

断层带土壤 H_2 浓度变化特征及影响因素研究*

范雪芳¹, 杨芷萌², 李宏伟^{1*}, 吴桂娥¹, 韩晓飞¹

(1. 山西省地震局, 山西 太原 030021; 2. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006)

摘要: 收集全国15个不同区域、不同地质环境、不同深度测点的 H_2 浓度, 以及气温、气压整点值连续观测资料, 研究高精度土壤 H_2 浓度日、月动态变化特征, 通过计算 H_2 浓度与气温、气压的相关系数, 定量分析不同观测孔深气温、气压对 H_2 浓度的影响程度。结果表明: 土壤 H_2 浓度动态变化与气象因素密切相关, 观测孔优选深度为4~11 m。

关键词: 土壤 H_2 ; 气温; 气压; 动态特征; 影响因素

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)02-0302-08

0 引言

利用地表自由逸出气体以及溶解于水、吸附于土壤中的气体浓度变化来监测预报地震是当前国内外广泛采用的地震预报方法之一(Whiticar *et al.*, 1999; Hernández *et al.*, 2000)。断层带是深部气体逸出的良好通道, 气体在应力或热动力作用下, 能沿上下贯通的活断层通道自深部上涌(王永才等, 1992; Wakita *et al.*, 1980)。栗启初(1992)通过实验指出 H_2 逸出对断层的运动、地震的发生有直接的诱发作用; 邵济安等(2010)研究认为, H_2 主要来源于地幔, 少量地壳来源是由于活动断层产生的局部高温高压趋使中-浅层地热储库中的 CH_4 转化为 H_2 。

在20世纪, 有学者对断层气进行了一些研究, 但受限于当时的观测仪器精度不够, 该研究断断续续。随着国内高精度氢连续观测仪器的研制, 断层气研究进一步深入。分析地震监测资料表明, H_2 浓度是对地震前兆响应的灵敏气体组分, 特别是在短临阶段的映震能力方面具有明显的反映(车用太等, 2015; 刘耀伟等, 2006; 张炜等, 1988; 耿杰等, 2019)。地震前出现的 H_2 浓度异常特征显著, 通常表现为震前几天至几十天的突发性大幅上升。由于 H_2 在土壤及地下水中的背景值较低, 因此, 在断层带 H_2 浓度观测中, 其出现

异常的幅度较高, 通常表现为数量级的增幅, 且 H_2 浓度会随着地震释放能量的增大而增加。车用太等(2015)认为断层带 H_2 浓度观测有可能提高短临预测水平。大量的观测资料表明, 断层土壤气观测的影响因素较为单一, 主要是气象因素, 即气温、气压等, 年变动态规律清楚, 由此可知, 土壤 H_2 浓度的异常变化突出, 有较高的映震效能。

断层带土壤 H_2 浓度观测的首次实验研究是在山西开展, 后逐步向全国推广。目前, 利用痕量氢自动分析仪开展断层带土壤 H_2 浓度观测时间不长, 尚处于实践探索阶段, 对观测条件和各种干扰因素等研究尚未开始。对于一个新开展的观测项目, 必须研究它的动态特征及其影响因素, 其研究结果对异常变化的识别, 甚至是异常机理解释和预测效能评价都有重要作用。为此, 本文收集了全国目前处于运行阶段的痕量 H_2 浓度观测资料, 同时, 同步观测环境温度(气温)和气压, 采用相关分析、回归分析的定量分析方法, 研究了气温、气压及观测孔深度对断层带土壤 H_2 浓度的影响。

1 土壤 H_2 浓度观测概况

关于 H_2 浓度观测及其与地震活动的关系研

* 收稿日期: 2019-01-24.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH15006)、山西省自然科学基金(201901D111462)和中国地震局震情跟踪定向工作任务(2016020302)联合资助。

✉ 通讯作者: 李宏伟(1986-), 工程师, 主要从事地壳形变分析预报工作. E-mail: 347719545@qq.com.

究,已有近40年的历史。国际上普遍认为断层带逸出气中的 H_2 是效果较好的地震前兆观测项目之一, H_2 的浓度与地震活动有密切关系,异常幅度大,震前异常时间短,短临特征显著,是有可能量化的。车用太等(2015)的研究结果表明,震中距、震级、震源深度不同, H_2 浓度的异常都有显著差别。从已有的震例来看,在震前10~40 d, H_2 浓度变化最大。

1.1 观测点布设和观测仪器

断层带土壤 H_2 浓度观测点或观测井(泉)的布设地点主要是选择已被确定为未来10年内有可能发生 $M_s \geq 6.0$ 地震的地区,或近几年来 $M_s \geq 5.0$ 地震活动频繁的地区,其次还需要参考活动断块与地震活动关系。总体上,断层带土壤 H_2 浓度观测点的布设要求如下:①在断层破碎带上,隐伏断裂带区测点选在断裂带的正上方;②断层的上盘;③岩浆岩发育区;④作为试验观测研究,测点可考虑选在不同性质的断层带和断裂的不同部位,进行对比观测研究;⑤在有条件的地区,也可打穿断裂带的自流井进行地下水中逸出气 H_2 浓度观测。

国内一般采用气相色谱仪和质谱仪进行 H_2 浓度观测,检出限一般为 1×10^{-6} 。如纪振红等(2010)系统总结了不同纯度 H_2 浓度的分析方法,主要有气相色谱法和热导池气相色谱法等。但一般水中溶解或土壤中 H_2 浓度的背景值为 0.5×10^{-6} ,甚至更低,用气相色谱仪等很难检测到 H_2 浓度的背景动态。而杭州电子科技大学和杭州超钜科技有限公司研制的ATG-6118H痕量氢自动分析仪的灵敏度高,检出限为 0.05×10^{-6} ,稳定性好,可准确连续记录到 H_2 浓度的变化;该仪器还具有网络实时监控和温度、气压辅助观测功能,这将有效解决采用气相色谱仪等进行观测时仪器灵敏度较低等问题。范雪芳等(2015, 2016)对ATG-6118H痕量氢自动分析仪的稳定性及其记录的连续观测数据进行了评估,评估结果表明,分析仪产出的测值稳定,2台仪器平行观测动态一致性很好,能够实现断层带土壤 H_2 浓度的连续观测。因此本文使用ATG-6118H痕量氢自动分析仪进行研究。

1.2 观测资料筛选

2010年山西省首先开始痕量 H_2 浓度观测,目前在全国已布设了30多个测点,数据类型以整点值为主,其次有10 min, 20 min 和30min值。目前的观测多为断层带土壤气观测,部分为热水井或温泉水逸出气观测,本文仅对断层带土壤 H_2 浓度进行研究。

通过筛选和资料分析处理,剔除无效数据,本文共筛选了15个测点、不同时段连续稳定的 H_2 浓度观测数据,对缺数情况通过内插法进行处理。

2 土壤 H_2 浓度的正常动态特征

为了研究断层带土壤 H_2 浓度的正常动态变化特征,需要按照动态曲线所反映的时间长度,将研究区间划分为多年动态、年动态、月动态、日动态等。这类动态所反映的是在一定时段内某测点的周期变化特征。

常秋君等(1993)对断层气(Rn , CO_2)的观测资料进行研究,发现 H_2 测值具有明显的周期性变化,依据 H_2 变化周期的尺度长短,可将其分为若干类型。由于目前 H_2 浓度观测时间比较短,故仅提取 H_2 浓度日、月动态变化进行分析研究(图1, 2)。

由图1可看出, H_2 浓度日动态变化特征清晰,可分为3种类型,即双峰双谷型(类似于正弦型图1a、余弦型图1b)、单峰型(图1c, 1d)和高低型(前半天高值、后半天低值的图1e或前半天低值、后半天高值的图1f)。日变幅度为 $(0.2 \sim 2) \times 10^{-6}$,不同测点日变幅度不同。

由于 H_2 浓度的日动态变化可能与气温、气压、固体潮效应有关,但有些观测点的日动态变化,可能是受地温的影响,这需要分析气温与 H_2 浓度的相位是否一致来判别。如果 H_2 浓度日变相位滞后于气温若干小时,根据地温滞后于气温这一判据,就可以推断出 H_2 浓度的变化与地温相关,所以今后的断层气 H_2 观测点应该同步观测集气层位的地温。

使用整点值提取连续一个月的数据资料进行分析,发现 H_2 浓度月动态变化以平稳型为主(图2)。 H_2 浓度日变规律清晰,因此月动态变化表现出高频变化特征,其月变幅度和日变幅度接近。

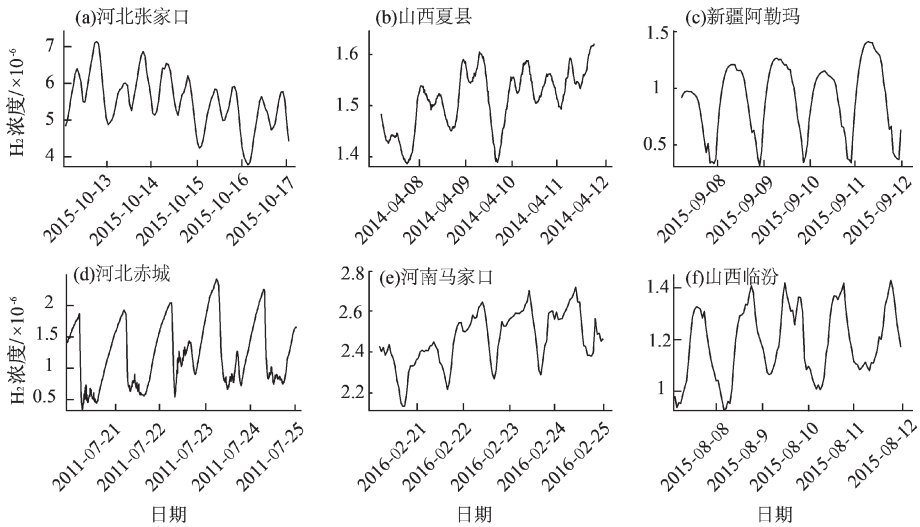


图 1 痕量 H_2 浓度日动态变化类型

Fig. 1 Daily dynamic variation type of trace hydrogen

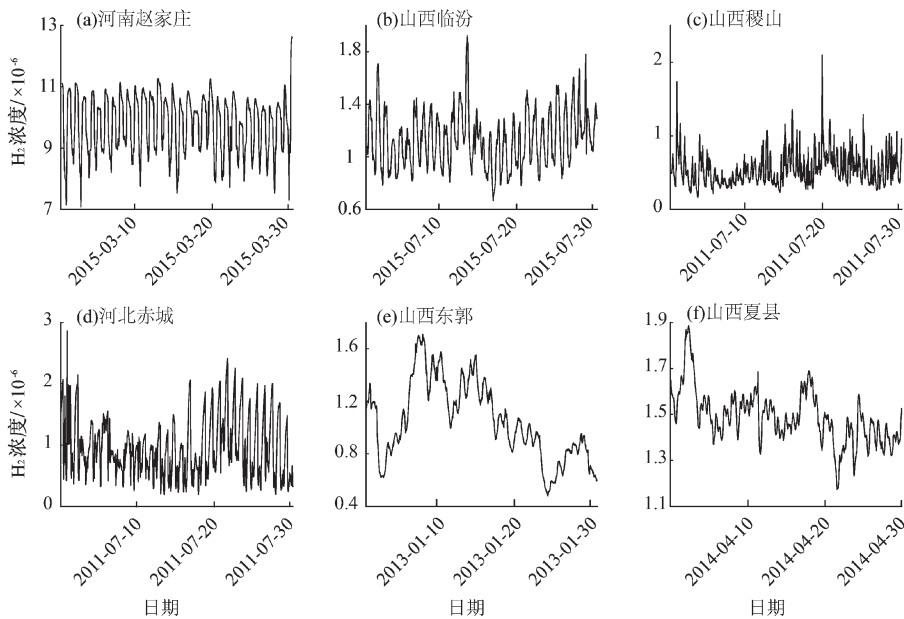


图 2 痕量 H_2 浓度月动态变化曲线

Fig. 2 Normal monthly dynamic variation curve of trace hydrogen

3 土壤 H_2 浓度观测的影响因素

土壤 H_2 观测点多位于地表浅层 (1.25 ~ 16 m), 观测结果受气温、气压的影响, 随着季节变化, H_2 观测值也可能发生变化; 观测孔深度不同, 其受气温、气压影响程度也不同。要使新的测项在短临跟踪和分析预报中发挥作用, 必须对该测项的正常动态特征及其影响因素进行研究分析。本文选取了各种类型、不同时段、不同观测孔深

观测数据, 定量分析气温和气压对 H_2 浓度影响。

3.1 气温影响

计算 H_2 浓度与气温之间的相关系数, 结果如表 1、图 3 所示。参与计算的样本数最少为 538 个, 最多为 26 268 个。从 15 个测点不同时段、不同数据类型处理结果可见, 在河北张北海流图的 H_2 浓度与气温的相关关系最大, $r=0.945\ 7$; 新疆阿克苏相关系数 $r=0.656$, 也比较显著; 在 15 个测点中, 有 8 个测点呈负相关, 占 53.3%; 7 个测点呈正相关, 占 46.7%; 相关系数 ≤ -0.200 或

≥0.200 的测点有 11 个。平为 0.01, 样本数为 200 时, 若相关系数为 0.181, 则表明相关显著 (林记曾, 1981)。因此认为气温对 H₂ 浓度的影响是明显的。

在某一显著水平前提下, 若相关能够成立, 所要求的相关系数大小与样本数有关。当显著水

表 1 H₂ 浓度与气温、气压相关关系统计结果

Tab. 1 The statistics of correlation results between hydrogen levels air temperature and air pressure

台站	时间尺度	数据类型	样本数	孔深/ m	H ₂ 浓度与气温 的相关系数 <i>r</i>	H ₂ 浓度与气压 的相关系数 <i>r</i>	H ₂ 浓度与气温、 气压的相关系数 <i>r</i>
新疆阿克苏	2014-01-01—2014-05-31	整点值	3 624	1.25	0.656 3	-0.075 9	0.682 24
新疆库尔勒	2015-09-01—2015-12-31	整点值	2 924	1.7	-0.391 6	0.290 7	0.400 65
河北赤城	2011-06-24—2011-08-25	10min 值	8 883	2.5	-0.173 8	-0.207 9	0.297 75
河北张北海流图	2014-12-21—2015-06-25	整点值	3 522	3.0	0.945 7	-0.557 9	0.947 32
河北张家口	2015-06-01—2015-07-31	整点值	1 261	3.5	-0.011 97	-0.075 61	0.076 367
河北阳原三马坊	2015-10-08—2015-10-30	整点值	538	6.0	-0.351 55	-0.015 89	0.374
新疆阿勒玛	2015-05-08—2015-08-08	整点值	2 209	8.6	0.489 089	-0.290 44	0.497 02
山西临汾	2015-06-01—2016-06-04	整点值	8 707	6.5	0.427 7	-0.456 8	0.572 91
山西东郭	2012-12-01—2012-12-31	30min 值	1 488	6.5	0.508 478	-0.315 41	0.528 19
山西赤峪	2013-01-01—2013-01-31	30min 值	1 488	7.0	-0.033 48	-0.510 02	0.545 89
山西夏县	2014-01-01—2014-12-31	20min 值	26 268	7.4	0.532 266	-0.465 57	0.532 76
河南马家口	2015-10-01—2016-08-10	整点值	8 285	9.1	-0.108 1	0.016 5	0.162
河南赵家庄	2015-07-22—2015-09-09	整点值	1 200	9.8	-0.696 67	0.130 872	0.736 24
新疆察布查尔县	2015-08-01—2015-10-31	整点值	2 208	10.5	0.280 9	0.088 1	0.406 3
山西稷山	2015-08-01—2016-08-10	整点值	9 024	16.0	-0.519 3	-0.075 9	0.531

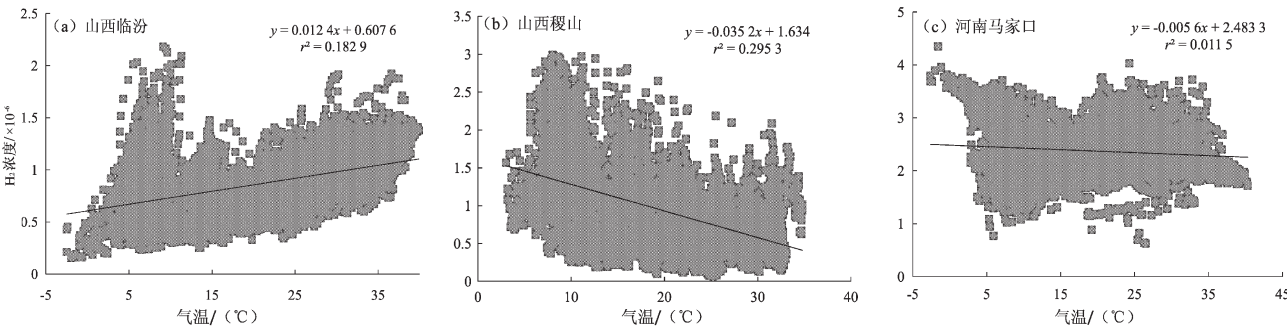


图 3 不同观测点 H₂ 浓度与气温相关关系

Fig. 3 The correlation of hydrogen levels and air temperature at different observation points

3.2 气压影响

采取一元线性回归方法, 计算 H₂ 浓度与气压的相关关系, 计算结果见表 1 和图 4。从表 1 可见, 张北海流图土壤 H₂ 浓度与气压之间的相关关系最大, $r=0.557\ 9$; 在 15 个测点中, 有 11 个测点呈负相关, 占 73.3%; 相关系数 ≤ -0.200 或 ≥ 0.200 的测点有 9 个。这表明气压对 H₂ 浓度的影

响也是比较明显的, 但其影响的程度小于气温。

3.3 气温、气压的综合影响

河北张北海流图和山西夏县的 H₂ 浓度与气温、气压的综合变化曲线如图 5 所示。从图中可见, 在 1 年内, H₂ 浓度和气温呈正弓型变化, 与气压则呈反弓型变化且其变化, 趋向都是可对比的。

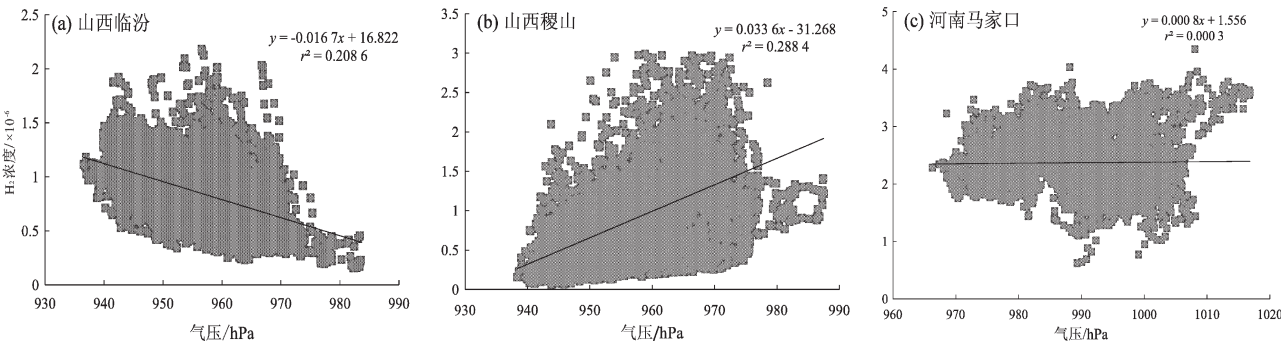


图 4 不同观测点 H₂ 浓度与气压相关关系

Fig. 4 The correlation of hydrogen levels and air pressure at different observation points

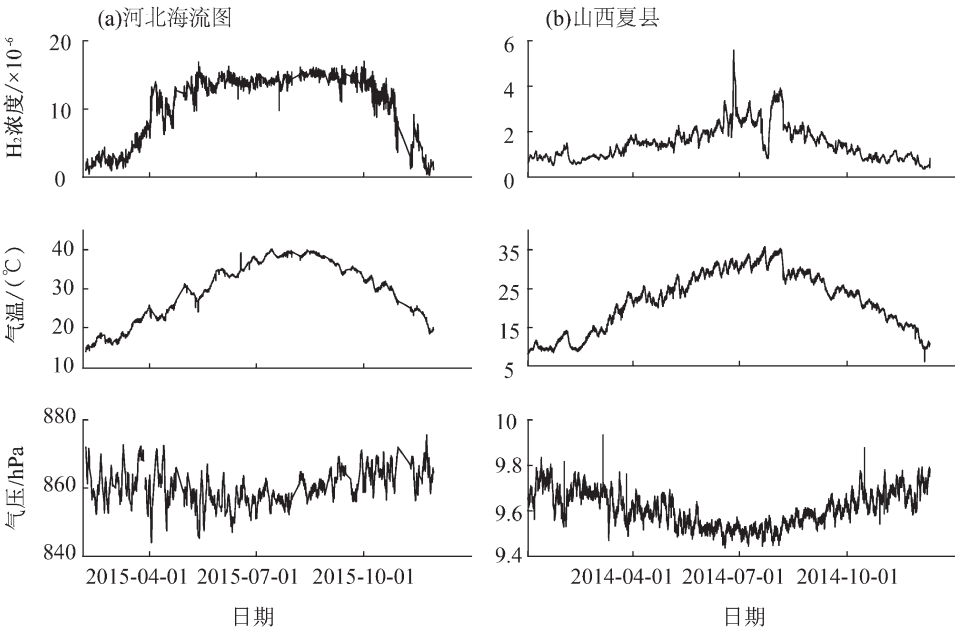


图 5 河北张北海流图 (a) 和山西夏县 (b) H₂ 浓度与气温、气压综合变化曲线图

Fig. 5 Ocean current chart of Zhangbei, Hebei and composite change chart of hydrogen levels, air temperature and air pressure of Xiaoxian, Shanxi

对不同测点 H₂ 浓度与气温、气压进行二元回归拟合,拟合曲线如图 6 所示,相关系数见表 1。从图 6 和表 1 可见,所有观测点的 H₂ 浓度与气温、气压之间一律呈正相关;有 13 个测点的相关系数大于 0.2;张北海流图测点相关系数最大,为 0.947 32,这表明该测点受气温、气压共同作用,而其他干扰因素很小。由此可知,H₂ 浓度与气温、气压之间的相关关系是显著的。因此,在异常分析时,排除了气温、气压影响,就可以识别异常。

3.4 H₂ 浓度与观测孔深度关系

通过一元回归、二元相关分析方法,定量分析不同深度的观测孔气温、气压对 H₂ 浓度的影响,观测孔深度见表 1,观测孔深度与气温、气压

之间关系如图 7 所示,由图可见:

(1) 如果 H₂ 浓度与气温为正相关,则两者间呈反变关系,即观测孔深度越大, H₂ 浓度与气温的相关系数越小;如果 H₂ 浓度与气温为负相关,则两者呈正变关系,即观测孔深度越大, H₂ 浓度与气温的相关系数也越大。

(2) 如果 H₂ 浓度与气压为正相关,则两者呈正变关系,即观测孔深度越大, H₂ 浓度与气压的相关系数越大;如果 H₂ 浓度与气压为负相关,则两者呈反变关系,即观测孔深度越大, H₂ 浓度与气压的相关系数越小。

(3) 无论观测孔为任何深度, H₂ 浓度与气温、气压的复相关系数均为正值。

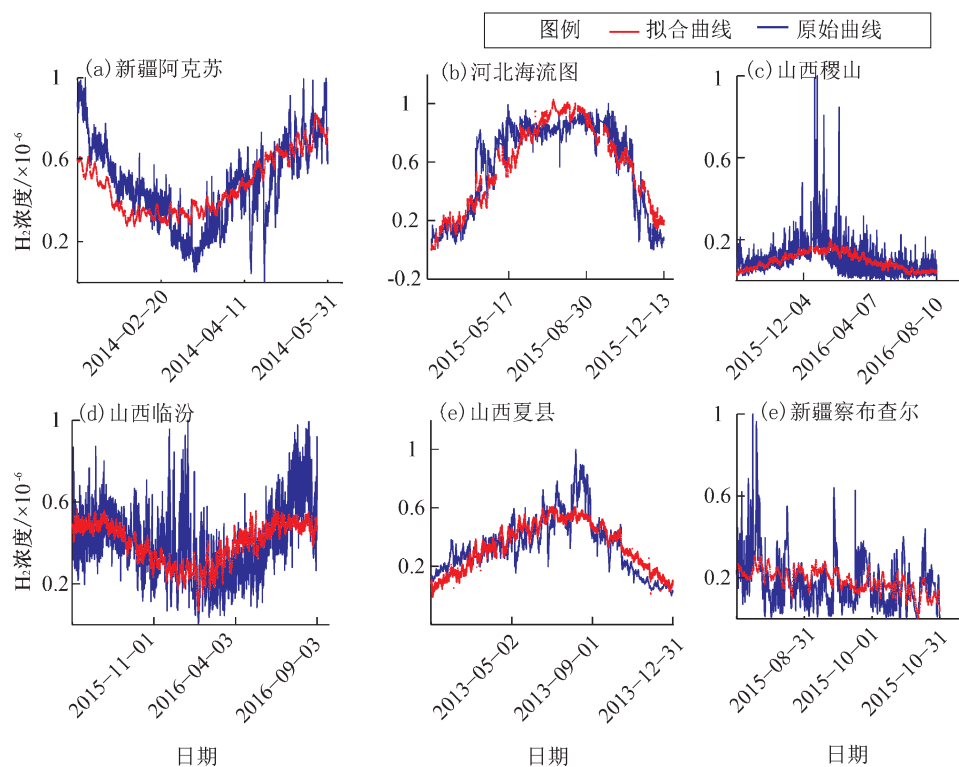
图6 不同测点 H_2 浓度与气温、气压拟合曲线

Fig. 6 The fitted curves of hydrogen levels and air temperature and air pressure at different observation points

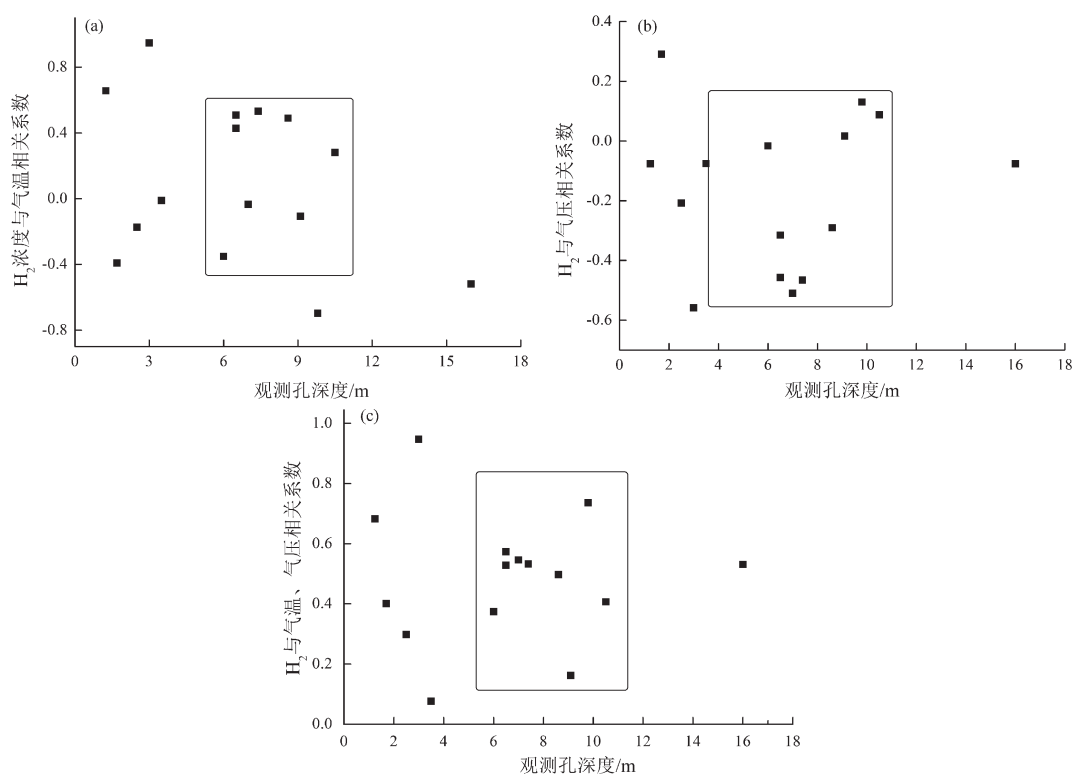


图7 观测孔深度与气温 (a)、气压 (b) 以及气温和气压 (c) 相关系数之间关系

Fig. 7 The relationship of correlation coefficients between the depth of observation hole and air temperature (a), and air pressure (b), and between the temperature and the air pressure (c)

(4) 当观测孔深为 4 ~ 11 m 时, H_2 浓度与气温、气压之间相关系数的分布较为集中; 若孔深小于 4 m, 则比较分散。

4 结论与讨论

为了分析断层带土壤 H_2 浓度变化及其影响因素, 本文选取不同时段、不同数据类型、不同观测深度、不同观测环境的 15 个观测点, 通过定性和定量分析研究, 得出以下结论:

(1) 断层带土壤 H_2 浓度具有明显的日变化, 涨落现象十分突出, 变化规律清晰; 月动态变化则不明显。

(2) 气温和气压是土壤 H_2 浓度观测的主要气象影响因素; 就其影响程度而言, 气温的影响大于气压。

(3) 土壤 H_2 浓度与气温、气压之间的相关关系是比较复杂的。土壤 H_2 浓度与气温或与气压之间, 均可呈现正相关或负相关 2 种情况。但土壤 H_2 浓度与气温、气压之间的复相关系数却为正值。

(4) 土壤 H_2 浓度与观测孔深度间的关系比较明显, 也比较复杂, 4 ~ 11 m 可视为观测孔的优选深度。

断层带土壤 H_2 观测浓度技术目前处于试验性探索阶段, 还有一些问题有待深入研究。但气象因素中对断层气组分最主要的影响是气温, 其次是气压, 而且气温、气压对土壤 H_2 浓度的影响程度会受到不同测点的地质环境 (主要指观测层的土壤、岩石的成分和结构等)、土壤 H_2 测点与断裂带距离等因素的影响。因此, 在分析异常与地震的关系时, 应将气象因素引起的变化予以识别或排除。目前痕量氢数字化连续观测处于实验阶

段, 研究成果存在一定的误差, 也需做进一步深入分析。

参考文献:

- 常秋君,何跟巧,郭玉英,等. 1993. 断层气定点观测主要影响因素的研究[J]. 西北地震学报, 15(4): 82-89.
- 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.
- 范雪芳,刘国俊. 2015. 痕量氢连续观测仪稳定性分析[J]. 中国地震, 31(1): 36-44.
- 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.
- 耿杰,付俊东,孔向阳,等. 2019. 沂沭断裂带构造地球化学观测结果分析[J]. 地震研究, 42(3): 310-319.
- 纪振红,郑秋艳,王少波,等. 2010. 氢气的分析方法研究[J]. 化学分析计量, (3): 95-97.
- 林记曾. 1981. 观测数据的数学处理[M]. 北京:地震出版社, 226.
- 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[J]. 国际地震动态, (7): 3-12.
- 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探讨[J]. 岩石学报, 26(12): 3651-3656.
- 栗启初. 1992. 沿断层逸出的氢气对地震的诱发作用[J]. 地震学报, 14(2): 229-235.
- 王永才,张根深,孔宝元,等. 1992. 用气体地球化学方法探讨活断层的有关问题[J]. 内陆地震, 6(3): 252-257.
- 张炜,罗光伟,邢玉安,等. 1988. 气体地球化学方法在探索活断层中的应用[J]. 中国地震, 4(2): 121-123.
- Hernández P, Pérez N, Salazar J, *et al.* 2000. Soil gas CO_2 , CH_4 and H_2 distribution in and around Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands, Spain[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 103(1-4): 425-438.
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, *et al.* 1980. Hydrogen release: New indicator of fault activity[J]. Science, 210(4466): 188-190.
- Whiticar M J. 1999. Carbon and hydrogen isotope systematic of bacterial formation and oxidation of methane[J]. Chemical Geology, 161(1-3): 291-314.

Research on Variation Characteristics and Influence Factors of Hydrogen Concentration in the Soil

FAN Xuefang¹, YANG Zhimeng², LI Hongwei¹, WU Gui'e¹, HAN Xiaofei¹

(1. *Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, Shanxi, China*)

(2. *China Institute for Radiation, Taiyuan 030006, Shanxi, China*)

Abstract

Continuous observation data of hydrogen levels and hourly values of air temperature and air pressure for 15 different regions, geological environments, and depths in China are collected. Daily dynamic characteristic of levels of high – accuracy hydrogen in the soil is studied and influence degree of air temperature and air pressure of different hole depths to hydrogen levels is analyzed quantitatively through the calculation of correlation coefficient of hydrogen levels and different air temperature and atmospheric pressure. The result shows that observation dynamics of levels of hydrogen in the soil and atmosphere factor is closely related and the best depth of observation hole is 4 ~ 11 m.

Keywords: hydrogen in the soil; air temperature; air pressure; dynamic characteristic; influence factors