

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,中国地震,35(2),277~285.

松原5.7级地震震中区土壤氢气变化特征

康健¹⁾ 肖宁¹⁾ 高小其²⁾ 张思萌¹⁾ 王健宇¹⁾ 张磊²⁾

1) 黑龙江省地震局,哈尔滨 150090

2) 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室,北京 100085

摘要 2018年5月28日吉林松原发生5.7级地震,为了探究地震对断层气的影响以及震后断层气变化特征,震后在震中区进行了多期土壤氢气浓度观测工作,得到了震中区氢气浓度的最大值、背景值等多项指标。结合地震前后氢气浓度数据,分析震中区震前、震后氢气浓度趋势性变化情况,结果显示:在此次地震活动中,氢气浓度变化有“震前缓慢升高—临震下降—震后迅速升高—强余震前再次骤升”的现象;氢气浓度变化与地震活动间有很好的映震关系,主震对氢气浓度的上升起主要作用,而余震则起诱发作用,余震的活动会使赋存在地下岩石裂隙的氢气释放量增大,表明氢气对余震活动的响应较灵敏;另外,震后某一时刻空气中的氢气浓度也会升高,这可能与区域断层中的氢气逸散到大气中有一定关系。

关键词: 松原5.7级地震 氢气 异常特征 震后效应

[文章编号] 1001-4683(2019)02-0277-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

氢气作为断裂带释放的主要气体成分之一,具有迁移速度快和穿透力强的特点,能够对构造活动产生快速响应(张培仁等,1993;周晓成等,2017;Fang et al, 2018;Wakita et al, 1980),被认为是探索短临地震前兆异常的突破性手段之一(刘耀炜等,2006;车用太,2015;高小其等,2017)。近年来随着测氢技术的发展,我国在断层氢气研究领域取得了重要进展,已建立起断层氢气观测点的遴选、建设方法(柯云龙等,2018),并观测到了诸如汶川科学钻探2号孔和山西夏县、新疆阿克苏断层氢气在震前短期内的浓度突升异常变化现象(范雪芳等,2016;张涛等,2016;张彬等,2018;向阳等,2018)。断层氢气同时被广泛应用于跨断层土壤气测量中,以识别断层位置和判定断层活动状态(马兴全等,2017;李源等,2018;阚宝祥等,2018)。以上研究结果丰富了对于断层氢气与构造活动间关系的认识。

近几年吉林省松原地区中小地震频发,2013年以来该地区发生了6次5级以上地震,其中,2018年5月28日在松原宁江区发生5.7级地震。该地区是进行地震学研究的理想场地,运用地球化学探测方法对该地区氢气进行连续高精度观测,有助于了解地下流体变化与地震活动的机理,具有较高的地震分析预测与科学研究价值。本文作者在松原5.7级地震震

[收稿日期] 2018-11-30; [修定日期] 2018-12-19

[项目类别] 黑龙江省地震局重点科研项目(201701)、黑龙江省地震局震情跟踪项目(201803)共同资助

[作者简介] 康健,男,1980年生,硕士,高级工程师,主要从事地震地质、工程地震等研究。E-mail:jakekj@163.com

张磊,通讯作者,男,1987年生,博士,副研究员,主要从事地震地下流体研究。E-mail:lzhang87@163.com

后第一时间赶赴现场开展考察工作,对震中区进行氢气观测,获取了宝贵的震时第一时间资料以及震后加密观测资料。结合前人相关研究结果,尝试了解该地区是否存在与地震及断裂活动相伴的地球排气作用。本文拟通过对震中区乃至扶余-肇东断裂上土壤氢气浓度实地测量获取相关的地球化学参量,以分析震前、震后土壤氢气地球化学特征及其成因以及余震对氢浓度的影响。

1 区域概况

松原地区属中温带大陆性季风气候区,年平均气温 4.5°C 左右。春季干旱少雨,升温较快;夏季炎热,降水集中;秋季凉爽,少雨;冬季寒冷干燥。区域上属于松辽盆地松花江冲积平原,第四系覆盖层厚度为 $80\sim 150\text{m}$ 。

研究区域主要分布 NE 向的扶余-肇东断裂和 NW 向的第二松花江断裂(图 1)。扶余-肇东断裂是松原地区的主要发震构造,断裂位于松辽盆地中部,北起肇东,经扶余至怀德杨大城子一带,为松辽断块沉降带内次一级构造单元的分界线。根据中石化地震勘探反射资料(尉洋等,2016),扶余-肇东断裂对基底埋深有明显的控制作用,断裂西侧为中央凹陷带,东侧为东南隆起区,断裂大致位于基底等深线的陡变带上。扶余-肇东断裂南段地震多发,该段在吉林省境内由 3 条断裂组成(邵博等,2016):北段为大洼-薄荷台断裂,中段为扶余北断裂,南段为查干花断裂(图 1)。据松原活断层探测结果(万永魁等,2016)、余震分布图、震源机制解和地震烈度调查综合分析,扶余北断裂是此次 5.7 级地震的发震构造。该地区地震活动非常频繁,2017 年 7 月 3 日松原市宁江区发生 4.9 级地震;2018 年 3 月 5 日宁江区发生

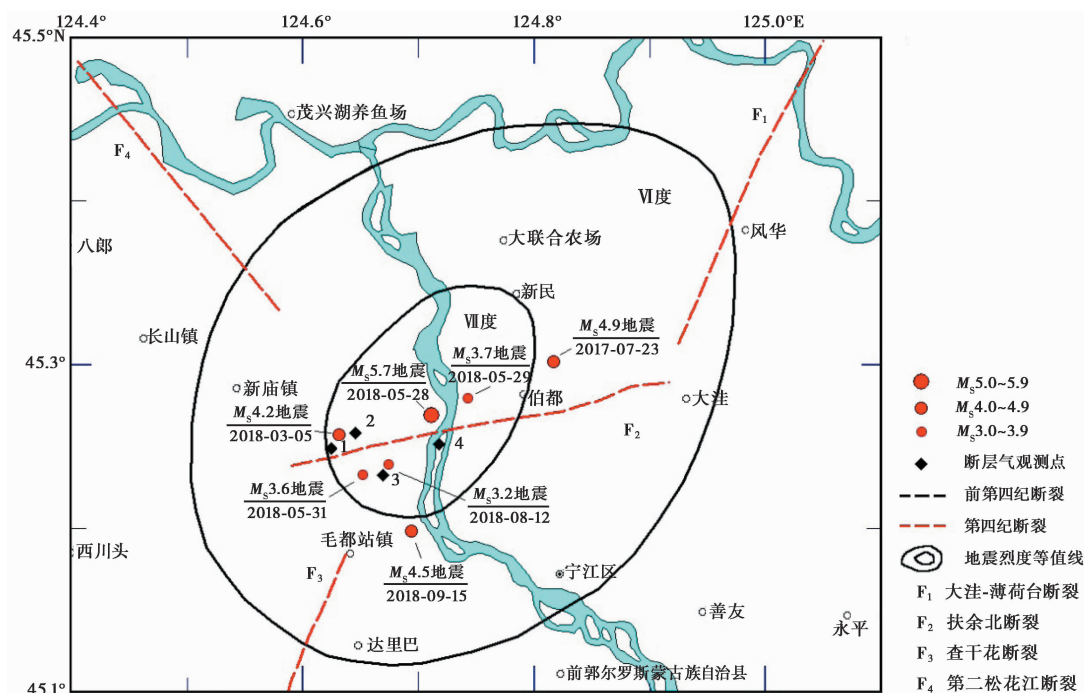


图 1 2018 年 5 月 28 日宁江 5.7 级地震烈度图

观测点: 1. 高家窝堡; 2. 东渠; 3. 姜家村; 4. 复兴村东



4.2 级地震;2018 年 5 月 28 日宁江区发生 5.7 级地震,震中区最高烈度达Ⅶ度,之后数月余震不断,其中,震级较大的余震有 8 月 12 日 3.2 级、9 月 15 日 4.5 级地震。

2 测试与方法

本次观测是在 2018 年 5 月 28 日宁江 5.7 级地震后针对烈度Ⅶ度区进行的。分别在震中区的高家窝堡、东渠(高家窝堡东)、姜家村和复兴村东等 4 个观测点进行土壤中氢气调查(图 1)。每个观测点取 5 个样本,共测量 4~5 期。除了高家窝堡第 1 期是在震前几个月观测的以外,其余均是在震后观测的,观测日期见表 1。

表 1 氢气观测数据

观测地点	观测期次	观测日期 (年-月-日)	天气	最大值 /10 ⁻⁶	均值 /10 ⁻⁶	中值 /10 ⁻⁶	标准差 /10 ⁻⁶	背景值 /10 ⁻⁶	备注
高家窝堡	1	2018-03-05	晴	4800.0	1668.0	970.0	1883.0	867.0	有冻层
	2	2018-05-28	阵雨	2.6	2.0	2.0	1.0	1.7	稍干
	3	2018-06-01	晴	16.0	10.6	9.0	3.8	10.1	稍干
	4	2018-07-03	阵雨	16.8	9.5	9.3	5.9	7.8	稍湿
	5	2018-08-07	晴	34.0	26.0	31.2	11.4	23.9	稍湿
东渠	1	2018-05-28	阵雨	16.0	6.0	3.7	5.6	4.7	稍干
	2	2018-06-01	晴	72.0	41.7	37.0	17.4	39.4	稍干
	3	2018-07-03	阵雨	114.0	55.1	39.8	52.9	37.5	稍湿
	4	2018-08-07	晴	1522.0	809.0	785.0	602.0	588.0	稍湿
姜家村	1	2018-05-29	阵雨	21.0	17.3	18.0	3.3	17.0	稍湿
	2	2018-05-30	阵雨	41.0	32.0	28.0	7.0	31.4	稍湿
	3	2018-06-01	晴	136.0	80.8	67.0	49.8	76.0	稍湿
	4	2018-07-03	阵雨	111.7	90.6	108.0	33.5	85.6	稍湿
	5	2018-08-07	晴	895.0	752.0	752.0	202.0	738.0	稍湿
复兴村东	1	2018-05-30	阵雨	8.5	4.2	3.1	2.6	3.7	稍湿
	2	2018-06-01	晴	31.0	23.0	23.0	5.9	22.4	稍湿
	3	2018-07-03	阵雨	28.5	20.6	22.4	8.0	18.9	稍湿
	4	2018-08-07	晴	79.4	40.0	27.3	35.3	29.8	稍湿

观测仪器为便携式氢气分析仪(ATG-300H),标定后空气检测值一般为 0.5×10⁻⁶。测量时在土壤中打 1 个观测孔,孔径约 3cm,孔深 80cm。先将取样器(麻花钻)吸气端插入孔中并封住气孔,然后用软管将取样器排气端与仪器相连,并启动仪器开始观测,读取最高值。为了减少非构造因素的影响,观测时选同一土质条件的场地进行多次观测。场地条件如下:高家窝堡测点,0~80cm,全新世冲积,中砂稍密,一期有冻土层;东渠测点,0~80cm,全新世冲积,粉砂土密实,局部有黏土夹层;姜家村测点,0~80cm,全新世冲积,黏土含砂稍松;复兴村东测点,0~80cm,全新世冲积,细砂,局部黏土含砂。



3 结果

3.1 数据

经过震后多期观测得到了震中区氢气浓度的最大值、平均值、背景值等(表 1)。背景值一般可以体现研究区域客观氢气浓度值,文中采用各测点浓度值的几何平均值,这种方法能弱化极端数值对整个数据的影响,从而更为真实地反映 1 组数据的整体水平。计算公式为

$$G = \sqrt[n]{x_1 x_2 \cdots x_n} \quad (1)$$

式中, G 为观测点所有样本几何平均值; x_1 为观测点第 1 个样本; n 为观测点样本个数。

通过计算验证发现,几何平均值计算的结果与取对数均值的结果一致。整体数据见表 1。

除了高家窝堡测点第 1 期数据以外,其余数据皆在 2018 年 5 月 28 日松原 5.7 级地震发生当天至震后 2 个月内测得。以高家窝堡测点为例数据如下:5 月 28 日地震发生几个小时后测得氢气浓度背景值最低,仅为 1.7×10^{-6} ,6 月 1 日背景值为 10.1×10^{-6} ,氢气浓度几乎为地震当天的 6 倍;1 个月后,即 7 月 3 日测得氢气浓度背景值为 7.8×10^{-6} ,数值稍有降低;2 个月后,即 8 月 7 日测得氢气浓度背景值为 23.9×10^{-6} ,氢气浓度在此阶段又迅速上升。随后 8 月 12 日震中区发生的 3.2 级地震震中距姜家村测点仅 500m,而恰恰这次余震前姜家村测点的氢气浓度变化幅度最大。第 4 期时该测点背景值为 85.6×10^{-6} ,到了第 5 期很快跃升至 738.0×10^{-6} ,而其他 3 个观测点也都呈现出类似特征,具体见表 1。

值得注意的是 6 月 1 日的观测,观测点检测到空气中氢气浓度高于正常背景值 (0.5×10^{-6}),其中,高家窝堡测点氢气浓度为 $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6}$;东渠测点为 $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-6}$;姜家村测点为 $4.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-6}$;复兴村东测点为 $1.0 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-6}$ 。这种现象以姜家村测点为最,空气中一直可检测到氢气且其浓度稳定,而姜家村测点正是 5 月 31 日 3.6 级余震的震中(图 1)。

3.2 土壤氢气变化特征

地震发生后氢气浓度并没有立即升高,而是在震后 1~3 天开始呈现升高现象,浓度迅速增加,甚至在空气中也监测到氢气浓度明显增加。随后 1 个月内变化较为平缓,震后第 2 个月浓度又迅速窜升,个别观测点浓度甚至呈指数式增长,几天后便发生了 3.2 级余震,震后第 3 个月又发生了 4.5 级地震。由图 2 可见,震后余震不断,地震活动一直在持续。氢气浓度大致经历“低值平稳(地震发生前)—升高(5.7 级地震发生后 1~3 天)—高值平稳—再升高(3.2 级余震发生前)”的过程(图 3)。

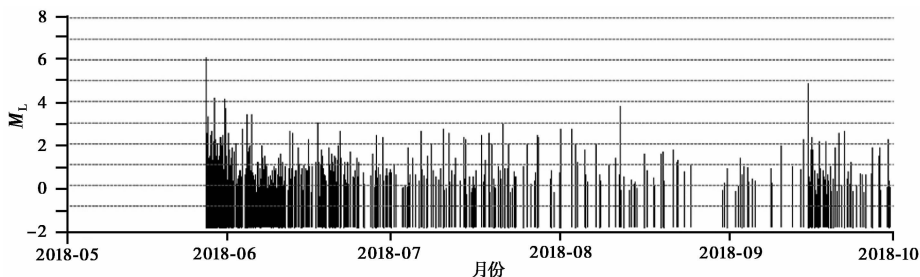


图 2 松原 5.7 级地震主震及余震 $M-t$ 分布

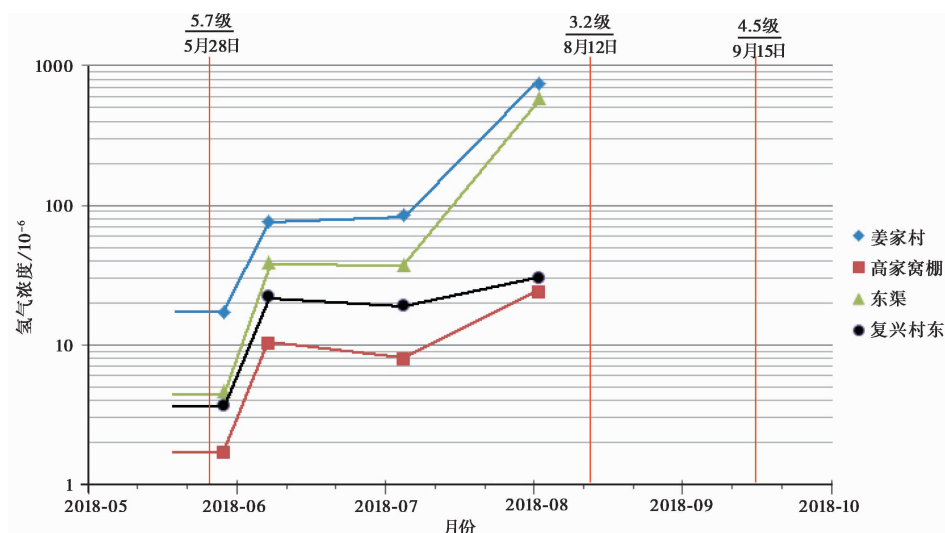


图 3 地震对震中区土壤氢气浓度的影响

2018 年 5 月 28 日松原 5.7 级地震后,在同一条断裂的东北方向距震中 50 多 km 的肇源县薄荷台乡氢气浓度也出现类似变化,薄荷台测线主要用来跟踪监视扶余-肇东断裂南段。该测线共 15 个测点,从 2016 年开始定点定期观测,一直持续至今,共完成了 11 期观测(图 4)。由图 4 可见,2018 年氢气浓度背景值比 2017 年同期高出较多;地震发生前 2 天(5 月 26 日)该测线氢气浓度背景值还处于相对较低的水平,无论同比还是环比都较低。震后,6 月 1 日震中区氢气浓度开始升高,而薄荷台测线在 6 月 2 日浓度仍未有反映,直到 7 月 4 日氢气浓度开始增加,再到 8 月 6 日所测得背景值为最高,此时与震中区的趋势性变化基本一致。震后氢气浓度变化比震中区稍有延迟,氢气释放量也小于震中区,这可能与震中距和地震动强度有关。

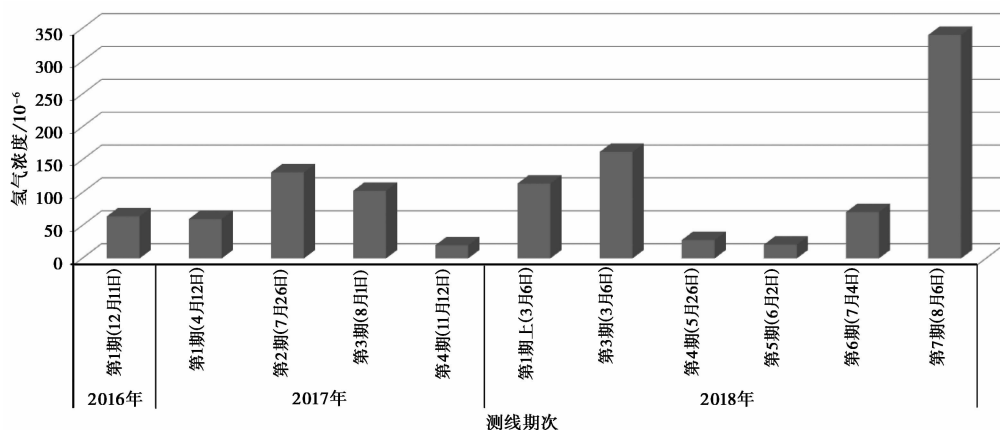


图 4 扶余-肇东断裂薄荷台乡测线不同期次氢气浓度背景值

数据来自黑龙江省震情跟踪报告;期次编号为项目原始编号,2018 年第 1 期下及第 2 期在本测线中无观测数据

4 土壤氢气异常机理分析

高家窝堡测点第 1 期氢气浓度非常高,经分析是由冻土层造成的。3 月的黑龙江地区正处在由寒转暖的阶段,但冻土层并未开化,依然存在。在冬季有些地方土壤气浓度极高,这与冻土层有直接关系。多年观测发现在干旱地区,土壤湿度非常低,且不具备形成连续、完整、较厚冻层的地方,土壤气浓度并无明显变化;相反,在降水量较多地区,土壤湿度大、透水性差的黏性土中,易形成连续、完整、较厚的冻土层,土壤气浓度与其他季节相比显著增高。这一现象在冻土开化季节尤为明显,在山阳坡没有冻土层的地方土壤气浓度正常,在山阴处冻土层未开化的地方数值极高。分析认为冻土层会形成一个密闭的封盖,减缓了地下气体逸出的速度,不断积累滞留土壤气会使浓度极大的增高,这一现象在高寒地区普遍存在。

湿度对土壤气体的浓度有一定影响,尤其在雨季。从 2018 年 5 月末以来包括震中区在内的黑龙江、吉林地区降水量异常多,6、7、8 月为当地雨季,降雨量最为集中。观测时土壤湿度相差不大,6、7、8 月的平均温度为 20~22℃,其对土壤氢气浓度的影响微乎其微,在此期间观测可以排除湿度和温度因素,故震后土壤气浓度的迅速升高可以确定是由地震构造因素所致。

地震发生前后震中区氢浓度变化很大,形成了阶梯式上升曲线(图 3)。震后氢浓度没有随时间呈线性上升,而是与余震有较好的对应关系。此次松原 5.7 级地震氢浓度在主震前反映小,余震前反映大,探究其原因如下:此次地震属于“主震-余震”型,这种地震是突发式的,地震前异常有时并不明显。许多地震震前存在平静现象,马胜利等(2004)认为大地震前断层的“蠕滑-匀阻化”过程是造成震前活动平静的可能机制。很多地震在震前地壳形变活动并不明显,2008 年汶川 8.0 级地震、2011 年日本“3·11”大地震等震前形变都比较平稳(陆明勇等,2014)。随着地应力不断积累,地下介质将逐渐由弹性变为塑性,应力逐渐变大,应变在逐渐变小,直至介质破裂临界点。在这个过程中氢气的释放量也由多变少(杜建国,2000),甚至有可能在临震前氢气浓度是下降的,而这一现象在薄荷台测线即有所体现(图 4)。1981 年日本大野地震群及 1976 年宁河 6.9 级、1991 年忻州 5.1 级、1991 年大同 5.8 级等地震也都出现了氢气浓度临震前下降、震后升高的特点(Sugisaki,1984;高清武,1992;车用太等,2015)。此次地震呈现“震前升高—临震下降—震后骤升”现象,这不是每次地震都如此,或许与地震发生机制的不同有关。

此次地震在相隔 50km 且同在扶余-肇东断裂带上的 2 个观测点在地震时出现了共同特征,即主震发生时土壤氢气并未立刻上升,余震发生时却有迅速上升之势。浓度高不一定就对应震级大,也可能与氢气在地下的迁移距离和迁移速率不同引起的,迁移速率与地下介质有关(Sugisaki,1984)。地震刚发生时,地下深部气体开始向上运移是需要有个时间过程,造成的影响还没有立刻体现出来。主震对氢气浓度上升起到主要贡献,而余震起到诱发作用,将滞留在地下岩石裂隙的气体更快的释放出去。主震发生时地下断层气浓度骤增,一部分气体上逸,仍有大量气体滞留在岩石和裂隙中,而这种状态并不稳定且非常敏感,稍有震动便会大量上逸,也可以理解为余震是将主震积累的气体加速释放了,变化特征见模型图(图 5)。这也解释了为什么主震前氢气浓度未见变化甚至降低,而主震后的余震却使浓度显著升高。

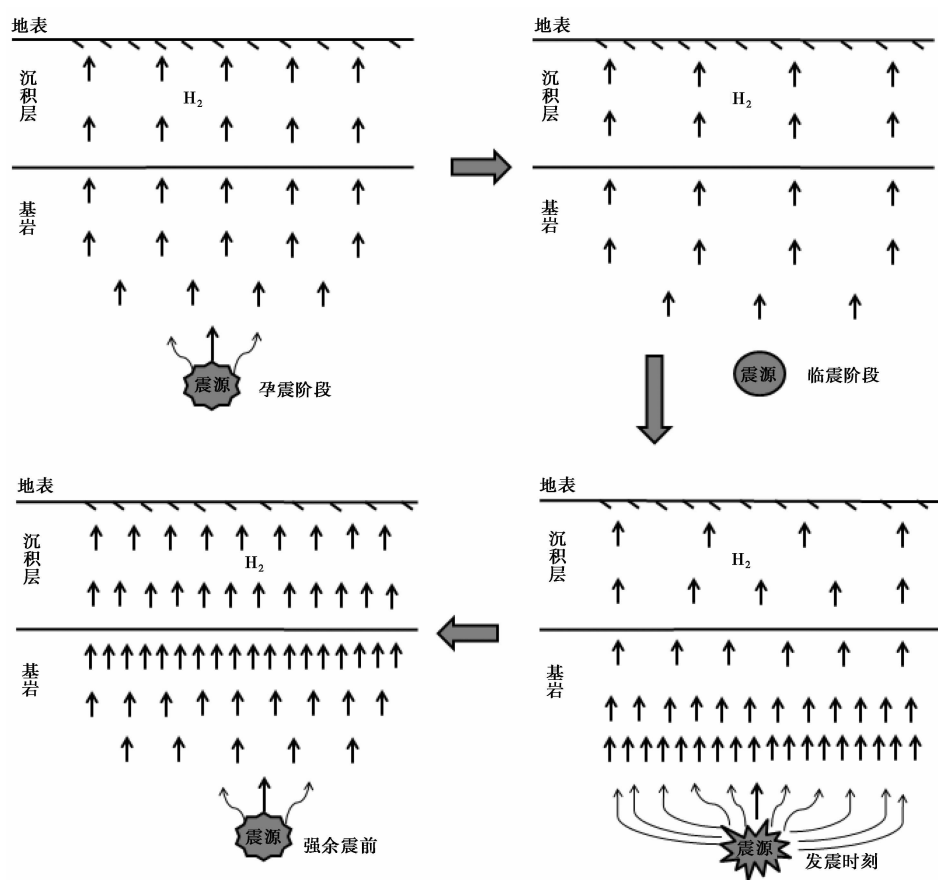


图 5 地震前后土壤氢气异常模型示意图

5 结论与讨论

2018 年 5 月 28 日松原 5.7 级地震后在震中区经过多期定点观测,并结合黑龙江省地震局震情跟踪项目(2016~2018 年)针对扶余-肇东断裂完成的地震前后观测数据,得到以下几点认识:

(1) 土壤氢气浓度一年四季皆有变化,在冬季较厚冻土层有封闭作用,致使氢气浓度升高。

(2) 土壤氢气浓度有“震前 1~3 个月缓慢升高—临震下降—震后迅速升高—强余震前再次骤升”现象;震后第 5 天,伴随强余震的发生,在震中区空气中检测到氢气浓度有升高现象,这可能与断层中氢气逸散到大气有一定关系。

(3) 氢气映震效果明显,震后氢气浓度整体偏高,且随余震变化波动明显,可见断层气浓度变化与地震活动间存在着密切联系;余震对氢浓度变化更为灵敏,大的余震发生前存在氢气浓度大幅骤升现象。

特别要强调的是,震前由于观测时间较短,测点较少,氢气浓度的变化情况可能不全面,不能表明震前没有异常。结论中关于震前异常特征分析是借助于震中附近 1 个观测点的数

据进行综合分析的。本次工作属于流动观测的加密测量,数据量尚可但仍缺乏连续观测数据,对地球化学特征变化的精度控制是有限的,因此需对该地区进行连续观测长期研究才能更好了解土壤氢气浓度与地震构造活动间的关系。

致谢: 本文得到刘耀炜研究员的悉心指导,审稿专家提出了宝贵意见,中国地震局工程力学研究所李兆炎副研究员、张浩宇副研究员和肇东地震局宋朝阳工程师在样品采集过程中给予大力协助,在此表示衷心的感谢。

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,地震,35(4),1~10.
- 杜建国、康春丽,2000,地震地下流体发展概述,地震,20(增刊),107~114.
- 范雪芳、张磊、李自红等,2016,断裂带土壤气高精度氢异常分析,地震地质,38(2),303~315.
- 高清武,1992,地震前 H_2 、Hg 等断层气的异常变化,中国地震,8(3),53~59.
- 高小其、刘高川、刘春国等,2017,新疆阿克陶、呼图壁两次 6 级地震前兆监测台网效能评估与研究,国际地震动态,(8),63~64.
- 阙宝祥、钟羽云、沈钰等,2018,温州双溪-焦溪垌断裂土壤 Rn 和 H_2 地球化学特征,大地测量与地球动力学,38(8),823~827.
- 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,地震,38(3),35~48.
- 李源、马兴全、夏修军等,2018,河南新郑-太康断裂东段土壤气体地球化学特征,地震,38(3),49~57.
- 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,(7),3~12.
- 陆明勇、李志雄、刘天海等,2014,强地震前地壳形变异常特征的再探讨,国际地震动态,(4),24~26、41.
- 马胜利、蒋海昆、扈小燕等,2004,基于声发射实验结果讨论大地震前地震活动平静现象的机制,地震地质,26(3),426~435.
- 马兴全、王志铄、孙杰等,2017,通过断层气氢探测新郑-太康断裂的浅层位置,震灾防御技术,12(2),354~362.
- 邵博、沈军、于晓辉等,2016,松原市扶余北隐伏活动断裂地震潜势研究,地震工程学报,38(4),616~623.
- 万永魁、沈军、刘峡等,2016,松原市扶余北断裂的发现及活动性鉴定,中国地震,32(3),477~484.
- 尉洋、沈军、于晓辉等,2016,石油地震资料在隐伏活断层探测中的应用——以松原活断层探测为例,地震地质,38(2),423~433.
- 向阳、孙小龙、高小其等,2018,新疆库尔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,中国地震,34(1),48~59.
- 张彬、刘耀炜、方震等,2018,汶川地震科学钻探 2 号孔(WFSD-2)随钻泥浆氢和汞浓度与断裂构造关系,地球物理学报,61(5),1771~1781.
- 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.
- 周晓成、陈超、吕超甲等,2017,首都圈西北部主要活动断裂土壤中氢气(H_2)地球化学特征,环境化学,36(5),977~983.
- Fang Z, Liu Y W, Yang D X, et al, 2018, Real-time hydrogen mud logging during the Wenchuan earthquake fault scientific drilling project(WFSD), holes 2 and 3 in SW China, Geosci J, 22(3), 453~464.
- Sugisaki R, 1984, Relation between hydrogen emission and seismic activities, Pure Appl Geophys, 122(2/3/4), 175~184.
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, et al, 1980, Hydrogen release: New indicator of fault activity, Science, 210(4466), 188~190.

Characteristics of Soil Hydrogen Variation after the Songyuan $M_s5.7$ Earthquake

*Kang Jian*¹⁾ *Xiao Ning*¹⁾ *Gao Xiaoli*²⁾ *Zhang Simeng*¹⁾ *Wang Jianyu*¹⁾
*Zhang Lei*²⁾

1) Heilongjiang Earthquake Agency, Harbin 150090, China

2) Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration,
Beijing 100085, China

Abstract The Songyuan $M_s5.7$ earthquake occurred on May 28, 2018. In order to study the influence of earthquakes on fault gas and the variation characteristics of fault gas after earthquakes, several periods of soil hydrogen observation were carried out in the epicenter after earthquakes. Finally, the maximum and background values of hydrogen concentration in the epicenter region were obtained. Based on the data of hydrogen variation before and after earthquakes, the trend change of hydrogen concentration in epicenter is analyzed. The results show that during this earthquake activity, hydrogen concentration has the phenomenon of “slow increase before earthquakes—decrease when earthquakes are about to occur—sharp increase after earthquakes—a sharp rise again before strong aftershocks”. The variation of hydrogen concentration has a good correspondence with seismic activity. Main shocks play a major role in the increase of hydrogen concentration, while aftershocks play an inductive role. Aftershocks release gases trapped in underground rock fissures faster, so aftershocks make hydrogen concentration change more sensitive. In addition, at a certain time after the earthquake, the concentration of hydrogen in the air will also increase, which may be related to the escape of hydrogen from faults to the atmosphere. In addition, at a certain time after the earthquake, the concentration of hydrogen in the air will also increase, which may be related to the escape of hydrogen from faults to the atmosphere. This study shows that hydrogen changes obviously before and after the earthquake, which has very good indicative significance.

Key words: Songyuan $M_s5.7$ earthquake; Hydrogen; Anomalous characteristics; Post-earthquake effect