

内蒙古乌海盆地断层氢气对银川 Ms4.2 级地震的响应特征和构造分析



www.
geojournals.cn/georev

王有鹏¹⁾, 李德文²⁾, 郑娜¹⁾, 李鑫³⁾, 赵晓龙³⁾, 苏世兵⁴⁾

- 1) 乌海市地震局, 内蒙古乌海, 016000;
- 2) 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京, 100085;
- 3) 乌海市应急管理局, 内蒙古乌海, 016000;
- 4) 巴彦浩特地震监测中心站, 内蒙古阿拉善左旗, 750300

内容提要:断层氢气在向地表迁移和富集的过程中会受到构造因素和非构造因素的共同影响。笔者等基于2025年2月20日银川 Ms4.2 级地震前后乌海盆地断层氢气体积分数时空变化及其与区域构造特征研究, 获得如下认识: ①通过对多个台站长期观测记录和数据特征以及异常因素分析, 确认银川 Ms4.2 级地震前, 乌海盆地摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数异常为震前短临异常, 异常变化趋势为震前 4 h 氢气体积分数快速上升—地震—震后 1 h 转折下降—震后 37 h 恢复到背景值。与已有研究实例相比, 氢气体积分数异常变化趋势基本相同, 差异之处在于临震时间更短, 异常值较背景值的倍数更大。②通过区域构造格局与短临异常的关系, 认为摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数异常升高与特定的构造部位有关。摩尔沟痕量氢观测点处于桌子山西缘断裂带北段山—盆地转换位置的正断层上盘陡坎位置, 在区域构造格局中, 观测点所处的区域具有一定的拉张分量, 利于地下富集的大量氢气快速向地表运移。③地质构造及其活动(如应力变化、破裂)以及环境能够影响断层氢气的运移和扩散, 即使同处一条断裂带, 断层氢气体积分数变化也会因所处不同位置的构造状态、应力变化以及地下水等因素影响而有不同, 研究地质构造及其活动与断层氢气的物理、化学性质的耦合在地震孕育等领域具有重要意义。这些认识为乌海盆地断层氢气体积分数异常对地震的响应及与构造之间的关系提供了依据, 同时也对地下流体观测台站的布设有一定的指导意义。

关键词:断层氢气; 银川 Ms4.2 级地震; 短临异常; 乌海盆地; 台站布设

地震预报, 尤其是短期临震预报始终是困扰世界各国地震学家的一道难题, 而地震前兆异常的研究是突破地震预报难关的重要环节(车用太, 2004; 孙建中, 2010; 孙建中等, 2013; 范雪芳等, 2014)。前兆观测种类繁多, 影响因素众多, 实际观测中遇到的绝大多数异常都并非和地震有关(廖丽霞等, 2013), 如何从某一前兆异常的各种变化中识别出异常与地震孕育、发生过程相关的部分是做好地震分析预报工作的基础(刘耀炜等, 2006; 范雪芳等, 2014)。地震孕育与发生离不开流体的作用(刘耀炜等, 2006), 地下流体异常被认为可作可靠的地震前兆(车用太等, 1999; 周慧玲等, 2019; 李滔等, 2020), Seewald 等(2003)对胡安·德富卡海岭北部

的主奋进场热液喷口流体中 H₂、H₂S、CO₂ 的丰度研究发现, 经历强烈地震活动后, 与震前丰度相比, 样本中溶解的 H₂、H₂S、CO₂ 浓度显著增加, 随后在次年逐渐降低。在国内外一些学者提出利用氢气异常预报地震的思想(张培仁等, 1993; 车用太等, 1999, 2002), 并认为是实现地震准确预报的关键(车用太等, 2015)。地震断裂带上开展断层氢气的连续观测, 能够捕捉区域应力应变的变化过程, 获得氢气体积分数变化的地震前兆特征(白晓川等, 2021)。Lombardi 等(2010)对意大利地区和撒丁岛南部地区的 Rn、He 和 CO₂ 气体体积分数变化的研究表明, 气体迁移变化可能与应力状态的演变以及断层的封闭状态、活动性有关。由于断层氢气体积分数变化

注: 本文为内蒙古自治区地震局局长基金课题资助项目(编号: 2024QN05)的成果。

收稿日期: 2025-04-30; 改回日期: 2025-07-03; 网络首发: 2025-07-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.021

作者简介: 王有鹏, 男, 1994年生, 硕士研究生, 中级工程师, 主要从事台站前兆监测分析工作; Email: 994754448@qq.com。通讯作者: 李德文, 男, 1970年生, 博士, 研究员, 主要从事地貌、第四纪研究; Email: lidewen@263.net。

受到研究地区地震地质环境、气温、气压、构造和断层活动性等因素的影响,这种差异性就导致不同地区的断层氢气体积分数变化特征或有不同,对于断层氢气体积分数的异常特征以及异常机理的认知,尚需更加深入的研究工作来支撑(张涛等,2016)。现有的研究表明,断层氢气体积分数观测前兆异常以短临异常为主,异常一般出现在震前数天至数十天之间,变化幅度可达背景值的数倍至数十倍,易于识别(张涛等,2016)。笔者等通过研究银川 2025年2月20日 $M_s4.2$ 级地震前、后乌海盆地断层氢气

体积分数变化,旨在探讨银川 $M_s4.2$ 级地震前、后乌海盆地断层氢气对地震响应过程、特征及其与构造之间的关系。

1 研究区基本概况

1.1 区域地震地质环境

乌海盆地处于鄂尔多斯西北缘活动断裂系控制下构造转换和构造变形的关键位置(高泽民,2020)。该盆地形成于早第三纪始新世,第四纪以来断陷垂直差异活动强烈,断陷内中小地震活动密

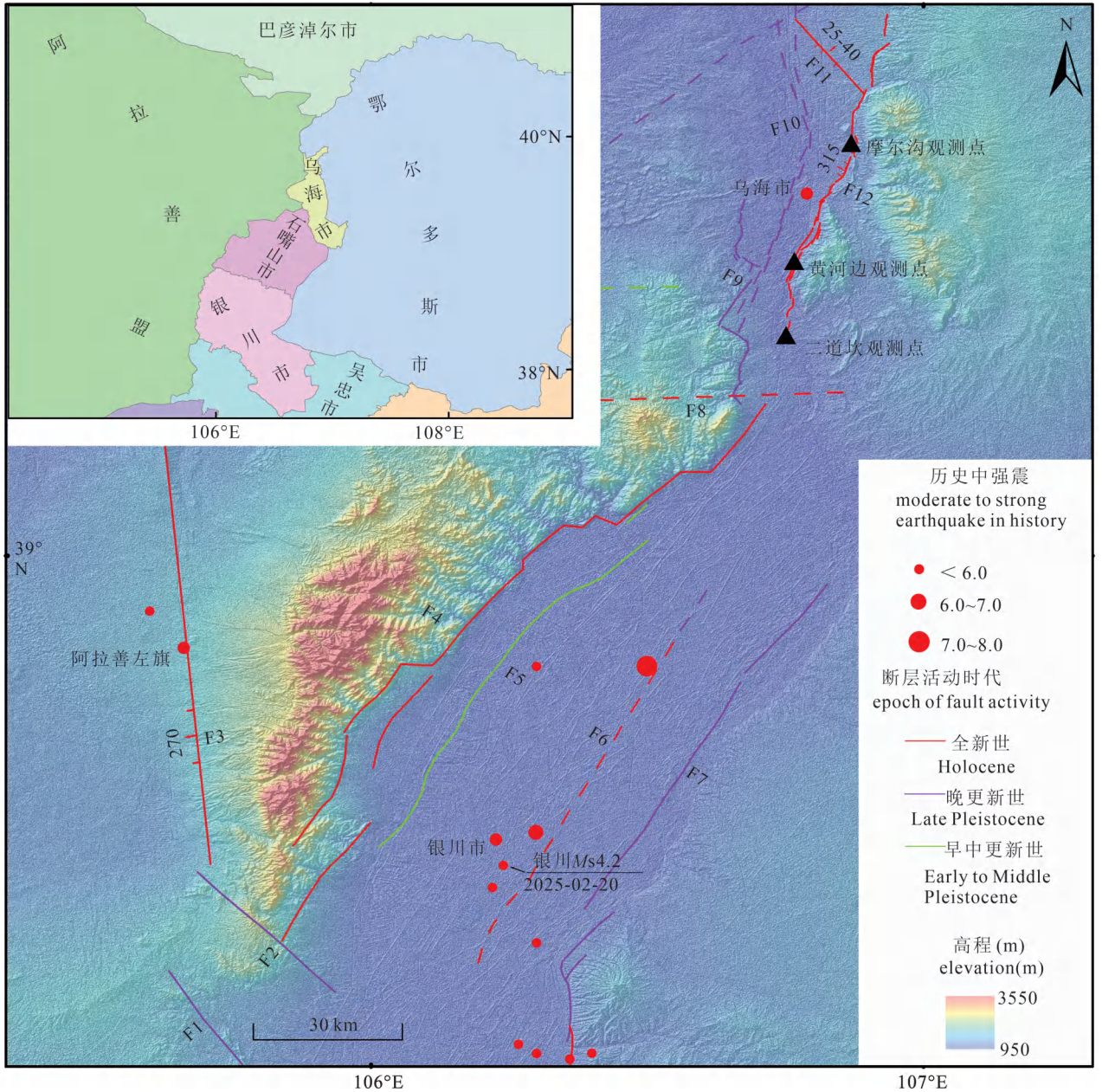


图1 内蒙古乌海盆地地震地质环境(断层及其参数来源^{②④})

Fig. 1 Seismotectonic environment of Wuhai Basin, Inner Mongolia (sources of faults and their parameters^{②④})

集,历史上发生过 $M_s5.0$ 级及 $M_s6.2$ 级地震等^①(图 1)。断陷盆地西侧的吉兰泰断陷是华北活动地块和新疆活动地块的边界带。乌海断陷盆地北侧的河套断陷带新构造活动强烈,南侧的银川断陷盆地新构造和现代构造活动同样强烈,1739 年的平罗 $M_s8.0$ 级地震就发生于此。乌海盆地内现已查明的活动断裂有桌子山西缘断裂、五虎山断裂、黄河隐伏断裂等^②(图 1)。

1.2 痕量氢观测点概况

乌海盆地现已建成 3 个痕量氢观测点用于观测断层氢气,分别是摩尔沟痕量氢观测点、黄河边痕量氢观测点、二道坎痕量氢观测点,沿桌子山西缘断裂带展布,分别位于桌子山西缘断裂带北、中、南段(图 1)。痕量氢观测点的布设原则是在与断层垂直方向上,从断层一侧跨断层至另一侧,使用杭州超钜 ATG-300H 型便携式测氢仪逐次测定断层土壤气 R_n 、 H_2 体积分数,最终在断层上盘陡坎位置测量到 R_n 、 H_2 值均偏高,为断层气释放活跃区域,在此基础上布设痕量氢观测台站。测区均为黄河冲积平原,主要由黄河一、二级阶地构成,观测点周围无居民区。观测仪器采用由杭州超钜科技有限公司生产的 ATG-6118H 痕量氢在线分析仪,仪器最低检出限 $\leq 5 \times 10^{-9}$,测量间隔 60 min,采样时间 15 s。在用的观测孔深 5.5 m,采样集气装置剖面如图 2 所示。观测井孔直径 1.2 m,深度为 5.5 m,底部放鹅卵石

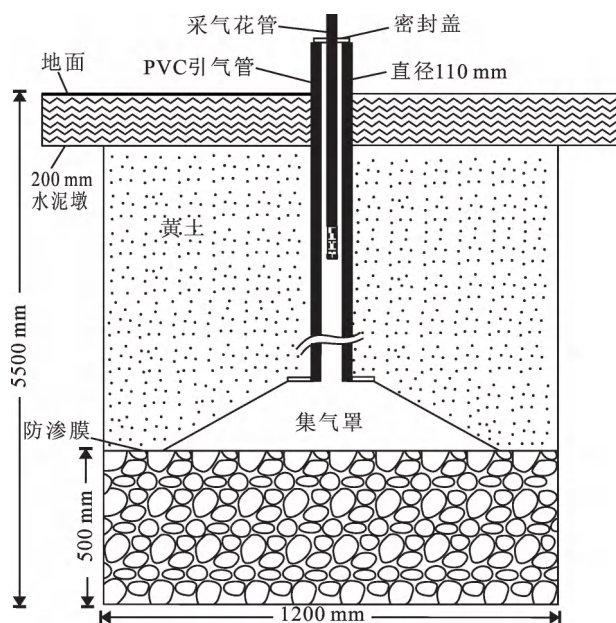


图 2 内蒙古乌海地区痕量氢观测孔剖面图

Fig. 2 Sectional drawing of the trace hydrogen observation borehole in Wuhai area, Inner Mongolia

(直径 2~5 cm) 部位高度为 0.5 m。鹅卵石上方为边长 750 mm,高度为 400 mm 的梯形集气罩。集气罩通过连接法兰与引气管连接,引气管直径为 110 mm,顶部用密封盖密封,内部有采气花管,花管下方深度可调节,外部包裹保温棉,引气管超出地下室内部地表 300 mm(图 2)。

2 痕量氢观测点断层氢气体积分数异常

2.1 氢气的来源

氢气具有离子半径小、质量轻、迁移速度快、穿透力强等特性,能够携带重要的上地幔信息,对地壳中哪怕是微小的扰动也会迅速做出反应(Zgonnik,

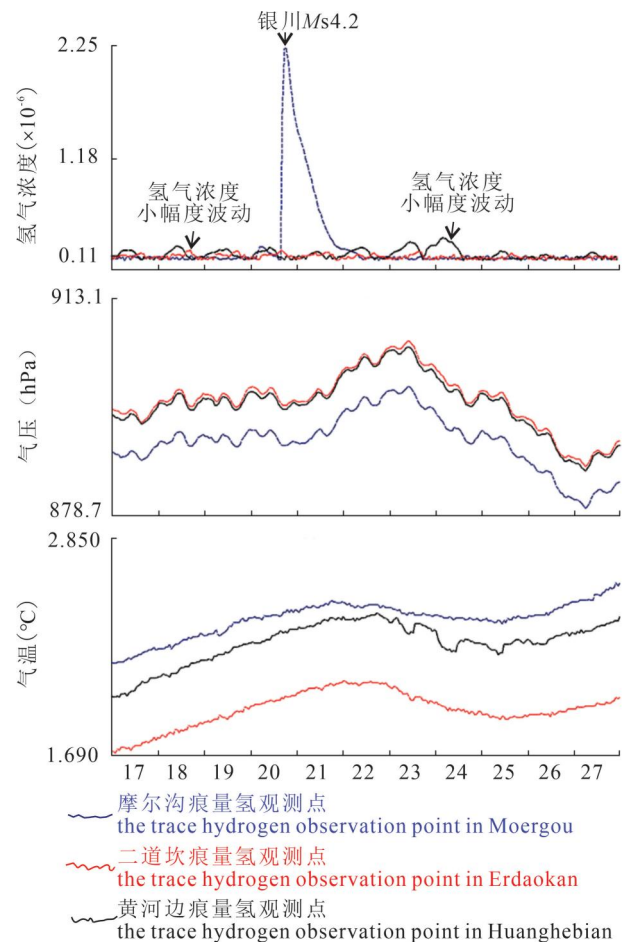


图 3 银川 2025 年 2 月 20 日 M_s 4.2 级地震前、后摩尔沟、二道坎、黄河边痕量氢观测点氢气体积分数及气压、气温变化曲线

Fig. 3 The change curves of hydrogen volume fraction, air pressure and temperature at the Trace Hydrogen Observation Stations in Moergou, Erdaokan and Huanghebian before and after the M_s 4.2 earthquake in Yinchuan

2020)。研究人员针对地壳中氢气的成因和来源提出了若干假设,概括起来包括:来自地球核心和地幔的深部氢气的脱气作用、水与超基性岩石发生反应,即蛇纹石化作用、水与地幔中的还原剂接触、水与新暴露的岩石表面相互作用、矿物晶格结构中羟基的分解、水的自然辐射分解、有机物的分解、生物活动、人为活动等(Zgonnik, 2020)。Hirose等(2011)则认为氢气的可能来源之一是地震,并且其研究表明,氢气产量随着摩擦功(即地震震级)增加而增加,即使是小震发生,断层带流体中氢质量浓度也能超过 1.1 mol/kg 。乌海盆地高精度氢气观测站勘选结果显示,异常气体主要来源于地下深部。

2.2 震前、震后乌海盆地断层氢气异常概述

银川 M_s 4.2 级地震前,乌海盆地摩尔沟痕量氢观测点(距震中 155 km)断层氢气体积分数自震前 4 h 从 0.115×10^{-6} 快速上升,震前 2 h 达到峰值 2.245×10^{-6} ,为快速上升前的 19.5 倍。同期辅助测项气温、气压无明显变化;地震发生后,自震后 1 h 开始氢气体积分数快速下降,37 h 后下降至正常水平。整个过程中异常特征为:震前 4 h 氢气体积分数快速上升—地震—震后 1 h 转折下降—震后 37 h 恢复到背景值(图 3)。黄河边痕量氢观测点(距震中 129 km)、二道坎痕量氢观测点(距震中 115 km)在震前 3 d 至震后 5 d 左右断层氢气体积分数变化有些许波动,但是变化幅度很小,没有表现出和摩尔沟痕量氢观测点一样明显的临震异常。

2.3 乌海盆地断层氢气体积分数年变特征分析

断层氢气体积分数大部分具有年变特征,周期近似于 1 年(李娜等,2022)。对乌海盆地 3 个痕量氢观测点观测以来的数据进行分析发现,3 个观测点的氢气体积分数变化、气压变化、气温变化(文中所出现的气压、气温均指观测孔外)几乎同步(图 4a),断层氢气体积分数变化具有明显的年变形态,呈现夏高冬低的年变趋势。在更换滤尘器、擦拭集气花管、校准等操作后氢气体积分数短暂异常,表现在立即上升至峰值,然后立即开始下降,原因是观测室内的氢气体积分数高于集气孔,在集气孔打开后观测室内的氢气会进入集气孔内。3 个观测点在受到人为因素干扰后氢气体积分数变化趋势特征类似(图 4a)。以摩尔沟痕量氢观测点为例进行深入分析,氢气体积分数一般夏季 6~8 月达到最高值,3 月下旬达

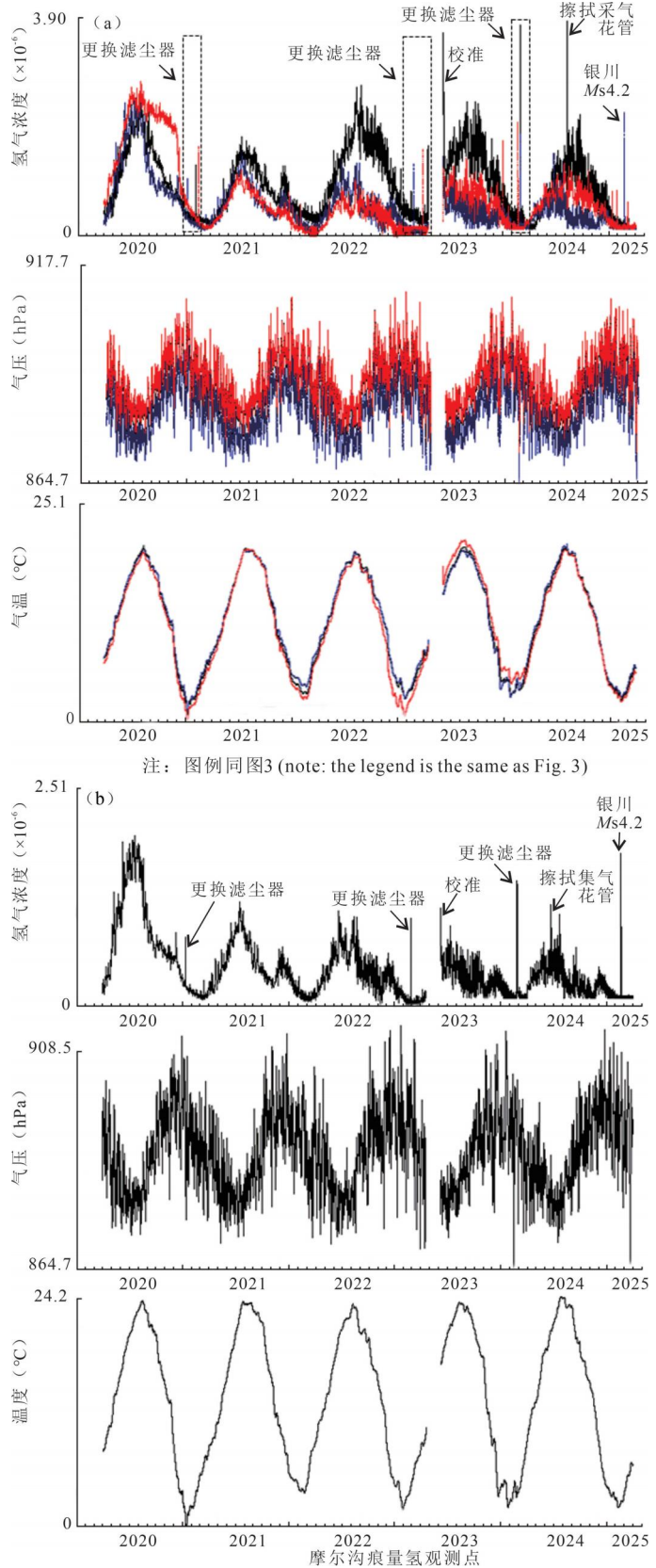


图 4 痕量氢观测年变特征曲线图

Fig. 4 Curve graph of the annual variation characteristics of Trace Hydrogen Observation

到最低值(图 4b)。从定性的角度来看,年变化尺度上,氢气体积分数变化与气压呈负相关,与气温呈正相关。从定量的角度来分析,研究对象选取原则是在三个痕量氢观测点中任选其一,在 2020 至 2024 年中任选一年,对氢气体积分数变化与气压、氢气体积分数变化与气温关系进行分析。结合本文主题,选取摩尔沟痕量氢观测点任一年(此次研究取 2021 年),利用皮尔逊相关系数法研究摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压、氢气体积分数与气温的关系,结果显示年变化尺度上,摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压呈弱负相关关系,相关系数为 -0.41 (图 5a),与气温呈显著的正相关关系,相关系数为 0.78 (图 5b)。对摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压、氢气体积分数与气温分别做一元线性回归分析,结果显示摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压相关系数为 -0.44 (图 5c),与气温相关系数为 0.76 (图 5d)。以上结果说明,在年度变化尺度上,摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数变化与气

温变化呈显著正相关,与气压变化呈低度负相关。

2.4 干扰因素分析

摩尔沟痕量氢观测点自观测以来,仪器运行稳定。异常发生后,立即对观测设备进行了现场检查,检查发现观测设备完好,仪器运行正常。每年年初对滤尘器、净化管等定期进行维护,定期对集气管进行巡检,集气管未发生堵塞等现象,因此排除观测系统方面的影响。

观测点东侧约 2 km 为企业厂区,经调查近半年内无建设项目,南、北、西侧均为草场,地势平坦开阔,未见放牧迹象。摩尔沟痕量氢观测点建筑高约 6 m,分上下两层,痕量氢为地下室观测,上下层之间以 $80\text{ cm}\times 80\text{ cm}$ 的孔洞相通,孔洞加盖,覆保温棉被。对观测点外围进行调查发现,观测点周围 2km 范围内无动土、大型机械施工等,观测环境未发生显著变化(图 6a),因此排除周边环境干扰的影响。对于观测点的仪器,定期进行标定以保证仪器测量数据的准确。2023 年 5 月按照规范分别用 1×10^{-6} 、 $5\times$

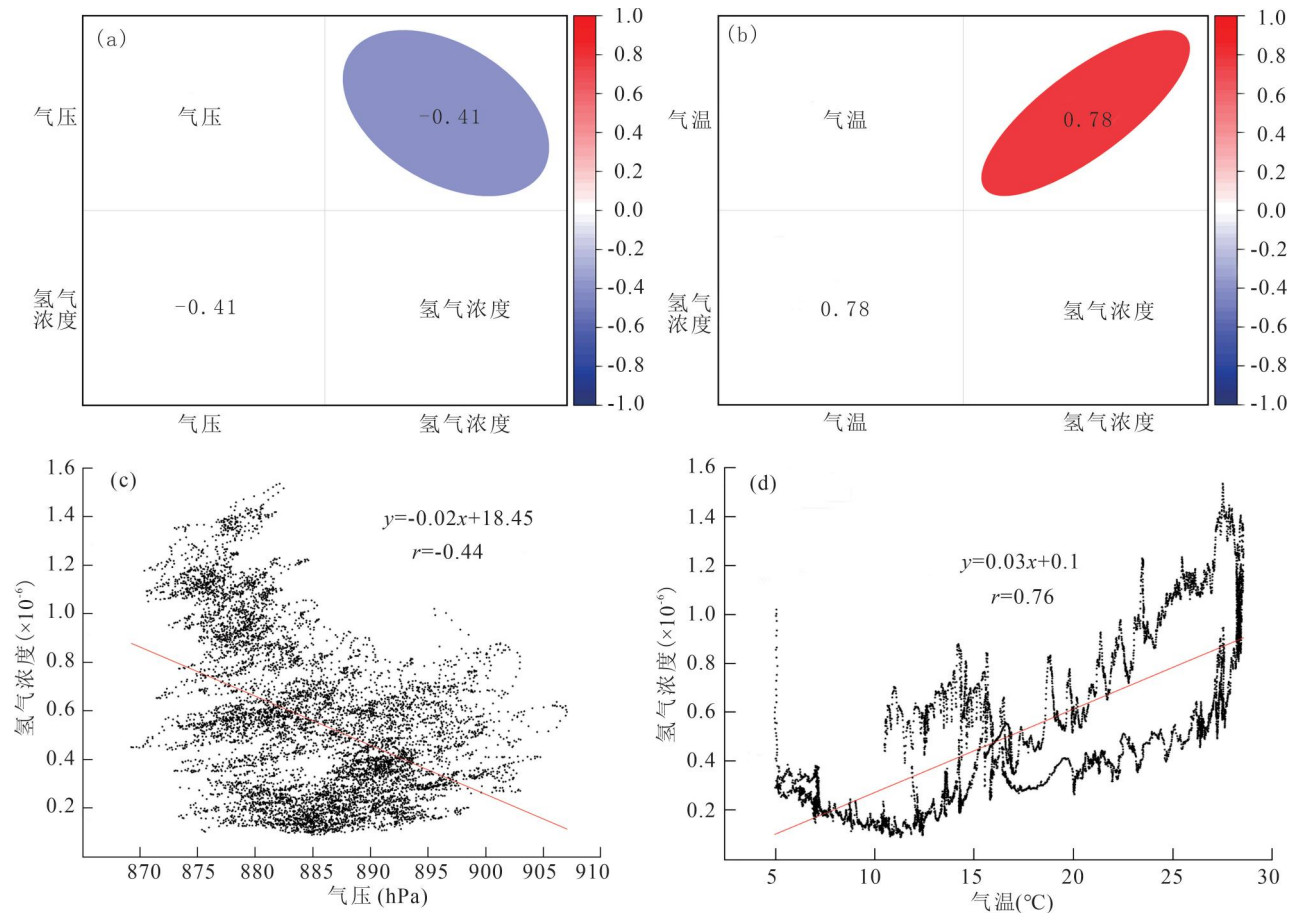


图 5 摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压、气温相关性分析图

Fig. 5 Analysis graph of the correlation between hydrogen volume fraction and air pressure, temperature at the trace hydrogen observation point in Moergou

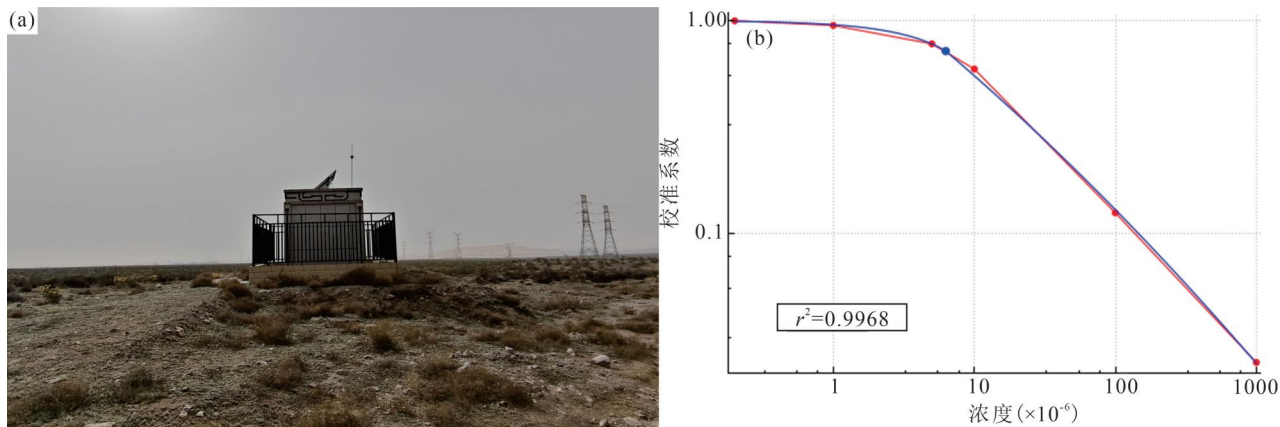


图6 摩尔沟痕量氢观测点观测环境(a)及标定系数拟合图(b)

Fig. 6 Observation environment (a) and calibration coefficient fitting graph of the trace hydrogen observation point (b) in Moergou

10^{-6} 、 10×10^{-6} 、 100×10^{-6} 、 1000×10^{-6} 标准气对摩尔沟痕量氢观测仪器行了现场标定并对标定系数进行了拟合,通过2025年2月对仪器标定系数的拟合可以看出,线性相关系数为0.9968(图6b),符合规范要求。因此,摩尔沟痕量氢观测点 ATG-6118H 痕量氢在线分析仪精密度达标,仪器产出数据准确可靠。

为了探究银川 M_s 4.2 级地震前摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数变化在短期内是否受到气温、压力的影响,利用皮尔逊相关系数法研究摩尔沟痕量氢观测点2月17日至27日氢气体积分数与气压、氢气体积分数与气温的关系,结果显示银川 M_s 4.2 级地震前、后摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压相关系数为0.09(图7a),与气温相关系数为0.28(图7b)。对摩尔沟痕量氢观测点2月17日至27日氢气体积分数与气压、氢气体积分数与气温分别做一元线性回归分析,结果显示摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压相关系数为0.017(图7c);与气温相关系数为0.172(图7d)。以上结果说明银川 M_s 4.2 级地震前、后摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数变化与气压、气温变化关系不大,因此排除2月17日至27日气温、压力变化对摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数异常变化的影响。

通过对以上3个台站长期观测记录和数据特征、异常因素分析以及干扰因素的逐个排除,确认此次银川 M_s 4.2 级地震前,乌海盆地摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数异常为震前短临异常。

3 桌子山西缘断裂带构造特征分析

3.1 桌子山西缘断裂带构造特征

邢成起等(1991)认为桌子山西缘断裂第四纪以来活动显著,且分段活动特征明显,断裂带不同地段的地貌特征、断层活动强度以及最新活动时代均不尽相同,桌子山西缘断裂带北段活动性较强,中段和南段活动性较弱。黄雄南等(2012)推测桌子山—贺兰山断裂系在晚第四纪以来是一套大型的右行伸展走滑断裂系。乌海市城市活断层探测成果^②显示:桌子山西缘断裂带北起磴口以南的乌兰布拉格沟一带,向南过千里沟,长约70 km(图1),经海勃湾区向南过三道坎东,走向 NNE,倾向 NWW,倾角 $60^\circ \sim 75^\circ$,燕山期曾为压性,新生代复活转为张扭正断层,为一条全新世活动的断裂,晚更新世中期以来的垂直滑动速率为 $0.5 \sim 1.2$ mm/a。梁宽(2019)认为桌子山西缘断裂在剖面上主要表现为西倾的正断层,乌海盆地中发育北西向的逆断层,桌子山西缘断裂晚更新世中期(70 ka)以来的平均垂直滑动速率为 0.5 ± 0.2 至 1.0 ± 0.2 mm/a。且断裂中部的垂直滑动速率最大。高泽民等(2020)认为桌子山西缘断裂北起磴口县以东南,全长约90 km,断裂迹线总体呈折线或锯齿状,反映出正断层型活动的特征,断层剖面最新活动时间在 11.4 ± 1.3 ka 之前,是一条晚更新世晚期的活动断裂,断裂不同时期的垂向滑动速率范围介于 $0.07 \pm 0.01 \sim 0.16 \pm 0.05$ mm/a。

在空间尺度上,桌子山西缘断裂迹线不完全连续,按几何特征大致分为大陆盖段、千里沟段、乌海—千里沟段、二道坎—乌海段(高泽民,2020)。摩尔沟痕量氢观测点位于桌子山西缘断裂带北段

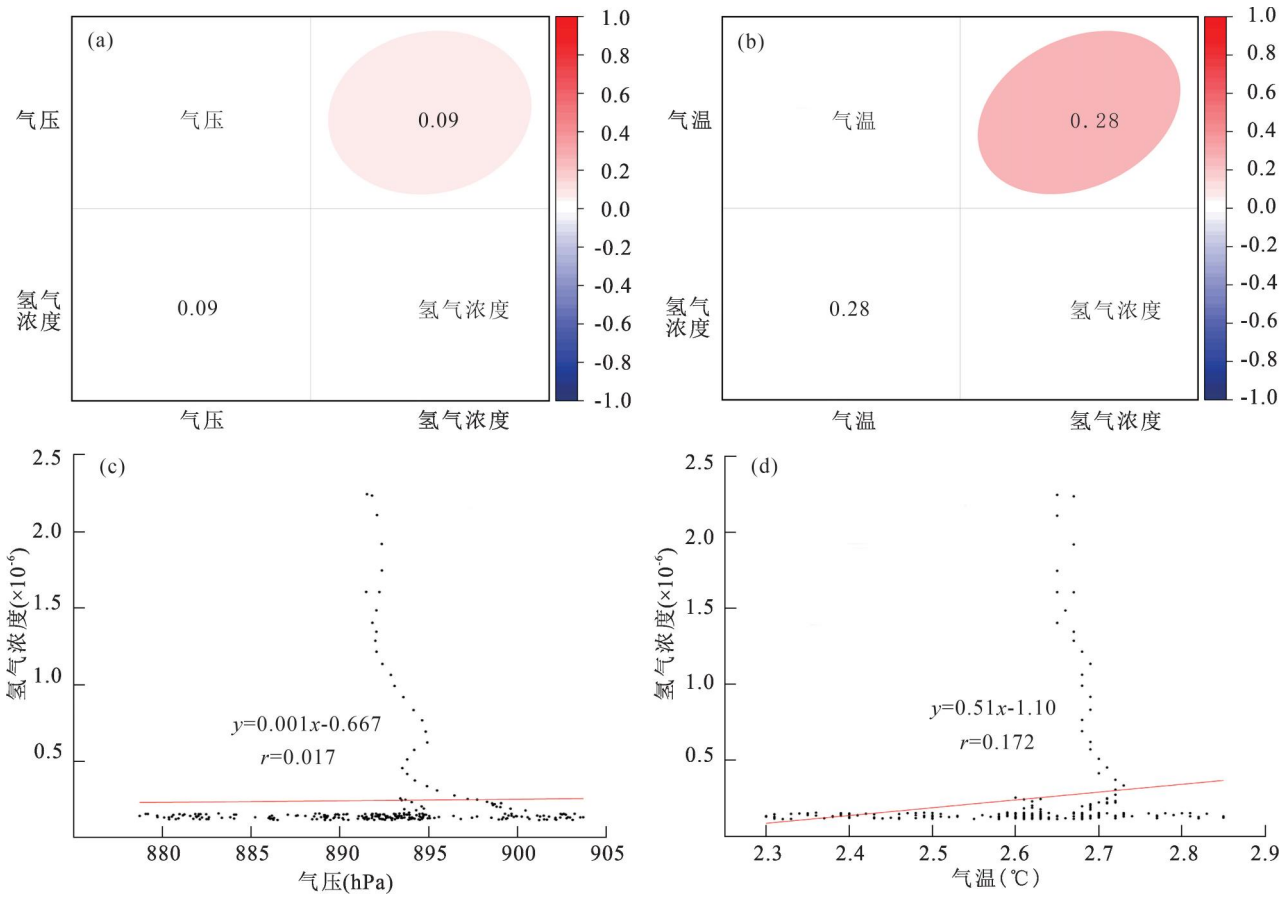


图 7 2025 年 2 月 17 日至 27 日摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数与气压、气温变化相关性图

Fig. 7 Correlation diagram of hydrogen volume fraction with air pressure and temperature changes at the Trace hydrogen observation point in Moergou from February 17th to 27th, 2025

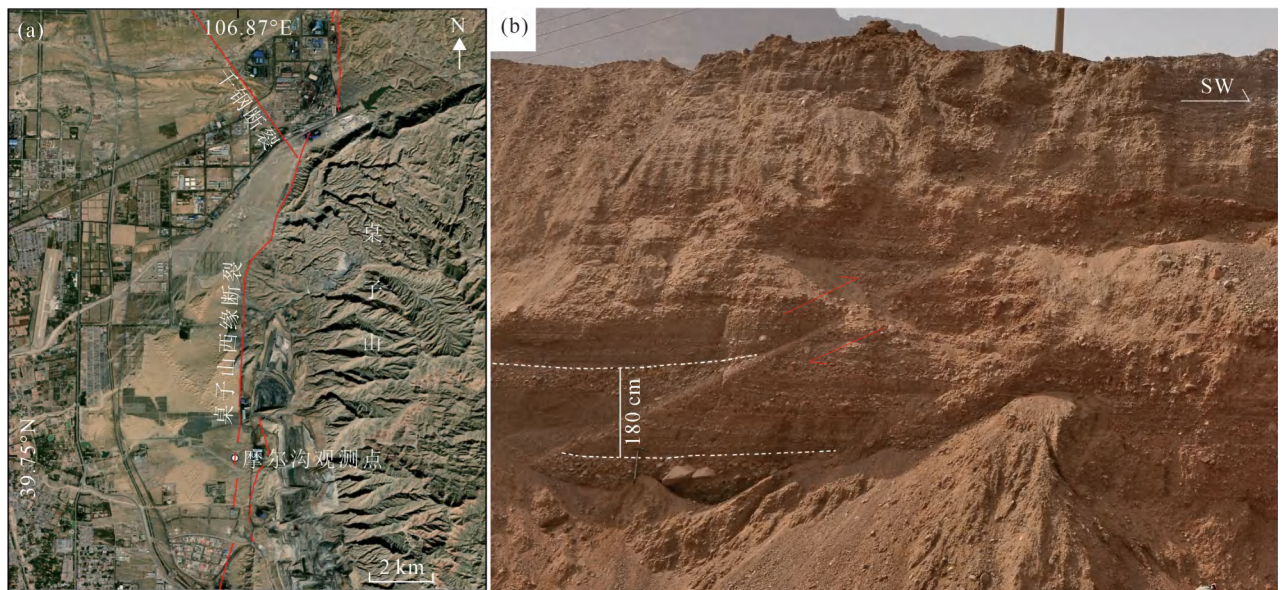


图 8 摩尔沟痕量氢观测点地貌 (a) 与千钢断裂剖面 (b)

Fig. 8 The geomorphology of the trace hydrogen observation point in Moergou (a) and the section of the Qiangang fault (b)

山—盆地转换位置(图 8a),据中国地震局地壳应力研究所的报告^②:桌子山西缘断裂带北段的千里沟以北断裂的线性特征清楚,冲沟右旋拐弯明显。桌子山西缘断裂带北段的次级断裂(千钢断裂)是一条走向近 NW,倾向 NE 的逆断层(图 8b)。

黄河边痕量氢观测点处于桌子山西缘断裂带中段,甘德尔山前,距离黄河河岸最近距离为 76 m (图 9a)。在安泰驾校东探槽西剖面发现一条倾向 140°,倾角 75°的正断层,在正断层的上盘发育一条倾向 295°,倾角 75°的高角度逆断层^②,显示出在正断层的活动过程中,断层的下降盘断层附近区域处于挤压的应力场中。黄白茨附近露头发现明显的走滑擦痕(图 9b、c),从擦痕面判断为右旋走滑,再结合地貌和黄河边观测点北侧的雁列式断裂来判断,黄河边观测点北侧表现出右行右阶式的走滑断层特性,黄河边观测点南侧靠近二道坎观测点段表现出右行左阶式的走滑断层特性。因此,桌子山西缘断裂带中段整体表现出走滑的特性。

二道坎痕量氢观测点处于桌子山西缘断裂带南

段末尾位置(图 10),该段地貌上与其它段落不同,西侧并无隆起的山体(梁宽,2019),断层迹线不明显,露头较少。桌子山西缘断裂带南段的三道坎一带的构造剖面显示断层活动过程中张性开裂后由上覆土层填充,断层活动的时间在晚更新世末期^②。结合上文所述,此段表现出右行左阶式的走滑断层特性。

3.2 构造因素分析

大量研究表明,氢气与断层之间存在关联(Zgonnik, 2020)。日本开展的实验表明,氢气体积分数与断层及其活动密切相关(Wakita et al., 1980)。另一项对堪萨斯州富氢井附近土壤气体样本的研究表明,氢气体积分数异常与断层活动之间存在关联(Zgonnik, 2020; McCarthy et al., 1986)。断层氢气在向地表迁移和富集的过程中会受到构造因素和非构造因素的共同影响(杜建国等,1998;孙小龙等,2017;范雪芳等,2020;钟骏等,2021),美国堪萨斯州中北部数百次土壤气体测量得到的氢气数据表明,裂隙是游离氢气垂直迁移的优先通道



图9 黄河边痕量氢观测点地貌 (a) 与黄白茨附近走滑擦痕 (b) (c)

Fig. 9 The geomorphology of the Huanghebian trace hydrogen observation point (a) and the strike-slip slickensides near Huangbaici (b) (c)



图 10 二道坎痕量氢观测点地貌

Fig. 10 The geomorphology of the trace hydrogen observation point at Erdaokang

(Zgonnik, 2020; Johnsgard, 1988)。乌海盆地深部构造特征具有与银川、河套断陷相似的地堑形式(图 11)(梁宽, 2019; 高泽民, 2020)。根据深部地震反射资料, 在盆地中心下方埋深 45~50 km 处为莫霍面, 莫霍面与中地壳之间存在 1 条倾角近乎直立的地壳深断裂, 为上地幔热液物质的上涌提供了运输通道(高泽民, 2020)。邓起东等(2007)研究显示, NE—NEE 向是该区域应力场的主压应力方向, 主压应力通过青藏块体东北缘与鄂尔多斯块体西南缘的会聚直接作用块体其余边界, 形成众多环绕鄂尔多斯块体的共轭剪切破裂带。桌子山西缘断裂带地处鄂尔多斯块体西北缘构造变形的关键位置, 其发育特征及发育环境明显受到鄂尔多斯块体深部应力剪切运动的控制(高泽民, 2020)。

摩尔沟痕量氢观测点位于桌子山西缘断裂带北段山—盆地转换位置的正断层上盘陡坎, 千里沟以北断裂冲沟右旋拐弯明显, 其北侧的千钢断裂为倾向 NE 的逆冲断层, 黄河边观测点北侧表现出右行右阶式的走滑断层特性, 在区域应力的作用下, 摩尔沟痕量氢观测点所处的区域具有一定的拉张分量, 因

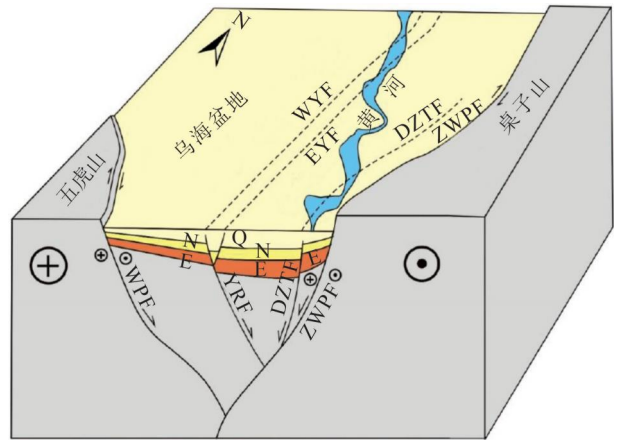


图 11 乌海盆地结构图(据梁宽, 2019)

Fig. 11 Structural diagram of the Wuhai Basin

(from Liang Kuan, 2019&)

ZWPF—桌子山西缘断裂; WPF—五虎山山前断裂; YRF—黄河隐伏断裂; WYF—黄河隐伏断裂西支; EYF—黄河隐伏断裂东支; DZTF—大中滩断裂

ZWPF—Zhuozhi Mountain western margin fault; WPF—Wuhushan piedmont fault; YRF—Yellow River blind fault; WYF—western branch of Yellow River blind fault; EYF—eastern branch of Yellow River blind fault; DZTF—Dazhongtan fault

此摩尔沟痕量氢观测点属于构造灵敏点, 在孕震阶段, 地下应力积累可能会导致岩石出现微小裂缝, 正断层的特性也利于地下富集的大量氢气快速向地表运移。随着应力的释放, 裂隙趋向于闭合, 地下氢气向地表运移受阻, 断层氢气体积分数恢复至正常值。

黄河边痕量氢观测点处于桌子山西缘断裂带中段甘德尔山前, 其南侧表现为右行左阶式的走滑断层特性, 整体挤压、走滑的性质不利于断层氢气向地表大量运移。研究显示, 与氢气通过纯水的流动相比, 氢气通过水饱和和多孔介质的通量会降低到原来的十分之一, 这种阻碍作用可能与范德华半径有关(Zgonnik, 2020)。黄河边痕量氢观测点距离黄河河岸仅为 76 m, 河水渗透可能会堵塞该点处的断层氢气运移裂隙, 对断层氢气运移也会有较大的影响。

二道坎痕量氢观测点处于桌子山西缘断裂带南段末尾, 表现出挤压的特性, 断层活动时间较早。从图 3 上看, 黄河边痕量氢观测点和二道坎痕量氢观测点在震前 3 d 至震后 5 d 左右断层氢气体积分数变化有些许波动, 但是变化幅度很小, 这也许说明黄河边痕量氢观测点和二道坎痕量氢观测点断层氢气对于此次地震也有响应, 只不过受限于地质构造及其活动以及环境的影响, 积累的断层氢气以一个更长的时间进行释放。以上或许是黄河边痕量氢观测

海洋等(2020)总结的库车 Ms5.7 地震前阿克苏西大桥断层氢气体积分数异常变化趋势基本相同。

5 结论

(1)通过对多个台站长期观测记录和数据特征以及异常因素分析,确认银川 2025 年 2 月 20 日 Ms4.2 级地震前,乌海盆地摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数异常为震前短临异常,异常变化趋势为震前 4 h 氢气体积分数快速上升—地震—震后 1 h 转折下降—震后 37 h 恢复到背景值。与已有研究实例相比,氢气体积分数异常变化趋势基本相同,差异之处在于临震时间更短,异常值较背景值的倍数更大。震前 4 h 出现临震异常在已有的断层氢气体积分数异常观测实例中尚属首次。

(2)通过区域构造格局与短临异常的关系,认为摩尔沟痕量氢观测点氢气体积分数异常升高与特定的构造部位有关。摩尔沟痕量氢观测点处于桌子山西缘断裂带北段山—盆地转换位置的正断层上盘陡坎,在区域构造格局中,观测点所处的区域具有一定的拉张分量,利于地下富集的大量氢气能够快速向地表运移。

(3)地质构造及其活动(如应力变化、破裂)以及环境能够影响断层氢气的运移和扩散,即使同处一条断裂带,断层氢气体积分数变化也会因所处不同位置的构造状态、应力变化以及地下水等因素影响而有不同,研究地质构造及其活动与断层氢气的物理、化学性质的耦合在地震孕育等领域具有重要意义,这对于地下流体观测台站的布设策略也有一定的启示作用。

致谢:审稿专家对本文的审阅提出了详细的修改意见,刘耀炜研究员和张磊副研究员对本文的后续修改提出了宝贵意见,谨致深切谢意。

注 释 / Notes

- ① 中国地震局地壳应力研究所. 2018. 乌海市城市活断层探测与地震危险性评价技术报告.
- ② 中国地震局地壳应力研究所. 2018. 乌海市活断层探测与地震危险性评价及规划区地震小区划项目目标区活动断层分布图(1:50000)及说明书.
- ③ 地震活动断层探索数据中心 (<https://www.activefault-datacenter.cn/>).

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 白晓川,常明,李青梅,唐浩. 2021. 灵武上桥痕量氢观测台建设与地震预测前景. 防灾减灾学报, 37(1): 46~50.
- 车用太,鱼金子. 1999. 地壳放气动态监测与张北—尚义 Ms6.2 级地震预报. 地质论评, 45(1): 59~65.
- 车用太,刘耀炜,何镛. 2015. 断层带土壤中 H₂ 观测——探索地震短临预报的新途径. 地震, 35(4): 1~10.
- 车用太,鱼金子,张培仁,刘成龙. 2002. H₂ 与 He 的映震灵敏性及其干扰初析. 地震, 22(2): 94~103.
- 车用太,鱼金子. 2004. 地下流体典型异常的调查与研究. 北京: 气象出版社: 1~439.
- 邓起东,卢造勋,杨主恩. 2007. 城市活动断层探测和断层活动性评价问题. 地震地质, 29(2): 189~200.
- 杜建国,宇文欣,李圣强,简春林,朱自强,陈华静,康春丽. 1998. 八宝山断裂带逸出氢的地球化学特征及其映震效能. 地震, 18(2): 155~162.
- 范雪芳,刘国俊,黄春玲,何镛,李孝楠. 2014. 山西东郭断层气氢浓度异常调查与研究. 地震研究, 37(2): 171~177.
- 范雪芳,杨芷萌,李宏伟,吴桂娥,韩晓飞. 2020. 断层带土壤 H₂ 浓度变化特征及影响因素研究. 地震研究, 43(2): 302~309.
- 高泽民. 2020. 桌子山西缘断裂晚第四纪活动特征及大震危险性分析. 导师:刘兴旺. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所硕士学位论文.
- 英雄南,张家声,李天斌,刘峰,冯军. 2012. 南北地震带北段与蒙古中部活动断裂构造特征. 地震地质, 34(4): 637~658.
- 李娜,邢喜民,许秋龙. 2022. 气温、气压对数字化断层土壤 H₂ 浓度变化影响研究. 内陆地震, 36(3): 244~254.
- 李滔,马建新,丁宁霞,苏宁. 2020. 夏河 5.7 级地震前青海地下流体台网异常特征研究. 地震工程学报, 42(3): 791~798.
- 梁宽. 2019. 鄂尔多斯块体西北缘晚第四纪构造活动特征研究. 导师:田勤俭,马保起. 北京: 中国地震局地质研究所博士学位论文.
- 廖丽霞,秦双龙,叶威. 2013. 泉州局一号井水位异常的调查与研究. 内陆地震, 27(1): 67~73.
- 刘海洋,赖爱京,冯英,潘振生. 2020. 2017 年 9 月 16 日库车 Ms5.7 地震前阿克苏西大桥断层氢异常可靠性分析. 内陆地震, 34(2): 187~195.
- 刘耀炜,陈华静,车用太. 2006. 我国地震地下流体观测研究 40 年发展与展望. 国际地震动态, 36(7): 3~12.
- 孙建中,李慧琴,马媛. 2013. 地震预测方法评论与建议. 地质论评, 59(3): 595~600.
- 孙建中. 2010. 再论“地震预报的关键在于监测断层”. 地质论评, 56(6): 838~840.
- 孙小龙,邵志刚,司学芸,向阳,刘冬英. 2017. 断层带土壤氢气浓度测量及其影响因素. 大地测量与地球动力学, 37(4): 436~440.
- 邢成起,王彦宾. 1991. 桌子山断裂带及其新活动特征. 西北地震学报, 13(3): 86~88.
- 张培仁,王基华,孙凤民. 1993. 氢——预报地震的灵敏元素. 地震地质, 15(1): 69~77.
- 张涛,朱成英,向阳. 2016. 阿克苏痕量氢观测资料初步分析. 内陆地震, 30(2): 162~167.
- 钟骏,王博,闫玮,马玉川. 2021. 阿克苏断层氢气浓度动态特征及其映震效能. 地震学报, 43(5): 615~627+679.
- 周慧玲,苏鹤军,张慧,李晨桦. 2019. 基于地震孕震物理模式的地下流体前兆空间分布特征分析. 地质论评, 65(z1): 17~18.
- Bai Xiaochuan, Chang Ming, Li Qingmei, Tang Hao. 2021&. The construction of Lingwu Shangqiao trace hydrogen observatory and the prospect of earthquake prediction. Journal of Disaster Prevention and

- Reduction, 37(1): 46~50.
- Che Yongtai, Liu Yaowei, He Lan. 2015&. Hydrogen monitoring in fault zone soil gas—a new approach to short/immediate earthquake prediction. *Earthquake*, 35(4): 1~10.
- Che Yongtai, Yu Jinzi, Liu Wuzhou. 1999&. Dynamic Monitoring of Degassing of the Crust and Prediction of the Zhangbei—Shangyi Earthquake of Magnitude 6. 2. *Geological Review*, 45(1): 59~65.
- Che Yongtai, Yu Jinzi, Zhang Peiren, Liu Chenglong. 2002&. The preliminary analysis of earthquake-reflecting sensitivity and its interference of H₂ and He. *Earthquake*, 22(2): 94~103.
- Che Yongtai, Yu Jinzi. 2004#. Investigation and study on typical anomalies of underground fluid. Beijing: China Meteorological Press, 1~439.
- Deng Qidong, Lu Zaoxun, Yang Zhuen. 2007&. Remarks on urban active faults exploration and associated activity assessment. *Seismology and Geology*, 29(2): 189~200.
- Du Jianguo, Yuwen Xin, Li Shengqiang, Jian Chunlin, Zhu Ziqiang, Chen Huajing, Kang Chunli. 1998&. The geochemical characteristics of escaped radon from the babaoshan fault zone and its earthquake reflecting effect. *Earthquake*, 18(2): 155~162.
- Fan Xuefang, Liu Guojun, Huang Chunling, He Lan, Li Xiaonan. 2014. Investigation and research of gas hydrogen concentration anomaly of Dongguo fault in Shanxi. *Journal of Seismological Research*, 37(2): 171~177.
- Fan Xuefang, Yang Zhimeng, Li Hongwei, Wu Guie, Han Xiaofei. 2020&. Research on variation characteristics and influence factors of hydrogen concentration in the soil. *Journal of Seismological Research*, 43(2): 302~309.
- Gao Zemin. 2020&. Characteristics of late quaternary activities and risk analysis of great earthquakes on the western margin of table mountain. Supervisor: Liu Xingwang, Lei Qiyun. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology Master Thesis.
- Hirose T, Kawagucci S, Suzuki K. 2011. Mechanoradical H₂ generation during simulated faulting: Implications for an earthquake-driven subsurface biosphere. *Geophysical Research Letters*, 38(17): L17303. DOI:10.1029/2011GL048850.
- Huang Xiongnan, Zhang Jiasheng, Li Tianbin, Liu Feng, Feng Jun. 2012&. Characteristics of active faults between the north segment of the north—south seismic belt and the central Mongolia. *Seismology and Geology*, 34(4): 637~658.
- Johnsgard S. 1988. The fracture pattern of north—central Kansas and its relation to hydrogen soil gas anomalies over the Midcontinent Rift System[M]. University of Kansas.
- Li Na, Xing Ximin, Xu Qiulong. 2022&. Impact study of air temperature and pressure to fault soil H₂ concentration. *Inland Earthquake*, 36(3): 244~254.
- Li Tao, Ma Jianxin, Ding Ningxia, Su Ning. 2020&. Anomaly characteristics of the Qinghai underground fluid network before the Xiahe M5.7 earthquake. *China Earthquake Engineering Journal*, 42(3): 791~798.
- Liang Kuan. 2019&. Late Quaternary tectonic activity characteristics of the northwestern margin of the Ordos block. Supervisor: Tian Qinjian, Ma Baoqi. Beijing: Doctoral Dissertation of Institute of Geology, China Earthquake Administration.
- Liao Lixia, Qin Shuanglong, Ye Wei. 2013&. Research on water level anomalies of no. 1 well in Quanzhou. *Inland Earthquake*, 27(1): 67~73.
- Liu Haiyang, Lai Aijing, Feng Ying, Pan Zhensheng. 2020&. Reliability analysis of hydrogen anomaly in Akesu west bridge fault before Kuche Ms5.7 earthquake on September 16th, 2017. *Inland Earthquake*, 34(2): 187~195.
- Liu Yaowei, Chen Huajing, Che Yongtai. 2006&. Retrospect and prospect of observation and study on seismic underground fluid in China. *Recent Developments in World Seismology*, 36(7): 3~12.
- Lombardi S, Voltattorni N. 2010. Rn, He and CO₂ soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults. *Applied Geochemistry*, 25(8): 1206~1220.
- McCarthy J, Cunningham K, Roberts A, Dietrich J. 1986. Soil gas studies around hydrogen-rich natural gas wells in northern Kansas. U. S. Geological Survey: 86~461.
- Seewald J, Cruse A, Saccoccia P. 2003. Aqueous volatiles in hydrothermal fluids from the Main Endeavour Field, northern Juan de Fuca Ridge: Temporal variability following earthquake activity. *Earth and Planetary Science Letters*, 216(4): 575~590.
- Sun Jianzhong. 2010#. Redisussion on the key to earthquake prediction: Monitoring faults. *Geological Review*, 56(6): 838~840.
- Sun Jianzhong, Li Huiqin, Ma Yuan. 2013#. Comments and Suggestions on Earthquake Prediction Methods. *Geological Review*, 59(3): 595~600.
- Sun Xiaolong, Shao Zhigang, Si Xueyun, Xiang Yang, Liu Dongying. 2017&. Soil hydrogen concentration in fault zone: Analysis of corresponding influence factors. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 37(4): 436~440.
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, Fujii N, Notsu K. 1980. Hydrogen release: New indicator of fault activity. *Science*, 210(4466): 188~190.
- Xing Chengqi, Wang Yanbin. 1991&. Zhuozishan fault zone and its neoactive characteristics. *Northwestern Seismological Journal*, 13(3): 86~88.
- Zgonnik V. 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews: The International Geological Journal Bridging the Gap between Research Articles and Textbooks*, 203(8): 103140. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103140.
- Zhang Peiren, Wang Jihua, Sun Fengmin. 1993&. Hydrogen—a sensitive element to predictable earthquake. *Seismology and Geology*, 15(1): 69~77.
- Zhang Tao, Zhu Chengying, Xiang Yang. 2016&. Primary research on observation data of trace amounts of hydrogen in Akesu. *Inland Earthquake*, 30(2): 162~167.
- Zhong Jun, Wang Bo, Yan Wei, Ma Yuchuan. 2021&. Dynamic characteristics of fault hydrogen concentration in Aksu and its earthquake reflecting efficiency. *Acta Seismologica Sinica*, 43(5): 615~627+679.
- Zhou Huiling, Su Hejun, Zhang Hui, Li Chenhua. 2019#. Underground fluid spatial distribution characteristics based on the seismogenic physical model. *Geological Review*, 65(z1): 17~18.

Response characteristics and structural analysis of hydrogen gas from faults in the Wuhai Basin to the Yinchuan Ms4.2 earthquake

WANG Youpeng¹⁾, LI Dewen²⁾, ZHENG Na¹⁾, LI Xin³⁾, ZHAO Xiaolong³⁾, SU Shibing⁴⁾

1) Wuhai Earthquake Agency, Wuhai, Inner Mongolia, 016000;

2) National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergence Management, Beijing, 100085;

3) Wuhai Emergency Management Bureau, Wuhai, Inner Mongolia, 016000;

4) Bayanhot Earthquake Monitoring Center Station, Alxa Left Banner, Inner Mongolia, 750300

Objectives: During the process of migrating and accumulating toward the Earth's surface, fault-related hydrogen gas is influenced by both tectonic and non-tectonic factors. Based on the spatio-temporal variations of fault hydrogen volume fractions in the Wuhai Basin before and after the Yinchuan Ms 4.2 earthquake on February 20, 2025, and their relationship with regional tectonic features, the authors aim to clarify the significance of the coupling between the geological structures and activities of the Wuhai Basin and the physical/chemical properties of fault hydrogen in earthquake preparation and related fields.

Methods: We adopted a research method combining qualitative and quantitative analyses to systematically analyze the annual variation characteristics of fault hydrogen volume fractions in the Wuhai Basin. The Pearson correlation analysis method was used to study the relationship between the changes in fault hydrogen volume fractions at the Molegou trace hydrogen observation point and air temperature as well as air pressure. The interference factors affecting the fault hydrogen volume fractions at the Molegou trace hydrogen observation point were excluded one by one using the elimination method.

Results: ① Through the analysis of long-term observation records, data characteristics and abnormal factors from multiple stations, it is confirmed that before the Yinchuan Ms4.2 earthquake, the abnormal hydrogen volume fraction at the Moergou trace hydrogen observation site in the Wuhai Basin is a short-term pre-seismic anomaly. The trend of the abnormal change is that the hydrogen volume fraction value rises rapidly 4 hours before the earthquake → the earthquake occurs → it turns to decline 1 hour after the earthquake → and it recovers to the background value 37 hours after the earthquake. Compared with the existing research cases, the trend of the abnormal change in hydrogen volume fraction is basically the same. The differences lie in the shorter imminent earthquake time and a much larger multiple of the abnormal value compared to the background value. ② Through the relationship between the regional tectonic pattern and short-term anomalies, it is believed that the abnormal increase in hydrogen volume fraction at the Moore Trench trace hydrogen observation point is related to specific tectonic positions. The Moore Trench trace hydrogen observation point is located on the hanging wall steep slope of a normal fault at the mountain-basin transition position in the northern segment of the west margin fault zone of Zhuozi Mountain. In the regional tectonic pattern, the area where the observation point is located has a certain tensile component, which is conducive to the rapid migration of a large amount of hydrogen enriched underground to the surface. ③ Geological structures and their activities (such as stress changes and ruptures), as well as the environment, can affect the migration and diffusion of fault hydrogen. Even within the same fault zone, the changes in fault hydrogen volume fraction will vary due to factors such as the tectonic state, stress changes and groundwater at different locations. Studying the coupling between geological structures and their activities and the physical and chemical properties of fault hydrogen is of great significance in the field of earthquake preparation and other aspects.

Conclusions: These understandings provide a basis for the response of the abnormal fault hydrogen volume fraction in the Wuhai Basin to earthquakes and the relationship with tectonics. At the same time, they also have

certain guiding significance for the layout of underground fluid observation stations.

Keywords: fault hydrogen; Yinchuan M_s 4.2 earthquake; short-term and imminent anomaly; Wuhai Basin; station layout

Acknowledgements: This paper is the result of a project funded by the Director’s Fund Project of the Inner Mongolia Autonomous Region Earthquake Administration (No. 2024QN05). Peer Reviewers have carefully reviewed the preliminary draft of this article and provided detailed suggestions. Researcher Liu Yaowei and Associate Researcher Zhang Lei provided valuable suggestions for the subsequent revisions of this paper. We would like to express our deep gratitude.

First authors: WANG Youpeng, male, born in 1994, Engineer, is mainly engaged in the work of precursor monitoring and analysis at stations; Email: 994754448@qq.com

Correspondence author: LI Dewen, male, born in 1970, Ph. D., researcher, is mainly engaged in geomorphology and quaternary research; Email: lidewen@263.net

Manuscript received on: 2025-04-30; Accepted on: 2025-07-03; Published online on: 2025-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.07.021

Edited by: LIU Zhiqiang

2025“中国最具国际影响力学术期刊”和“中国国际影响力优秀学术期刊”揭晓

2025年12月11日中国知网和清华大学图书馆发布了2025“中国最具国际影响力学术期刊”和“中国国际影响力优秀学术期刊”报告。

中国地质学会主办期刊《地质学报》《Acta Geologica Sinica(English Edition)》《地质论评》连续第十四次蝉联“中国最具国际影响力学术期刊”和“中国国际影响力优秀学术期刊”称号。

“中国最具国际影响力学术期刊”和“中国国际影响力优秀学术期刊”是在全国正式出版七千多种统计源期刊的基础上,将中国学术期刊分为科技英文、科技中文、社科英文、社科中文4组,分别计算每组期刊的国际引证传播指数(ICCI),并按ICCI降序遴选了330种“中国最具国际影响力学术期刊”和330种“中国国际影响力优秀学术期刊”(以下简称“TOP期刊”)。《地质学报》国际引证传播指数是260.674,国际他引总被引频次4514,国际他引影响因子1.078。《地质学报》(英文版)国际引证传播指数是43.196,国际他引总被引频次3717,国际他引影响因子1.491;《地质论评》国际引证传播指数是115.827,国际他引总被引频次

1903,国际他引影响因子0.479。

中国知网和清华大学图书馆已连续14年联合研制发布《中国学术期刊国际引证年报》,通过统计国际期刊对中国期刊的引用数据,客观反映我国学术期刊在国际学术研究领域的影响力和话语权现状。《中国学术期刊国际引证年报》(2025版)统计源期刊共计27117种,涵盖WoS、Scopus、EI、Medline4个国际索引数据库大部分期刊。该报告统计了7240种中国学术期刊的国际被引。数据显示,2024年中国学术期刊国际他引总被引频次为300.9万次,境外施引作者数为511.5万人次。国际影响力TOP期刊品牌已经得到期刊界和科研管理部门的广泛认可,在助力中国期刊走向国际舞台、树立国际学术品牌和文化自信方面发挥了积极、重要的作用。

LIU Zhiqiang. 2025’s “The Most Influential International Academic Journals of China” and “The Outstanding Influential International Academic Journals of China” issued

