 H_2 浓度连续观测,对 H_2 浓度异常与小震活动的关系、 H_2 浓度异常机理进行讨论,所得结论如下:

(1) 在小震集中活动前, H_2 浓度出现高达背景值几百倍和正常起伏最大值几十倍的短临异常,异常特征显著,该异常对应土地岭—落儿岭断裂构造活动,但与区域地震或其它发震构造上的地震活动没有对应关系,表明 H_2 观测对断裂带上未来发震地点的判断具有一定的参考作用。

(2) “霍山窗”地区主要发育韧性变形的糜棱岩、脆性变形的角砾岩等变质岩,为小震集中活动前 H_2 的正异常提供了丰富的气源。落儿岭—土地岭断裂为张性断裂,为断裂带内 H_2 向地表运移提供了良好的通道。

(3) 小震集中活动前,由于应力的积累, H_2 向张性断裂形成相对低压区汇集,形成 H_2 正异常。震后,应力释放,裂隙闭合,异常恢复。地壳浅部的应力应变作用,可以对浅层 H_2 进行再分配,形成较小幅度的异常变化。

参考文献:

- 鲍志诚,赵爱平,吕坚,等. 2022. 瑞昌—武宁活动断裂带土壤气地球化学特征[J]. 地震研究, 45(2): 249–256.
- 曹玲玲,高安泰. 2014. 气温气压与断层气浓度短期变化的相关性分析[J]. 地震学报, 36(4): 719–729.
- 车用太,刘耀炜,何澜. 2015. 断层带土壤中 H_2 观测——探索地震短临预测的新途径[J]. 地震, 35(4): 1–10.
- 车用太,鱼金子,刘五洲. 1999. 地壳放气动态监测与张北—尚义 6.2 级地震预报[J]. 地质论评, 45(1): 59–65.
- 车用太,鱼金子,张培仁,等. 2002. H_2 和 He 的映震灵敏性及其干扰初析[J]. 地震, 22(2): 94–103.
- 车用太,张大维,鱼金子,等. 1995. 断层带土壤气的映震效能与地震短期预报[J]. 中国地震, 11(4): 374–380.
- 陈丰. 1996. 氢——地区深部流体的重要源泉[J]. 地学前缘, 3(3/4): 72–19.
- 陈刚,严佳奎. 1995. 断层土壤氢气的特征[J]. 西北地质, 16(3): 22–28.
- 陈华静,王基华,林元武. 1999. 断层土壤气的观测与地震短临预报[J]. 地震, 18(1): 82–88.
- 董树文,张岳桥,龙长兴,等. 2008. 四川汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂构造初步调查与发震背景分析[J]. 地震学报, 29(3): 392–396.

- 杜乐天. 2005. 地球排气作用的重大意义及研究进展[J]. 地质论评, 51(2):174-180.
- 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, (3):7-12.
- 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.
- 方震, 张彬, 李军辉, 等. 2020. 地热温泉井与土壤逸出气中痕量氢的特征及差异性分析[J]. 地震工程学报, 42(3):705-703.
- 冯玮, 王真光, 王剑秋, 等. 1985. 在超声作用下玄武岩释放封闭气实验研究[J]. 地震地质, 7(4):49-55.
- 李浩民. 2018. 安徽霍山地区主要控震构造特征及地震活动性分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 23-25.
- 李民. 2007. 地下流体对地震前兆作用的综述[J]. 华北地震科学, 25(2):24-28.
- 李营, 杜建国, 王富宽, 等. 2009. 延怀盆地土壤气体地球化学特征[J]. 地震学报, 31(1):82-91.
- 林元武, 翟盛华, 范树全, 等. 1994. 华北隐伏活动断裂H₂异常特征及其异常机制研究[J]. 地震地质, 16(3):264-268.
- 刘刚, 王先彬, 李立武. 1996. 张家口大麻坪碱性玄武岩内地幔岩包体气体成分的初步研究[J]. 科学通报, 41(19):1775-1777.
- 刘泽民, 黄显良, 倪红玉, 等. 2015. 2014年4月20日霍山M_s4.3地震震发震构造研究[J]. 地震学报, 37(3):402-410.
- 陆镜元, 曹光暄, 刘庆忠, 等. 1992. 安徽省地震构造与环境分析[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 10-64.
- 罗立强, 孙青, 詹秀春. 2004a. 中国大陆科学钻探主孔0~2000米流体剖面及流体地球化学研究[J]. 岩石学报, 20(1):185-191.
- 罗立强, 王健, 李松, 等. 2004b. 中国大陆科学钻探现场分析与地下流体异常识别[J]. 岩矿测试, 23(2):81-86.
- 杉崎隆一, 铃木和博, 大井田徹, 等. 1986. 张魁林译. 地震活动与地下氢气逸出的关系[J]. 世界地震译丛, (4):39-43.
- 邵济安, 赵谊, 张福松, 等. 2010. 黑龙江省中西部地球排气与地震活动的初探[J]. 岩石学报, 26(12):3651-3656.
- 栗启初, Zeller E, Angino E. 1992. 沿断层逸出的氢气对地震的诱发作用[J]. 地震学报, 14(2):228-235.
- 孙小龙, 邵志刚, 司学芸, 等. 2017. 断层带土壤气浓度测量及其影响因素[J]. 大地测量与地球动力学, 37(4):436-440.
- 孙小龙, 王广才, 邵志刚, 等. 2016. 海原断裂带土壤气与地下水地球化学特征研究[J]. 地学前缘, 23(3):140-150.
- 王博, 周永胜. 2017. 氢气与断层活动及地震的研究进展[J]. 地球物理学进展, 32(5):1921-1929.
- 王基华, 张培仁, 孙凤民. 1982a. 地震前后地下氢气异常变化的又一实例[J]. 地震, (4):17-34.
- 王基华, 张培仁. 1982b. 宁河6.9级地震前光华井氢气含量变化机理[J]. 地震科学研究, (2):52-54.
- 王喜龙, 杨梦尧, 郭红霞, 等. 2022. 辽宁盘一口氢气浓度异常特征及预报效能分析[J]. 地震研究, 45(2):275-283.
- 魏乐军, 郭坚峰, 蔡慧, 等. 2008. 卫星热红外异常——四川汶川M_s8.0及大地震的短临震兆[J]. 地球学报, 29(5):583-591.
- 高清武. 1992. 地震前H₂、Hg等断层气的异常变化[J]. 中国地震, 8(3):53-59.
- 向阳, 孙小龙, 高小其, 等. 2018. 新疆库勒断层氢气浓度的影响因素及其地震预测的潜在效能评价[J]. 中国地震, 34(1):48-59.
- 张培仁, 王基华. 1993. 氢——预报地震的灵敏元素[J]. 地震地质, 15(1):69-77.
- 张泽明. 1988. 德国大陆科学钻探的地壳流体研究[J]. 地质科技情报, 17(2):7-12.
- 钟骏, 王博, 闫玮, 等. 2021. 阿克苏断层氢气浓度动态特征及其映震效能[J]. 地震学报, 43(5):615-627.
- 周晓成, 杜建国, 陈志, 等. 2012. 地震地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(4):340-346.
- 周晓成, 石宏宇, 陈超, 等. 2017. 汶川M_s8.0地震破裂的土壤气中H₂浓度时空变化[J]. 地球科学进展, 32(8):818-827.
- Chavrit D, Humler E, Grasset O. 2014. Mapping modern CO₂ fluxes and mantle carbon content all along the Mid-ocean ridge system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 387:229-239.
- Chiodini G, Granieri D, Avino R, et al. 2010. Non-volcanic CO₂ earth degassing: case of Mefite d'Ansanto (southern Apennines), Italy[J]. Geophysical Research Letters, 37(11):L11303.
- Dogan T, Mori T, Tsunomori F, et al. 2007. Soil H₂ and CO₂ surveys several active faults in Japan[J]. Pure and Applied Geophysics, 164(12):2449-2463.
- Freund F, Dickinson J F, Cash M. 2002. Hydrogen in rocks: An energy source for deep microbial communities[J]. Astrobiology, 2(1):83-92.
- Frieder K, Wolfgang B, Thomas M, et al. 2013. Compositional controls on hydrogen generation during serpentinization of ultramafic rocks[J]. Lithos, 178:55-69.
- Fu C C, Yang T F, Chen C h, et al. 2017. Spatial and temporal anomalies of soil gas in northern Taiwan and its tectonic and seismic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 149:64-77.
- Hirose T, Kawagucci S, Suzuki K. 2011. Mechanoradical H₂ generation during simulated faulting: Implications for an earthquake-driven subsurface biosphere[J]. Geophysical Research Letters, 38:L17303. doi:10.1029/2011GL048850.
- Ignatenko G K, Gremchenko P I, Glushkov Y M. 2016. Hydrogen concentration monitoring in subsoil air on tectonic faults on the territory adjacent to NPP site[J]. Nuclear Energy and Technology, 2(3):151-155.
- 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.
- Jiang F L, Li G R. 1981. The application of geochemical methods in earthquake prediction in China[J]. Geophysical research letters, 8(5):469-472.
- King C Y. 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: an overview[J]. Journal of Geophysical Research, 91(B12):12269-12281.
- Kita I, Matsuo S, Wakita H, et al. 1980. D/H ratios of H₂ in soil gases as an indicator of fault movements[J]. Geochemical Journal, 14(6):

- 317 – 320.
- Lombardi S, Voltattorni N. 2010. Rn, He and CO₂ soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults[J]. *Applied Geochemistry*, 25(8):1206 – 1220.
- McMahon S, Parnell J, Blamey N. 2016. Evidence for seismogenic hydrogen gas, a potential microbial energy source on earth and mars[J], *Astrobiology*, 16(9):690 – 702.
- Sato M, McGee K A. 1981. Continuous monitoring of hydrogen on the south flank of mount St. Helens[C]. U S Geological Survey Professional Paper 1250; USGS, 209 – 219.
- Shirokov V A, Firstov P P, Makarov E O, *et al.* 2015. An approach to the short-and long-term forecasting of strong earthquake: A case study of the $M_w = 9.0$ Tohoku earthquake, Japan, March 11, 2011 [J]. *Seismic Instruments*, 51(3):229 – 241.
- Sugisaki R, Anno H, Adachi M, *et al.* 1980. Geochemical features of gases and rocks along active faults [J]. *Geochemical Journal*, 14(3):101 – 112.
- Sugisaki R. 1984. Relation between hydrogen emission and seismic activities[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 122:175 – 184.
- Tang L J, Luo L Q, Lao C L, *et al.* 2014. Real time fluid analysis during drilling of the Wenchuan earthquake fault scientific drilling project and its responding features [J]. *Tectonophysics* (619 – 620):70 – 78.
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, *et al.* 1980. Hydrogen release: New indicator of fault activity[J]. *Science*, 210(4466):188 – 190.
- Ware R H, Roecken C, Wyss M. 1984. The detection and interpretation of hydrogen in fault gases [J]. *Pure & Applied Geophysics*, 122(2 – 4):392 – 402.
- Zhou X C, Chen Z, Cui Y J. 2016. Environmental impact of CO₂, Rn, Hg degassing from the rupture zones produced by Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake in western Sichuan, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(5):1067 – 1082.

Analysis of Soil Hydrogen Anomaly in the Huoshan Seismic Window Area

FANG Zhen^{1,2}, HUANG Xianliang^{1,2}, TAO Yuechao¹, LI Shenliang³,

TAO Fangyu⁴, YANG Yuanyuan¹, ZHU Houlin⁴, LU Dongliang⁴

(1. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, Anhui, China)

(2. Mengcheng National Geophysical Observatory, Mengcheng 233500, Anhui, China)

(3. Hefei Earthquake Monitoring Central Station, Hefei 230000, Anhui, China)

(4. Jinzhai Earthquake Monitoring Central Station, Jinzhai 237300, Anhui, China)

Abstract

This paper evaluates the reliability of the long-term, high-accuracy soil hydrogen data observed in the Huoshan Seismic Window area according to the distribution of measurements, and analysis of meteorological influencing factors. The relationship between the hydrogen anomaly and the activity of small earthquakes is preliminarily analyzed in the study area. The results show that the hydrogen concentration in the Tudiling-Luoerling fault has a large precursory anomaly extent, and is sensitive to the seismic activity around the observational sites on the fault, suggesting a better earthquake-precursory efficiency. The metamorphic rocks contain H₂-gas sources in the study area. Stress accumulation accelerates the release of H₂ in the fault zone, and tensile faults provide a good channel for H₂ migration.

Keywords: fault hydrogen concentration; hydrogen source; small earthquake activity; the Huoshan Seismic Window area