

贾东辉,余怀忠,赵彬彬,等. 2025. 基于加卸载响应比理论的断层氢气异常机理研究[J]. 地震研究, 48(2): 210–219, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0022.

Jia D H, Yu H Z, Zhao B B, et al. 2025. Research on fault hydrogen anomaly mechanism based on the Load/Unload Response Ratio theory [J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 210–219, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0022.

基于加卸载响应比理论的断层氢气异常机理研究*

贾东辉^{1,2}, 余怀忠^{3*}, 赵彬彬², 张涛², 刘海洋⁴

(1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 中国地震台网中心, 北京 100045; 4. 阿克苏地区地震监测中心站, 新疆 阿克苏 843000)

摘要: 使用新疆阿克苏台和库尔勒台断层氢气观测数据, 研究氢气的映震能力; 结合潮汐应力与氢气动态变化之间的关系, 采用加卸载响应比方法对这2个台断层氢气的异常变化机理和映震机制进行研究, 分析潮汐应力加载状态下氢气的响应特征; 对比原始观测数据与加卸载响应比映震效能, 提高异常识别能力。结果表明: 断层氢气变化具有潮汐效应, 在地壳应力加载作用下, 对潮汐应力反应灵敏, 氢气高值异常多出现在调制时段; 加卸载响应比计算结果显示, 相对于原始观测数据异常指标报准率, 加卸载响应比的预报效能更优, $LURR = 1.02$ 可作为断层氢气的异常阈值, 超阈值后观测点周边地区短期存在5级以上地震活动危险性。该指标通过了 R 值检验评估。

关键词: 断层氢气; 加卸载响应比; 异常机理; 地震前兆; 构造活动

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2025)02-0210-10

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0022

0 引言

地壳中的气体是地下流体的重要组成部分。断层破碎带所具有的裂隙是气体迁移的天然通道, 由断裂带释放的地下气体因其携带地壳深部信息而成为探索地壳内部物质演化和动力学过程的重要信息源 (Beckon et al., 2008)。氢气作为粒径最小、质量最轻的一种气体, 具有迁移速度快、穿透性强、难溶于水等特点, 是断层逸出气体的重要组成部分。氢气在大气中含量较少, 约为0.5 ppm, 而在地壳深部5~8 km处蕴藏较丰富, 尤其是在断裂带处逸出较多、浓度较高 (车用太等, 2015)。“汶川沿断层深钻科研项目”WFSD-2/3井观测显示, 在地下600~700 m和1 000~2 000 m深处出现富氢区。

国内外地震学家已经把断层氢气作为监测构造活动或者地震活动的一种有用工具 (Chen et al., 2018; 刘兆飞等, 2019; Zgonnik, 2020; 刘春国等, 2022)。范雪芳等 (2016)、康健等 (2019)、刘海洋等 (2020) 在一些地震前观测到明显的断层氢气异常变化; 方震等 (2020)、范雪芳等 (2020) 认为断层氢气一般对周边地区5级以上地震反映较灵敏, 映震效果较好, 这些震例说明氢气变化可能是地震成核过程中的有效地球化学信号, 但是其背后的异常形成机理以及影响因素还需进一步探索, 异常特征的可重复性还需进一步论证。从观测数据来看, 氢气变化与气象因素和地表环境因素有一定关系 (钟骏等, 2021; 闫玮等, 2023); 从构造上讲, 断层滑动速率、断层闭锁程度、上下盘裂隙发育程度等也会影响氢气的

* 收稿日期: 2024-04-15.

基金项目: 中国地震局震情跟踪定向工作任务 (2024010313); 国家自然科学基金地震联合基金 (U2039205); 国家重点研发计划 (2018YFE0109700); 中国地震局监测、预报、科研三结合课题 (3JH-202401055).

第一作者简介: 贾东辉 (1989-), 工程师, 主要从事地震地下流体与地震预测研究. E-mail: jdh830000@163.com.

通信作者简介: 余怀忠 (1975-), 研究员, 主要从事地震孕育机理和预测理论研究. E-mail: yuhz750216@sina.com.

观测浓度（孙小龙等，2017）。这些因素混合在一起将会影响研究人员对地震前兆异常的识别，很难判断干扰变化中是否包含构造活动信息，这需要对氢气在应力增强背景下的异常响应机制进一步深入分析。

加卸载响应比（Load/Unload Response Ration, LURR）是研究非线性系统在失稳前加载和卸载不同响应的参数。尹祥础等（1987，1994）基于岩石本构关系提出了加卸载响应比理论在地震预测中的应用，之后与多种地球物理观测相结合（许延军等，2022；Yu *et al.*, 2020；辛建村等，2022；Zhao *et al.*, 2022；Jia *et al.*, 2022），从力学角度获得了地球物理场异常认知。岩石介质在地壳应力作用下，当应力积累水平超越岩石弹性极限时将进入塑性屈服阶段，潮汐应力的扰动会加速岩石破裂失稳，如2007年云南宁洱 $M_s 6.4$ 地震受潮汐应力调制影响而失稳破裂（解朝娣等，2015）。断层氢气在应力加载和卸载过程中的响应如何？氢气变化是否具有固体潮效应？基于观测数据，使用加卸载响应理论可研究震源区介质破裂演化物理过程，在岩石的破裂过程中氢气逸出量会发生变化，当潮汐应力加载到岩石裂隙表面时可能也会影响氢气浓度的动态变化，这为开展氢气加卸载响应比研究提供了理论支撑。钟骏等（2021）研究发现氢气浓度变化具有半日周期，并推测这可能与固体潮或者仪器固有频率有关。本文借鉴中国 CSEP 检验中心的加卸载响应比理论模型，将加卸载响应比方法应用于新疆阿克苏台和库尔勒台的断层氢气观测值的处理，研究氢气异常变化与潮汐应力加载之间的关系，判断应力增强对氢气变化产生的影响，进一步认识氢气异常变化机理过程，提高异常的识别判定能力。

1 数据与方法

1.1 观测台站及数据概况

本文研究使用新疆阿克苏和库尔勒2个断层氢气观测台站的数据，2个观测台站均位于塔里木盆地和天山结合处（图1）。受印度板块推挤，塔里木块体向北插入天山下，使该地区断裂比较发育（张先康等，2002），地震活动强烈，图1展示了

2013—2024年观测台站周边地区 $M_s \geq 5.0$ 地震分布。阿克苏氢气观测台位于南天山西段柯坪断裂的东端次级断裂上，该断裂倾向 SE，倾角 $70^\circ \sim 85^\circ$ ，为全新世活动断层，岩石裂隙较为发育（刘海洋等，2020；钟骏等，2021），台站周边地区地壳变形强烈，由南向北发育一系列叠瓦状逆冲褶皱构造，中强地震频发，2024年1月23日乌什7.1级地震就发生在此区域附近。库尔勒氢气观测台位于南天山东段北轮台断裂（霍拉山山前断裂）、辛格断裂、兴地断裂的交会处，北轮台断裂属于全新世活动断裂，倾角 $60^\circ \sim 75^\circ$ ，第四纪以来活动性明显，观测断层为北轮台—辛格衔接断层，走向 NE—NEE，倾向 NW，倾角 $35^\circ \sim 80^\circ$ （闫玮等，2023）。

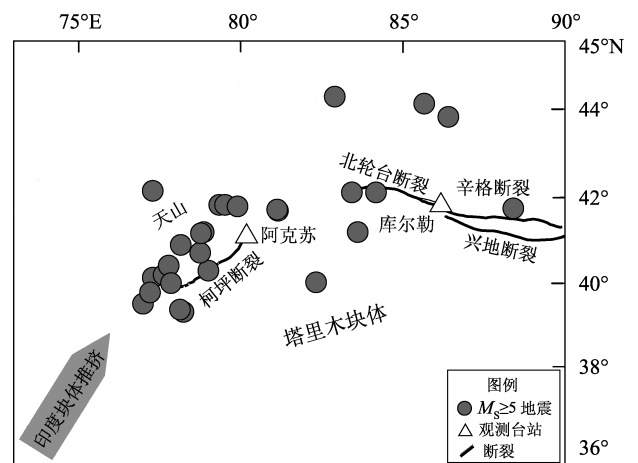


图1 阿克苏台和库尔勒台周边地区主要断裂和2013—2024年 $M_s \geq 5.0$ 地震分布

Fig. 1 Distribution of $M_s \geq 5.0$ earthquakes from 2013 to 2024 and the main faults in the vicinity of Aksu station and korla station

2个台的氢气观测始于2013年11月，数据采样间隔为整点值，观测数据整体上平稳可靠（图2），但是存在气象、电源故障、仪器更换、仪器背景噪声等引起的突跳现象。图2中实线框部分为干扰引起的变化，虚线框为异常阶升变化，异常对应的地震用箭头进行了标注，反映了震前氢气异常形态。从图中可看出，干扰变化与异常变化具有相似形态，会影响工作人员对异常的识别。库尔勒台氢气观测数据具有较好的年变趋势（图2a），与气象因素有一定的相关性（钟骏等，

2021; 范雪芳等, 2020), 但是对其周边 300 km 范围内 $M_s \geq 5$ 和 400 km 范围内 $M_s \geq 6$ 地震没有明显的震前响应。阿克苏台氢气观测数据也具有年变趋势, 并且在其周边 300 km 范围内 10 次 $M_s \geq 5.0$ 地震前出现了短期异常变化 (图 2b), 为震情短临跟踪提供了帮助。

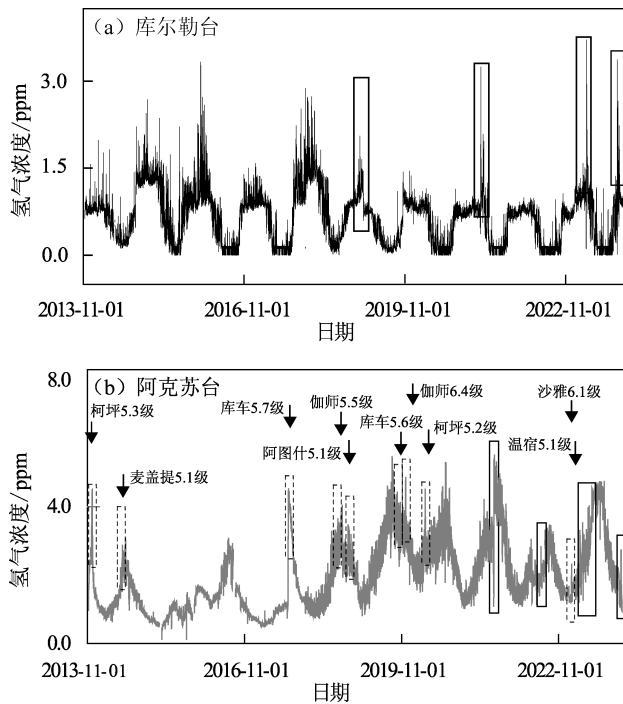


图 2 2013—2024 年库尔勒台 (a) 和阿克苏台 (b) 氢气观测年变曲线

Fig. 2 Annual hydrogen curve observed by Korla station (a) and Aksu station (b) from 2013 to 2024

1.2 研究方法

1.2.1 数据预处理

氢气观测数据与气象因素有一定相关性, 所以在计算之前先采用多元线性回归分析方法对数据进行处理, 消除气温、气压等气象因素对氢气浓度的影响。本文基于 MapSIS 软件采用滤波方法消除突跳和故障数据影响, 尽可能保留断层氢气真实数据, 从而获得断层活动变化特征。

1.2.2 加卸载响应比方法

加卸载响应比方法是从力学角度对非均匀脆性介质的损伤演化过程进行判断, 揭示该介质在受应力作用过程中的非线性变化过程 (尹祥础等,

1994)。图 3 为阿克苏台氢气整点观测值曲线 (虚线) 与台站所处位置理论固体潮曲线 (实线) 的对比。从图可以看到两者具有准同步性, 氢气的半日周期与理论固体潮具有较强相关性, 相关系数为 0.94, 说明氢气浓度变化包含了潮汐影响成分, 适用加卸载响应比方法进行计算。

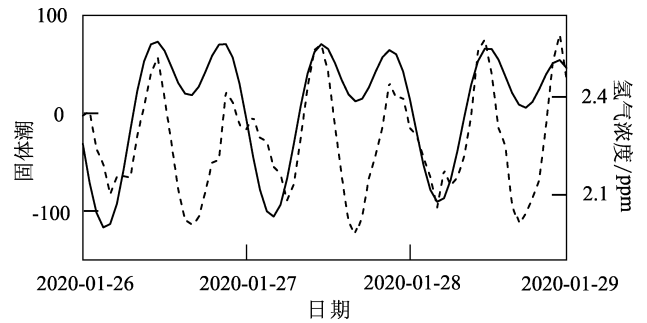


图 3 2020 年 1 月阿克苏台氢气浓度与理论固体潮对比

Fig. 3 Comparison of the hydrogen concentration and the theoretical earth tide recorded by Aksu station in January 2020

本文以 60 天窗长为时间窗的氢气浓度观测数据作为响应量, 计算加卸载响应比时间序列。加卸载响应比定义为:

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (1)$$

式中: “+”表示加载; “-”表示卸载。用 P 和 R 分别代表载荷和响应, 载荷 P 发生 ΔP 的变化时对应产生响应 R 的变化为 ΔR ; X 为某一时刻岩石响应率, 表示为:

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \left(\frac{R}{P} \right) \quad (2)$$

当系统处于弹性阶段时, 岩石对加载时的响应率与卸载时的响应率相当, 即 $X_+ \approx X_-$, $Y \approx 1$; 当系统处于扩容阶段时, 加载时的响应率明显大于卸载时的响应率, 即 $X_+ > X_-$, $Y > 1$ 。可以根据引潮力在观测点处引起的库仑应力变化 (ΔCFS) 来判断加载和卸载过程 (尹祥础, 尹灿, 1991), 引潮力在观测点处引起的库仑应力变化用潮汐有效剪应力在构造有效剪应力方向上的投影表示为:

$$\Delta CFS \approx \frac{\tau \mu}{|\mu|} \quad (3)$$

式中： τ 代表潮汐有效剪应力； μ 为断层面上的滑动矢量，即构造剪切应力方向，具体的计算方法见Yu等（2020）研究。考虑库仑应力的变化率，确定加载和卸载的参数可表示为：

$$p = \frac{d}{dt}(\Delta \tau \times \frac{\mu}{|\mu|}) \quad (4)$$

式中： $p > 0$ 表示加载， $p < 0$ 表示卸载。按照公式（4），结合任意观测点处的构造剪切应力方向（ μ ），即可以判定其任意时刻的加卸载状态。

本文选取的数据时段为2013年11月10日至2024年1月15日，数据窗口窗长为60天，滑动步长为20天，选取距离观测台站较近、属于同一构造区域的显著地震震源机制参数作为地质构造参数（表1），该参数代表了观测站区域构造特征，能够反映构造产状信息，不同构造参数将对加卸载响应比结果具有一定的影响。

表1 观测台站地质构造参数

Tab. 1 Parameters of the geological structures in the area where the observation stations lie in

观测台站	震源参数				
	走向/ (°)	倾角/ (°)	滑动角/ (°)	深度/ km	摩擦系数
库尔勒台	300	91	21	5	0.4
阿克苏台	200	56	90	6	0.4

1.2.3 映震效能评估方法

本文用 R 值评分方法进行预报效能评估，这是一种直观高效的效能检验方法，在效能评价中应用比较广泛（马宏生等，2004；王喜龙等，2022），计算公式为：

$$R = c - b = \frac{\text{报对地震次数}}{\text{应预报地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究总时间}} \quad (5)$$

式中： c 为地震报准率； b 为预报时间占有率。将 R 值与具有97.5%置信水平的 R_0 进行比较，若 $R > 0$ ，且 $R \geq R_0$ ，则通过效能检验。

2 研究结果

对阿克苏台和库尔勒台氢气观测值进行加卸

载响应比计算，结果如图4所示。由图可见，2个台站氢气 $LURR$ 背景值在1附近波动，但在震前出现了一些明显变化。库尔勒台自开始观测以来其周边地区300 km范围内发生 $M_s \geq 5$ 地震和400 km范围内发生 $M_s \geq 6$ 地震共计8次，地震的具体参数见表2。图4a与表2中地震的编号一一对应。将加卸载响应比时间序列与地震目录进行对比分析后发现，8次地震中有5次震前出现了 $LURR$ 高值异常，最大值为1.06，异常阈值参考均值+标准差（Deb *et al.*, 2018），选取为1.02，报准率为62.5%，漏报率为37.5%；按照阈值筛选，超阈值异常出现4次，后续均有 $M_s \geq 5.0$ 地震发生，异常对应率100%，虚报率为0。

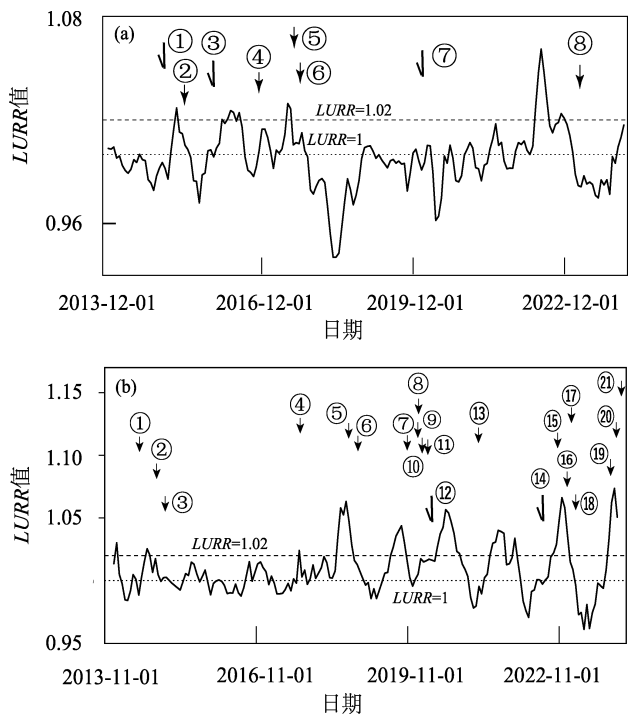


图4 2013—2024年库尔勒台（a）和阿克苏台（b）氢气加卸载响应比序列及其与地震关系

Fig. 4 The relationship between the hydrogen Load/Unload Response Ratio and the earthquakes at Korla station (a) and Aksu station (b) from 2013 to 2024

阿克苏台自观测以来周边地区300 km范围内发生 $M_s \geq 5.0$ 地震和400 km范围内发生 $M_s \geq 6.0$ 地震共计21次，地震的具体参数见表3，图4b中地震编号与表3中地震的编号一一对应，从

图中可以看出在地震较平静的 2015—2017 年, $LURR$ 值在 1 附近小幅波动, 而自 2017 年以后, $LURR$ 值波动幅度变大, 最大值为 2023 年 12 月 6 日的 1.07。以均值 + 1 倍标准差为异常阈值 (Deb *et al*, 2018), 此结果相对于背景变化能够突出显示异常。结合地震情况, 异常阈值选取为 1.02, 21 次地震中, 有 19 次地震前一段时间内出现 $LURR$ 值超阈值异常变化 (图 4b), 报准率为 90.5%, 漏报率为 9.5%; 按照阈值筛选, 超阈值异常出现 9 次, 有 8 次异常出现后在半年内发生了 $M_s \geq 5.0$ 地震, $LURR$ 值异常对应率 88.9%, 虚报率为 11.1%。

表 2 库尔勒台周边地区 $M_s \geq 5.0$ 地震与 $LURR$ 值异常对应统计

Tab. 2 Statistics of $M_s \geq 5.0$ earthquakes corresponding to the $LURR$ anomaly around Korla station

序号	发震日期	M_s	震源深度/ km	地点	震中距/ km	异常开始 日期	异常结束 日期	结束距发震 时间/d	对应 情况
①	2015-02-22	5.0	3.5	新疆沙湾	260	—	—	—	漏报
②	2015-06-25	5.5	9	新疆托克逊	180	2015-04-20	2015-05-13	43	报准
③	2016-01-14	5.3	5	新疆轮台	170	—	—	—	漏报
④	2016-12-08	6.2	6	新疆呼图壁	230	2016-04-07	2016-08-05	125	报准
⑤	2017-08-09	6.6	11	新疆精河	380	2017-06-11	2017-07-21	19	报准
⑥	2017-09-16	5.7	6	新疆库车	230	2017-06-11	2017-07-21	57	报准
⑦	2020-01-16	5.6	16	新疆库车	220	—	—	—	漏报
⑧	2023-01-30	6.1	50	新疆沙雅	385	2022-03-20	2022-11-02	89	报准

表 3 阿克苏台周边地区 $M_s \geq 5.0$ 地震与 $LURR$ 值异常对应统计

Tab. 3 Statistics of the $M_s \geq 5.0$ earthquakes corresponding to $LURR$ anomaly around Aksu station

序号	发震日期	M_s	震源深度/ km	地点	震中距/ km	异常开始 日期	异常结束 日期	结束距发震 时间/d	对应 情况
①	2014-07-09	5.0	8	新疆麦盖提	258	2014-01-10	2014-02-10	149	报准
②	2014-11-14	5.4	10.2	吉尔吉斯斯坦	270	2014-08-25	2014-09-24	51	报准
③	2015-01-10	5.0	10	新疆阿图什	272	2014-08-25	2014-09-24	108	报准
④	2017-09-16	5.7	6	新疆库车	292	2017-09-01	2017-09-08	8	报准
⑤	2018-09-04	5.5	8	新疆伽师	322	2018-06-02	2018-10-03	-29	报准
⑥	2018-11-04	5.1	22	新疆阿图什	236	2018-06-02	2018-10-03	32	报准
⑦	2019-10-27	5.0	11	新疆乌什	115	2019-06-30	2019-10-25	2	报准
⑧	2020-01-16	5.6	16	新疆库车	290	2019-06-30	2019-10-25	83	报准
⑨	2020-01-19	6.4	16	新疆伽师	288	2019-06-30	2019-10-25	86	报准
⑩	2020-02-15	5.0	15	吉尔吉斯斯坦	110	2019-06-30	2019-10-25	113	报准
⑪	2020-03-23	5.0	10	新疆拜城	100	2019-06-30	2019-10-25	150	报准
⑫	2020-050-9	5.2	15	新疆柯坪	125	—	—	—	漏报
⑬	2021-03-24	5.4	10	新疆拜城	100	2020-05-25	2020-11-21	123	报准
⑭	2022-07-03	5.2	10	新疆阿合奇	170	—	—	—	漏报
⑮	2022-10-16	5.1	17	新疆巴楚	260	2022-09-20	2023-01-18	-94	报准
⑯	2022-12-29	5.4	10	吉尔吉斯斯坦	110	2022-09-20	2023-01-18	-20	报准
⑰	2023-01-30	6.1	50	新疆沙雅	217	2022-09-20	2023-01-18	12	报准
⑱	2023-02-27	5.1	10	新疆温宿	90	2022-09-20	2023-01-18	40	报准
⑲	2023-11-08	5.4	10	新疆阿图什	220	2023-10-17	2023-12-26	-48	报准
⑳	2023-12-19	5.5	10	新疆阿图什	230	2023-10-17	2023-12-26	-7	报准
㉑	2024-01-23	7.1	22	新疆乌什	120	2023-10-17	2023-12-26	28	报准

3 讨论

3.1 原始观测数据与加卸载响应比时间序列映震效能对比分析

库尔勒台氢气原始观测数据在周围 $M_s \geq 5.0$ 地震前未出现明显异常，映震效能较弱。对库尔勒台氢气观测值经过加卸载响应比计算后，发现4次 $LURR$ 值异常，报准率为62.5%。利用 R 值进行映震效能评估检验（表4）显示，库尔勒台氢气 $LURR$ 值异常具有较好的短期预测意义（90天内发震）， $R = 0.4$ ，且 $R > R_0$ ；预测意义最优天数为130天，此时 R 相对 R_0 更为显著， $R = 0.48$ 。

表4 R 值检验结果统计

Tab. 4 R -value test results

评估数据	天数	R 值	R_0 值	R/R_0
库尔勒台氢气 $LURR$ 值	30	0.09	0.13	0.72
	90	0.40	0.34	1.18
	150	0.46	0.39	1.19
最佳预测期	130	0.48	0.39	1.25
阿克苏台氢气 $LURR$ 值	30	0.11	0.14	0.78
	90	0.20	0.21	0.96
	150	0.31	0.24	1.31
最佳预测期	150	0.31	0.24	1.31
阿克苏台氢气 原始数据	30	0.17	0.18	0.97
	90	0.22	0.22	1.00
	150	0.15	0.24	0.63
最佳预测期	80	0.25	0.22	1.12

阿克苏台氢气原始观测数据在震前反应较为灵敏，出现14次异常（表5），异常以快速上升为主，异常幅度在1 ppm以上。9次异常对应地震，对应率为64%，虚报率36%。阿克苏台周边地区21次 $M_s \geq 5.0$ 地震中，对应11次地震，报准率为52.4%，漏报率为47.6%。表4中 R 值计算显示，最佳预测期为80天， $R = 0.25$ ，且 $R > R_0$ ，说明阿克苏台氢气对短期预测有较大意义。在对阿克苏台氢气观测数据进行 $LURR$ 处理计算后， $LURR$ 异常对应率为88.9%，虚报率为11.1%，报准率为90.5%。对漏报率为9.5%，

$LURR$ 值异常和原始数据异常对应率进行对比，异常对应率提高了24.9%，报准率提高了38.1%，说明加卸载响应比异常效能更高。对其进行 R 值评估检验（表4），90天内 R 接近 R_0 ，最佳预测期为150天， $R = 0.31$ ，且 $R > R_0$ ，通过效能检验。结合 R 值评分结果可以看出，阿克苏台氢气原始异常优势预测期更偏向于短期，而 $LURR$ 值异常优势预测期略长，这可能有两方面原因，一是 $LURR$ 值异常报准率较高，占用时间较长；二是 $LURR$ 值异常代表了地震成核弱化的开始，预示着后续的局部应力释放和氢气的快速上升。从总体对比结果来看，断层氢气 $LURR$ 的映震效能要优于原始观测数据，说明加卸载响应比的时间序列演化对构造活动反应更灵敏。

3.2 异常响应机理分析讨论

加卸载响应比结果反映的是断层岩石中氢气在潮汐应力周期加载作用下的动态变化特征。潮汐应力加载到地壳裂隙表面时，围岩应力增加，通道收缩，压迫其中气体运移；在潮汐应力周期性加卸载作用下，裂隙做周期性张缩运动，并伴随有气体逸出量的动态周期性变化。当断层所处的应力环境处于临界状态时，加载的潮汐应力在断层应力的方向上促使围岩介质进一步破裂，裂隙密度增加。围岩介质的破裂、岩石新鲜破裂面的水岩反应、深部气体的运移等增加了断层中氢气的供给（Wang *et al.*, 2023; Zgonnik, 2020），而增加的地下流体，作用于围岩表面促使围岩发生雷宾德尔效应进一步弱化破裂（Giuntoli *et al.*, 2024）。

断层氢气的变化反映了构造活动变化，加卸载响应比计算结果显示氢气在潮汐应力作用下出现了不同的响应（Biagi *et al.*, 2006），从理论上讲，在原始观测数据异常中也应该包含潮汐调制信息。表5中显示的14次氢气异常的发生时间大部分为农历的朔、望和上下弦调制时间段附近，即异常时间与潮汐加卸载具有同步性。图5展示了阿克苏台氢气异常与理论固体潮同步关系对比，图中虚线框为氢气高值异常发生在固体潮汐加载峰值阶段，说明氢气释放异常与潮汐应力加卸载有很大关系，即当氢气异常出现在调制敏感时间段时，很有可能反映的是构造活动，后续地震的

表 5 阿克苏台氢气原始观测值异常对应地震统计

Tab. 5 The earthquakes corresponding to the anomalous hydrogen data at Aksu station

异常起始日期	异常结束日期	对应地震		震中距/km	异常幅度/ppm	对应情况
2013-11-30 (农历廿八)	2013-12-04	2013-12-01 (农历廿九)	柯坪 $M_s5.3$	134	1.197	报准
2014-06-20 (农历廿三)	2014-07-04	2014-07-09 (农历十三)	麦盖提 $M_s5.1$	258	1.482	报准
2017-08-30 (农历初九)	2017-09-02	2017-09-16 (农历廿六)	库车 $M_s5.7$	292	3.123	报准
2018-06-25 (农历十二)	2018-06-26	2018-09-04 (农历廿五)	伽师 $M_s5.5$	322	1.028	报准
2018-10-23 (农历十五)	2018-10-25	2018-11-04 (农历廿七)	阿图什 $M_s5.1$	236	1.395	报准
2019-08-26 (农历廿六)	2019-08-27	2019-10-27 (农历廿九)	乌什 $M_s5.0$	115	1.987	报准
2019-11-29 (农历初四)	2019-12-01	2020-01-16 (农历十二)	库车 $M_s5.6$	290	1.405	报准
		2020-01-19 (农历廿五)	伽师 $M_s6.4$	288		
2020-04-13 (农历廿一)	2020-04-14	2020-05-09 (农历十七)	柯坪 $M_s5.2$	125	1.907	报准
2020-08-07 (农历十八)	2020-08-09	—	—	—	1.33	虚报
2020-09-02 (农历十五)	2020-09-02	—	—	—	1.95	虚报
2020-09-29 (农历十三)	2020-09-30	—	—	—	2.106	虚报
2021-05-27 (农历十六)	2021-05-29	—	—	—	1.281	虚报
2021-10-28 (农历廿三)	2021-10-28	—	—	—	1.555	虚报
2023-01-29 (农历初八)	2023-01-30	2023-01-30 (农历初九)	沙雅 $M_s6.1$	217	0.97	报准
		2023-02-27 (农历初八)	温宿 $M_s5.1$	90		

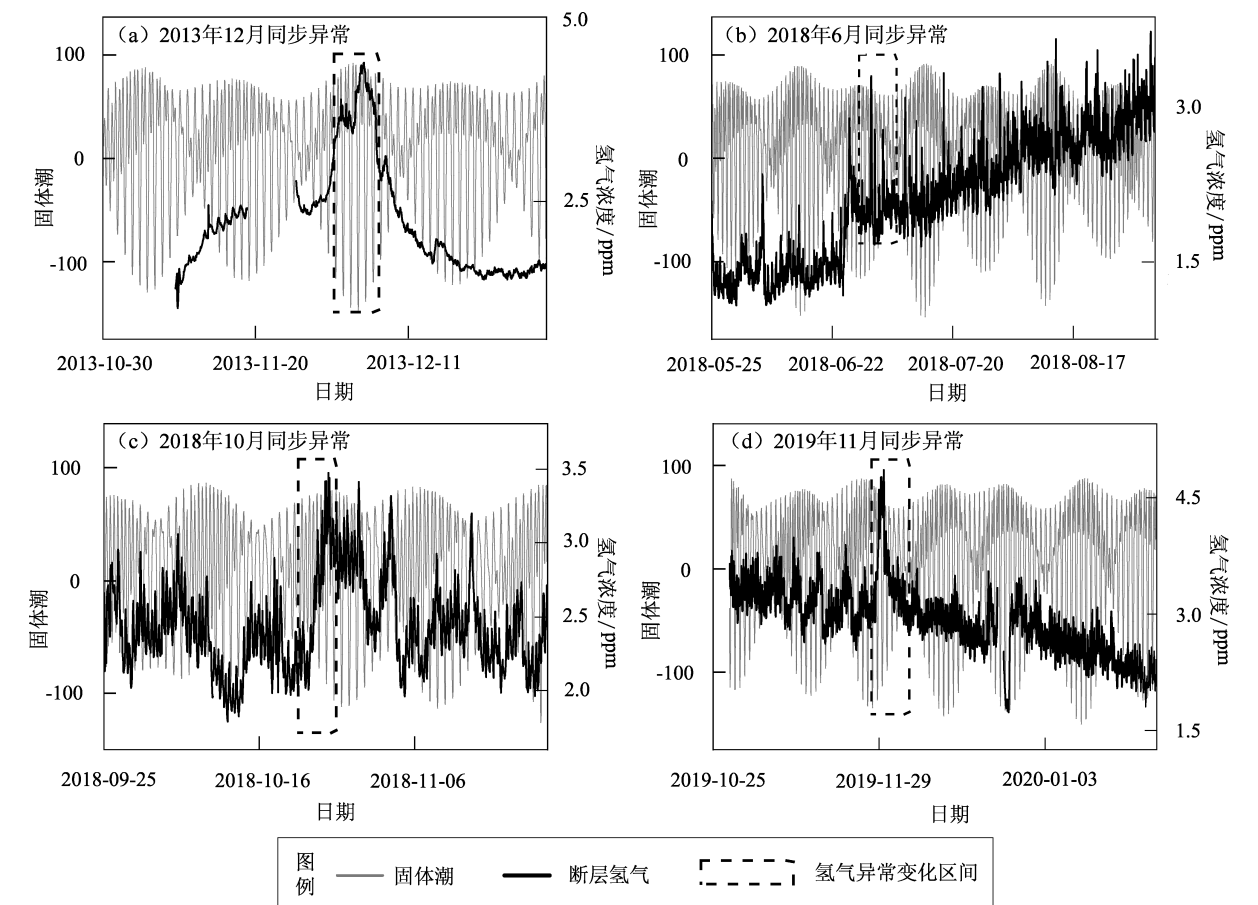


图 5 阿克苏台氢气异常与理论固体潮关系对比

Fig. 5 Relations between the hydrogen anomaly and the theoretical earth tide recorded by Aksu station

发生时间可能也需要关注调制时间段。使用2020—2021年阿克苏台氢气原始观测数据出现连续5次异常虚报，时间临近的几次变化有可能反映的是一组异常信息，构造活动中断层的蠕滑可能也会引起氢气异常释放。表2、3显示使用氢气原始观测值漏报地震与震源深度、震中距无明显关系，漏报原因可能与地壳应力的非均匀释放有一定关系。

从响应变化机理看，氢气的朔望调制潮汐效应反映了在潮汐应力作为正应力作用下地壳岩石裂隙的弹性张缩，改变了围岩压力，加速了氢气的释放。而加卸载响应比理论则从库仑剪切应力的角度反映了氢气的变化过程，预示着在断层面滑动矢量方向上剪切应力增强 (Yu *et al.*, 2020)，超过岩石的抗剪强度，造成岩石破裂、裂隙扩展。地震表征的岩石介质的破裂是由断层面上剪切应力作用形成的 (Byerlee, 1978; Stein *et al.*, 1994)。在地壳应力增强过程中，正应力促使岩石发生弹性变形，而剪应力才是岩石破裂、裂隙扩展的主要因素。Wang 等 (2023) 基于断层氢气来源分析认为，断层氢气的响应变化跟剪应力有较大关系。加卸载响应比异常的出现，说明地壳岩石介质处于高应力阶段，在潮汐有效剪应力加载下，岩石破裂和水岩反应加剧了氢气释放，裂隙的增加和贯通为地表氢气观测提供了帮助。此时加载阶段和卸载阶段的氢气逸出量响应变化出现明显差异，岩石介质进入亚失稳状态。

4 结论

本文对潮汐应力与新疆阿克苏台和库尔勒台断层氢气观测数据氢气动态变化之间的关系进行分析，利用加卸载响应比方法对断层氢气的异常变化机理和映震机制进行了研究，主要得到以下结论：

(1) 断层氢气变化具有潮汐效应，在地壳应力加载作用下，氢气变化对潮汐应力反应灵敏。

(2) 阿克苏台断层氢气原始观测数据的异常识别跟踪过程中，潮汐调制时段出现的断层氢气异常变化可能反映了区域构造活动信息，预示着附近区域具有 $M_s \geq 5.0$ 地震危险性。

(3) 加卸载响应比方法与氢气观测结合的异常识别能力和映震效能优于原始观测数据。阿克苏台氢气原始观测异常报准率为 52.4%，*LURR* 值异常报准率为 90.5%；库尔勒台氢气原始观测异常报准率为 0，*LURR* 值异常报准率为 62.5%，预报效能大幅提升。断层氢气 *LURR* 值超过阈值 1.02，对观测台周边 $M_s \geq 5.0$ 地震有一定中短期预测意义，该指标通过了 *R* 值检验评估。加卸载响应比方法的应用提高了氢气异常识别能力，揭示了构造活动加载下氢气变化的成因机制，这对进一步认识断层氢气与构造活动的关系有一定帮助。

本文采用 CSEP 中国检验中心 *LURR* 方法及 *R* 值评分模块，部分图件使用绘图软件 GMT 绘制，在此一并表示感谢。

参考文献：

- 车用太,刘耀炜,何籛. 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.
- Che Y T, Liu Y W, He L. 2015. Hydrogen monitoring in fault zone soil gas: A new approach to short/immediate earthquake prediction[J]. Earthquake, 35(4): 1-10. (in Chinese)
- 范雪芳,杨芷萌,李宏伟,等. 2020. 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.
- Fan X F, Yang Z M, Li H W, *et al.* 2020. Research on variation characteristic and influence factors of hydrogen concentration in the soil[J]. Journal of Seismological Research, 43(2): 302-309. (in Chinese)
- 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.
- Fan X F, Zhang L, Li Z H, *et al.* 2016. High-accuracy analysis of soil hydrogen anomaly in fault zone[J]. Seismology and Geology, 38(2): 303-315. (in Chinese)
- 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): 705-713.
- Fang Z, Zhang B, Li J H, *et al.* 2020. Characteristics and difference of trace hydrogen in escape gas from geothermal hot spring well and soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 42(3): 705-713. (in Chinese)
- 解朝娣,Lei X L,吴小平,等. 2015. 潮汐应力对 2007 年 $M_s 6.4$ 宁洱地震震源断层成核失稳过程的影响[J]. 中国科学:地球科学, 45(9): 1409-1420.
- Xie Z D, Lei X L, Wu X P, *et al.* 2015. Effect of tidal stress on fault nucleation and failure of the 2007 $M_s 6.4$ Ning'er earthquake[J]. Scientia Sinica Terrae, 45(9): 1409-1420. (in Chinese)

- 康健,肖宁,高小其,等. 2019. 松原 5.7 级地震震中区土壤氢气变化特征[J]. 中国地震,35(2):277-285.
- Kang J, Xiao N, Gao X Q, *et al.* 2019. Characteristics of soil hydrogen variation after the Songyuan M_s 5.7 earthquake [J]. Earthquake Research in China,35(2):277-285. (in Chinese)
- 刘春国,晏锐,樊春燕,等. 2022. 我国地震地下流体监测现状分析及展望[J]. 地震研究,45(2):161-172.
- Liu C G, Yan R, Fan C Y, *et al.* 2022. Analysis and prospect of seismic subsurface fluid monitoring in China [J]. Journal of Seismological Research,45(2):161-172. (in Chinese)
- 刘海洋,赖爱京,冯英,等. 2020. 2017 年 9 月 16 日库车 M_s 5.7 地震前阿克苏西大桥断层氢气异常可靠性分析[J]. 内陆地震,34(2):187-195.
- Liu H Y, Lai A J, Feng Y, *et al.* 2020. Reliability analysis of hydrogen anomaly in Akesu west bridge fault before Kuche M_s 5.7 on September 16th, 2017 [J]. Inland Earthquake, 34(2):187-195. (in Chinese)
- 刘兆飞,李营,陈志,等. 2019. 吉兰泰断陷盆地周缘断裂带气体释放及其对断层活动性的指示意义[J]. 地震学报,41(5):613-632.
- Liu Z F, Li Y, Chen Z, *et al.* 2019. Gas emission from active fault zones around the Jilantai faulted depression basin and its implications for fault activities [J]. Acta Seismologica Sinica,41(5):613-632. (in Chinese)
- 马宏生,刘杰,吴昊,等. 2004. 基于 R 值评分的年度地震预报能力评价[J]. 地震,24(2):31-37.
- Ma H S, Liu J, Wu H, *et al.* 2004. Scientific evaluation of annual earthquake prediction efficiency based on R -value [J]. Earthquake, 24(2):31-37. (in Chinese)
- 孙小龙,邵志刚,司学芸,等. 2017. 断层带土壤氢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.
- Sun X L, Shao Z G, Si X Y, *et al.* 2017. Soil hydrogen concentration in fault zone: Analysis of corresponding influence factors [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,37(4):436-440. (in Chinese)
- 王喜龙,杨梦尧,郭红霞,等. 2022. 辽宁盘一井氢气浓度异常特征及预报效能分析[J]. 地震研究,45(2):275-283.
- Wang X L, Yang M Y, Guo H X, *et al.* 2022. Analysis of the anomalies and earthquake prediction efficiency of hydrogen in groundwater in Panjin 1st well, Liaoning province [J]. Journal of Seismological Research,45(2):275-283. (in Chinese)
- 辛建村,孙君嵩,于晨,等. 2022. 门源 M_s 6.9 地震前地电场优势方位角与加卸载响应比异常变化分析[J]. 地震工程学报,44(2):415-424.
- Xin J C, Sun J S, Yu C, *et al.* 2022. Abnormal variation of dominant azimuth and Load/Unload Response Ratio of geoelectric field before the Menyuan M_s 6.9 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal,44(2):415-424. (in Chinese)
- 许延军,张学辉,曹勇,等. 2022. 门源 6.9 级地震前地应变加卸载响应比异常分析[J]. 地震工程学报,44(3):707-712.
- Xu Y J, Zhang X H, Cao Y, *et al.* 2022. Load/Unload Response Ratio anomalies of strain before the Menyuan 6.9 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal,44(3):707-712. (in Chinese)
- 闫玮,李新勇,杨绍富,等. 2023. 新疆库勒断层氢气浓度影响因素及异常信息提取方法研究[J]. 内陆地震,37(1):72-79.
- Yan W, Li X Y, Yang S F, *et al.* 2023. Study on influence factors of hydrogen concentration and anomaly information extraction method of Kuerle fault in Xinjiang [J]. Inland Earthquake,37(1):72-79. (in Chinese)
- 尹祥础,陈学忠,宋治平. 1994. 加卸载响应比理论及其在地震预测中的应用研究进展[J]. 地球物理学报, (S1):223-230.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P. 1994. Research progress of Load - Unloading Response Ratio theory and its application in earthquake prediction [J]. Chinese Journal of Geophysics, (S1):223-230. (in Chinese)
- 尹祥础,尹灿. 1991. 非线性系统失稳的前兆与地震预报——响应比理论及其应用[J]. 中国科学:化学,21(5):512-518.
- Yin X C, Yin C. 1991. Precursors of nonlinear system instability and earthquake prediction—response ratio theory and its application [J]. Scientia Sinica Chimica,21(5):512-518. (in Chinese)
- 尹祥础. 1987. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震,3(1):3-10.
- Yin X C. 1987. The new approach of earthquake prediction [J]. Earthquake Research in China,3(1):3-10. (in Chinese)
- 张先康,赵金仁,张成科,等. 2002. 帕米尔东北侧地壳结构研究[J]. 地球物理学报,45(5):665-671.
- Zhang X K, Zhao J R, Zhang C K, *et al.* 2002. Crustal structure at the northeast side of the Pamirs [J]. Chinese Journal of Geophysics,45(5):665-671. (in Chinese)
- 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):1-13.
- Zhong J, Wang B, Yan W, *et al.* 2021. Dynamic characteristics of fault hydrogen concentration in Akesu and its earthquake reflecting efficiency [J]. Acta Seismologica Sinica,43(5):1-13. (in Chinese)
- Beckon M, Ritter O, Park S K, *et al.* 2008. A deep crustal fluid channel into the San Andreas fault system near Parkfield, California [J]. Geophys J Int,173(2):718-732.
- Biagi P F, Castellana L, Minafra A, *et al.* 2006. Groundwater chemical anomalies connected with the Kamchatka earthquake ($M = 7.1$) on March 1992 [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,6(5):853-859.
- Byerlee J D. 1978. Friction of rocks [J]. Pure and Applied Geophysics, 116(4-5):615-626.
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, *et al.* 2018. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the capital of China and its environmental effects [J]. Scientific Reports,8(1):16772.
- Deb A, Gazi M, Ghosh J, *et al.* 2018. Monitoring of soil radon by SSNTD in Eastern India in search of possible earthquake precursor [J]. Jour-

- nal of Environmental Radioactivity, 184 – 185 (APR) : 63 – 70.
- Giuntoli F, Menegon L, Siron G, *et al.* 2024. Methane – hydrogen – rich fluid migration may trigger seismic failure in subduction zones at forearc depths [J]. *Nature Communications*, 15 (1) : 480.
- Jia D H, Zhao B B, Yu H Z, *et al.* 2022. Multi field coupled coseismic changes of the Jiashi $M_s 6.4$ earthquake of 19 January 2020, based on ground temperature observation [J]. *Atmosphere*, 13 (2) : 154.
- Stein R S, King G, Lin J. 1994. Stress triggering of the 1994 $M 6.7$ Northridge, California, earthquake by its predecessors [J]. *Science*, 265 (5177) : 1432 – 1435.
- Wang L, Jin Z J, Chen X, *et al.* 2023. The origin and occurrence of natural hydrogen [J]. *Energies*, 16 (5) : 2400.
- Yu H Z, Yu C, Ma Z, *et al.* 2020. Temporal and spatial evolution of Load/Unload Response Ratio before the $M 7.0$ Jiuzhaigou earthquake of Aug. 8, 2017 in Sichuan province [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 177 (16) : 321 – 331.
- Zgonnik V. 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review [J]. *Earth-Science Reviews*, 203 (8) : 103140.
- Zhao B B, Qian C, Yu H Z, *et al.* 2022. Preliminary analysis of ionospheric anomalies before strong earthquakes in and around mainland China [J]. *Atmosphere*, 13 : 410.

Research on Fault Hydrogen Anomaly Mechanism Based on the Load/Unload Response Ratio Theory

JIA Donghui^{1,2}, YU Huaizhong³, ZHAO Binbin², ZHANG Tao², LIU Haiyang⁴

(1. College of Earth and Planet Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

(2. Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

(3. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

(4. Aksu Earthquake Monitoring Center Station, Aksu 843000, Xinjiang, China)

Abstract

The fault's hydrogen data which are observed by Aksu station and Korla station in Xinjiang are used to study the relationship between the tidal stress and the hydrogen dynamics in this area. The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory is used to explore the abnormal change mechanism and the earthquake precursory mechanism of the fault's hydrogen, to obtain the response characteristics of the hydrogen under the action of the tidal stress loading. The results show that the variation of fault's hydrogen has tidal effect; it is sensitive to tidal stress in the case of the crustal stress loading. The hydrogen's high-value anomaly occurs mostly in the modulation period. According to the calculation of the Load/Unload Response Ratio, the Load/Unload Response Ratio has better prediction efficiency than the original observation data. The number 1.02 can be used as a threshold for judging the fault's hydrogen anomaly; when LURR value exceeds the threshold, there would exist a risk of moderate-and strong-earthquake in a short term in the study area. This index has passed the R – value test evaluation.

Keywords: hydrogen; Load/Unload Response Ratio; anomaly mechanism; earthquake precursor; tectonic activity