

doi: 10.12029/gc20200623

苏鹤军, 王宗礼, 曹玲玲, 张慧, 李晨桦, 周慧玲. 2020. 断裂带土壤气测量方法在断层活动性研究中的应用——以嘉峪关断层为例[J]. 中国地质, 47(6): 1894–1903.

Su Hejun, Wang Zongli, Cao Lingling, Zhang Hui, Li Chenhua, Zhou Huiling. 2020. The application of measurement method of soil gas from fault zone to fault activity study: A case study of Jiayuguan fault[J]. *Geology in China*, 47(6): 1894–1903 (in Chinese with English abstract).

断裂带土壤气测量方法在断层活动性研究中的应用 ——以嘉峪关断层为例

苏鹤军^{1,2}, 王宗礼³, 曹玲玲², 张慧^{1,2}, 李晨桦^{1,2}, 周慧玲^{1,2}

(1 中国地震局兰州岩土地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000;)

摘要:为了判断甘肃省嘉峪关断层监测点气氡浓度 2015 年 6 月以来的高值异常变化是否反映了嘉峪关断层活动的增强, 本文基于土壤气跨断层分布规律, 应用跨断层测量方法, 通过多组分相关性分析及理论建模, 综合分析了嘉峪关断层监测点气氡浓度高值异常变化与断层活动的关系。结果显示: 监测点断层气中氡浓度快速增加期间, CO₂、CH₄和 H₂的浓度没有增加, 气氡与 CO₂、CH₄浓度的变化不具正相关关系, 表明监测点增加的氡气来源深部较浅, 不代表断层活动的增强。监测点两侧跨断层测量结果表明, 地表环境未改变一侧的氡气浓度符合断层气分布规律, 地表环境发生改变一侧的氡气浓度不符合断层气分布规律, 并且地表环境的改变时间与监测点气氡浓度异常变化时间同步。因此监测点气氡浓度的高值异常是由地表环境的改变引起的, 嘉峪关断层的活动并没有增强。该方法为用断裂带土壤气体测量方法研究断层活动性的可靠性提供了思路。

关键词:断裂带土壤气; 嘉峪关断层; 断层活动性; 多组分气体; 地质调查工程; 甘肃省
中图分类号: P546 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)06-1894-10

The application of measurement method of soil gas from fault zone to fault activity study: A case study of Jiayuguan fault

SU Hejun^{1,2}, WANG Zongli³, CAO Lingling², ZHANG Hui^{1,2}, LI Chenhua^{1,2}, ZHOU Huiling^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Geotechnical Earthquake, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences of Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;)

Abstract: In order to determine whether the increase of gas radon concentrations at the monitoring point of the Jiayuguan fault since June 2015 can reflect the stronger activity of the Jiayuguan fault or not, the authors applied the cross-fault measurement method based on the typical distribution pattern of soil gas across faults and analyzed comprehensively the relationship between the abnormal changes of gas radon concentrations and the fault activity through multi-component correlation analyzing and theoretical modeling. The results show that the concentrations of CO₂, CH₄, and H₂ from the same monitoring point do not increase during the

收稿日期: 2018-01-18; 改回日期: 2018-07-18

基金项目: 中国地震局地震监测预报专项(ZX2017031)和甘肃省自然科学基金(1606RJYA218)联合资助。

作者简介: 苏鹤军, 男, 1973 年生, 副研究员, 主要从事断层气及同位素地球化学研究; E-mail: suhejun@126.com。

通讯作者: 曹玲玲, 女, 1972 年生, 副研究员, 主要从事地下流体预测地震研究; E-mail: caoll@gsdzj.gov.cn。

rapid increase of the gas radon concentrations from the monitoring point of the fault. There is no positive correlation between them. The adding of gas radon concentration does not come from deep crust and it does not mean the stronger activity of the Jiayuguan fault. The results of the gas radon measurement across faults which lie on both sides of the monitoring point show that the gas radon concentrations are different, and this is consistent with the typical distribution pattern of fault gas on the unchanged side of the surface environment but it does not conform to the typical distribution pattern of fault gas on the changed side of the surface environment. The increase of gas radon concentrations is correspondingly with the change of the surface environment in time. Therefore, the increase of gas radon concentration at the fault monitoring point is caused by the change of the surface environment, and the activity of the Jiayuguan fault does not increase. This method provides a thinking for the improvement of reliability in using fault soil gas to judge fault activity.

Key words: soil gas from fault zone; Jiayuguan fault; fault activity; multi-component gas; geological survey engineering; Gansu Province

About the first author: SU Hejun, male, born in 1973, associate researcher, mainly engages in the study of fault gas and isotope geochemistry; E-mail:suhejun@126.com.

About the corresponding author: CAO Lingling, female, born in 1972, associate researcher, mainly engages in the study of using underground fluid to predict earthquake; E-mail:caoll@gzdj.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of "Special Project for Earthquake Monitoring and Prediction of CEA (No. ZX2017031) and Natural Science Foundation of Gansu, China (No. 1606RJYA218)".

1 引言

活动断层系指第四纪以来,尤其是晚更新世以来仍在活动的断层(徐锡伟等,2016)。全球的绝大多数强震发生在已经存在的活动断层上(张培震等,2003),断层活动的强弱与地震的孕育发生密切相关。地震发生时断层突发性滑动释放能量所引起的强地面运动和活动断层的同震错动是导致地震灾害的两个主要原因(Scholz, 2002; 徐锡伟等, 2011),因此有效的监测和研究断层活动强弱的变化,对减轻地震灾害具有重要的意义。

气体赋存于地球各圈层,地球深部的气体在壳幔活动过程中最容易向上逸出(杜建国等,1994),而断裂带是气体逸出的良好通道。断裂带中带有深源信息的气体主要包括CO₂、H₂、CH₄、He、Rn和Ar等(徐永昌等,1996;Walia V,2002)。它们浓度的变化能够灵敏和客观的反映断层活动强弱的变化(Pizzino et al.,2004;邵永新,2012)。早在20世纪末开始,已经利用断裂带微量气体的分布来研究断层活动性和探索地震的预测方法(何跟巧等,1989;孟广魁等,1997;刘菁华等,2009),以及利用土壤氡浓度的差异来确定隐伏断层的位置(阎贤臣等,1987;刘学领等,2011;周晓成,2013)等。近几年,进行了大量跨断层气体的测量,分析了断层活动强弱与断层气浓度变化关系,研究结果表明断层气浓度的升

高与断层活动的增强有关(韩晓昆等,2013;苏鹤军等,2013;孙小龙等,2016;何朝枫等,2016;王喜龙等,2017;王江等,2017)。

氡是断裂带中的惰性气体,由于其化学性质稳定,能够反映出地壳内部物质的运移,且由于其观测方法比较成熟,因此常被用作监测断层活动。但目前用于断层活动性监测的氡为土壤气氡,它的观测深度很浅,通常在3 m以内,这个深度测量的氡有来自地壳深部的,也有来自地壳浅部的,空气和土壤中也含有一定量的氡,氡的来源不同,代表的断裂带活动强度也不同,来自断裂深部氡浓度的变化携带有更多断层活动的信息(杜乐天,2008),但它在向上逸散过程中会与浅部气体混合,因此,当监测到氡浓度出现高值异常变化时,对其来源判断至关重要,这也是目前急需解决的难点,也是弱点。已有研究表明,来源于断层深部的气体,其Rn的浓度与CO₂或CH₄的浓度具有正相关特性。如Yang et al.(2003)对台湾活动断裂上的YC(Yan-Chao)和CL(Chung-Lun)的泥火山气体研究发现,YC具有壳源特征,CL具有幔源特征,认为在YC区,CH₄作为载体将Rn运移至地表,在CL区,CH₄和CO₂作为载气将氡运移至地表。Ciotoli et al.(2007)对意大利Fucino盆地气体运移机制研究时发现Rn与CO₂的浓度成正相关,认为氡是通过CO₂运移至地表的。因此当用于监测断层活动的气氡浓度出现高

值异常变化时,可以首先利用断层气浓度的相关性变化特征判断气氡的来源深度,进而对断层活动的性质做出较为准确的判断。

基于以上研究基础,本文拟通过断层多组分气体的测量判断嘉峪关断层气氡浓度高值的来源,并通过跨断层土壤气氡的测量,判断2015年以来嘉峪关断层气氡浓度的升高是否为该断裂构造活动增强的信息反映。

2 嘉峪关断层地质背景及断层气氡异常概况

嘉峪关断层是河西走廊内部的一条重要断层,它横穿NNW向的酒泉盆地,将盆地分割为酒东和酒西盆地,该断裂北起榆树沟山,向南延伸至文殊沟口,全长近70 km,总体呈N30°~35°W方向展布,倾向西南,倾角73°~85°,晚第四纪以来新构造活动以挤压逆冲为主兼右旋走滑,断层切割奥陶系、白垩系、新近系和上更新统。在剖面上表现为SW盘上升、NE盘下降。全新世有古地震活动,第四纪晚期以来的平均滑动速率为0.52~0.56 mm/a(何文贵,2010)(图1)。

为了监测嘉峪关断层的活动强度,1989年在该断层的39.8°N, 98.28°E处建立了监测点,监测深度为1.2 m和3 m,同孔观测,用直径为3~4 mm的导气

管将气体导出,每天固定时间通过导气管采集样品后在实验室观测。由于深孔测值更加稳定,因此本文选择深孔测值进行分析。图2为2010年以来气氡浓度的5 d均值曲线图,显示测值具有明显的年变形态,每年7—8月测值达到最高,表明气氡浓度受气象因素的影响,即有浅部氡的混入。2010—2015年,同期测值相当,但2015年年底以来呈逐年上升趋势,图2虚线所示,最大上升幅度达31.5%。针对这一趋势性上升及幅度增大异常现象,已经通过干扰因素分析并排除了气象因素的影响。

3 测量方法

3.1 多组分气体的测量

在断层多组分气体研究中,Cilotoli et al.(2007)和Fu et al.(2008)研究发现Rn浓度与CO₂浓度具有很好的相关性,Yang et al.(2003)研究发现Rn浓度与CH₄和CO₂的浓度呈正相关,虽然H₂和Rn浓度之间不具备相关性,但H₂浓度的变化能够反映断层较深部位的活动特性,H₂浓度增加,断层活动增强(Toutain et al, 1999)。因此本文对断层气中CO₂、CH₄和H₂的浓度进行测量。测量位置为气氡监测点,同时为了与空气成分对比,还测量了监测点周围空气中相应组分的浓度。为了使测量的数据之

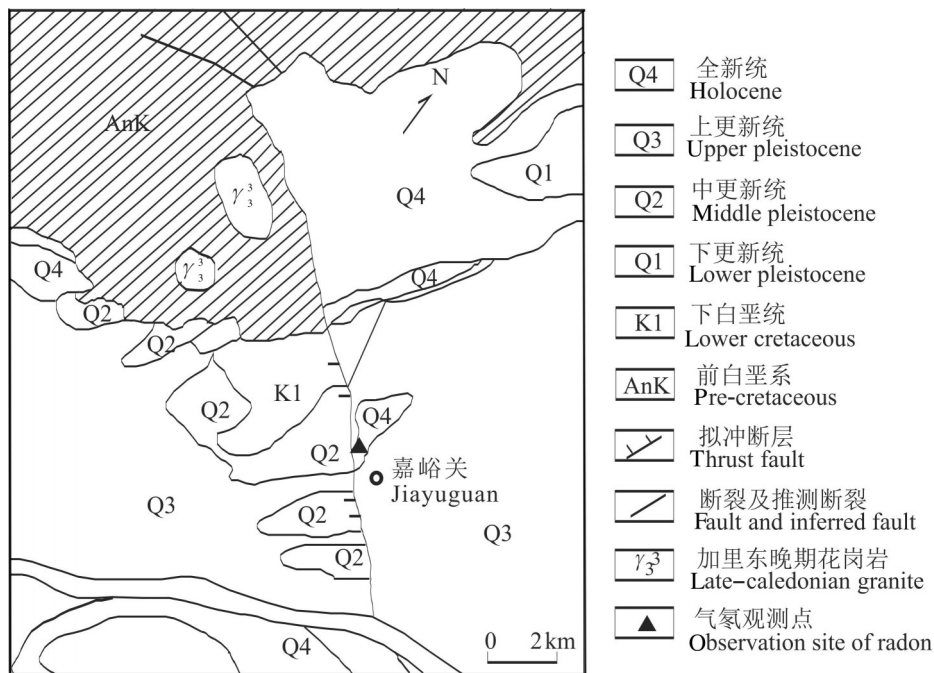


图1 嘉峪关断层地质构造图
Fig.1 Geological structural map of Jiayuguan fault

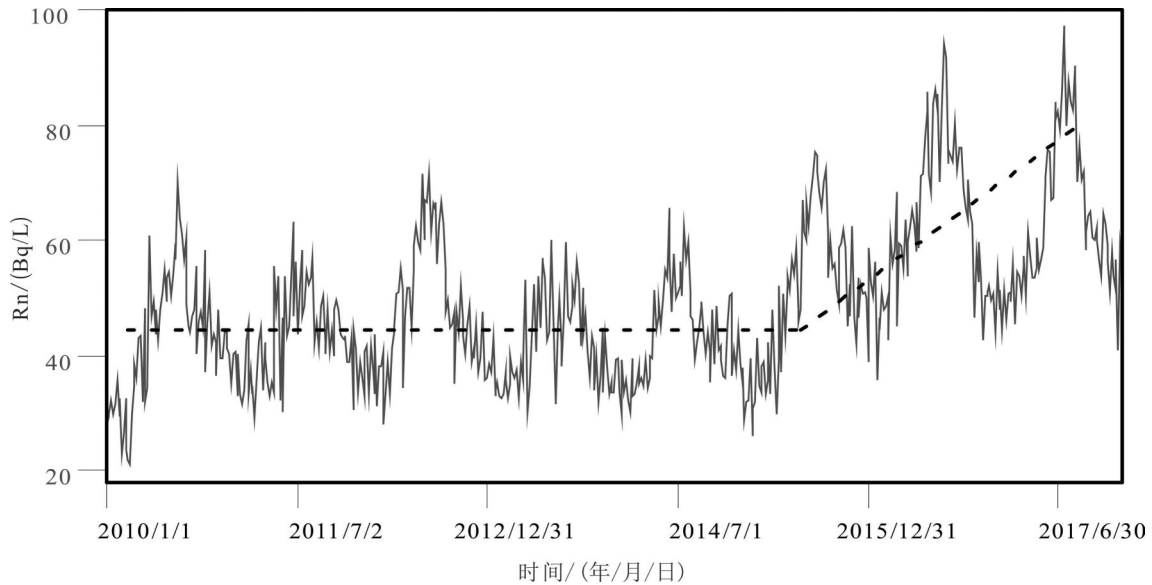


图2 嘉峪关气氡浓度5d均值曲线图

Fig.2 Five-day average values graph of gas radon concentration of Jiayuguan fault

间具有可对比性,所有组分同期测量。

3.1.1 CO₂气体浓度测量

CO₂浓度测量使用的仪器为GXH-3010E1便携式CO₂分析仪,分辨率为0.001%。2015年10月18日开始进行断层气氡同气样测量,为了判断测值的可靠性,2016年6月用同型号仪器进行了对比观测。

具体的测量方法:每天采集气氡样品前,开启仪器预热,当仪器达到观测要求时将仪器与断层气导气管连接,仪器开始自动测量,测量时长5 min,取其中的最高值作为当天气样中CO₂浓度的测值,每天产生一个数值。

3.1.2 CH₄和H₂浓度的测量

CH₄和H₂浓度的测量采用X-am7000德尔格多组分气体测量仪,其检出限值为0.001%。

观测方式:将被测气体与仪器用导管连接,开启机器,在机器进入观测状态时仪器自动测出各组分的气体浓度。共连续测量了3 d(每天同一时间段测量),每天测量1次。

3.2 跨断层土壤气氡测量

3.2.1 测点布设

嘉峪关断层气氡监测点在断层上盘,此次在监测点南侧和北侧布设了2条跨断层测线HT1和HT2。HT1在监测点北侧,监测点到测线的距离为20 m,HT2在监测点南侧,监测点到测线的距离为6 m,由于地理环境所限,无法做到两条测线到测点的

距离相等。HT1测线布设了5个测点,由于测区环境所限,测点分布不均匀,测点1~2、测点3~4之间的距离为10 m,其他相邻测点之间距离为15 m。HT2测线布设了3个测点,等间距布设。两条测线总长相等,都为50 m。测线、测点、断层及监测点的位置平面图和aa'线剖面图见图3。

3.2.2 测量方法

气氡测量采用P2000便携式测氡仪,检出限为1000 Bq/m³。为打钎测量,钎孔深度为80 cm左右,这个层位,地下土壤和岩石的吸附及孔、洞储藏气与地表空气的交换及其频繁,但Rn等浓度远远大于空气值,含有地壳深部的气体,测量结果可与断层监测点的对比。P2000测氡仪为连续测量,每分钟产生一个数据,每个测点记录25个数值,然后根据规范进行数据处理,计算出每个测点即刻的气氡浓度。

不同仪器对同一样品测量时,通常由于系统误差,会导致测值不同。由于嘉峪关断层气氡测量所用的仪器为FD-125型氡钍测量仪,因此用p2000测氡仪对监测点的氡浓度也进行了测量,以便不同测点的气氡浓度值具有可对比性。

4 测量结果分析

4.1 多组分气体测量结果分析

图4为断层监测点断层气体中Rn和CO₂浓度测值,从图可以看出,CO₂测值在0~0.09%之间变

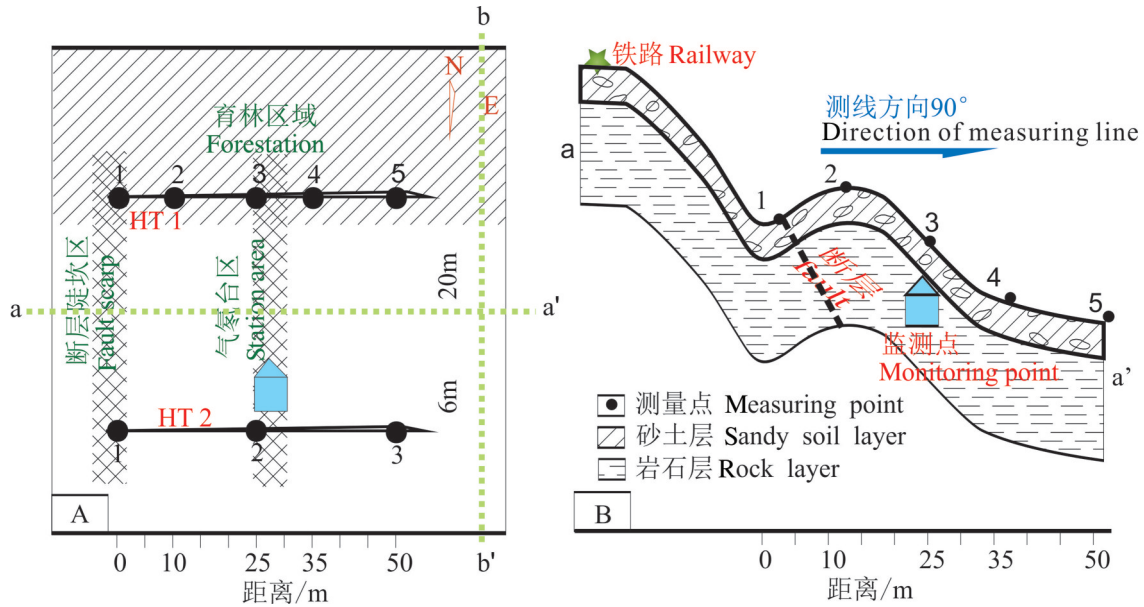


图3 跨断层测线及测点布设平面(A)及剖面图(B)
Fig.3 The plan view (A) and geological section (B) of cross-fault survey lines and survey points

化,但大多在0~0.05%。现场测量结果显示,监测点周围空气中的CO₂浓度为0.04%,与同期断层监测点气样中的浓度一致。另外,气氨浓度的大幅增加开始于2016年5月31日,之后一直波动上升,但CO₂测值5月31日前后并没有大的变化,且在气氨浓度大幅上升期间变化也很平稳,由此可以看出气氨浓度大幅变化期间,它与CO₂浓度的变化不具有同步性。

为了定量的判断CO₂与气氨浓度的相关性,计算了两者之间的相关系数。相关系数的计算分为3个时段,2015年10月18日—2016年7月16日,2015年10月18日—2016年5月30日(气氨浓度变化平稳时段)和2016年5月31日—2016年7月16日(气氨浓度大幅上升时段)。在95%的置信水平下,计算所得的相关系数依次为0.162,0.137和-0.382。可以看出,研究的整个数据区间相关系数为正,但没有达到相关;在气氨浓度变化相对平稳的时段,两者的相关系数为正,两者同样没有达到相关,而在气氨浓度变化较大的时段,相关系数反而成负值,并且绝对值增大。因此Rn气浓度与CO₂浓度不具有正向同步变化。

CH₄浓度仅测量了3 d,由于没有正常背景测值作对比,无法仅从3 d的测值判断出CH₄浓度是否增加。但如果来自断层深部的CH₄的浓度增加,理论

上断层深孔的浓度不低于浅孔的且高于空气的。但从测量结果来看(表1),6月1日,3个测点的测值相同,6月2日和3日,深孔的测值低于空气且低于或与浅孔持平。这表明来自断层深部的CH₄浓度并没有增加。

由此可以看出,气氨浓度增加的同时,其他气体的浓度并没有出现同步升高,因此增加的气氨浓度并不是来自地壳深部,不具有构造活动增强的信息。

H₂虽然不是气氨运移的载体,但它在大气中的浓度很低(约0.5×10⁻⁶),在地壳中的浓度较高(n×10⁻⁶~n×10⁻⁴),集中分布在5~8 km深度,主要释放于断层带上(车用太等,2015)。因此,可以用H₂浓度的变化来判断气体来源的大概深度,也为判断增加的气氨浓度的来源提供佐证。对比3组观测数据

表1 监测点断层气中CH₄和H₂浓度
Table 1 The concentrations of CH₄ and H₂ from fault monitoring point

测量时间	气体组分	气体来源		
		空气	深孔	浅孔
20160601	H ₂	0	0	0
20160602		0	0	0
20160603		0	0	0
20160601	CH ₄	3%LEL	2%LEL	3%LEL
20160602		3%LEL	3%LEL	3%LEL
20160603		3%LEL	2%LEL	2%LEL

(表1),3个测点都没有测到 H_2 ,表明 H_2 没有显著的增加,同时表明不具有构造活动成因的断层气释放信息。

综合以上分析,气氡浓度高值异常期间,其载体 CO_2 和 CH_4 的浓度并没有升高,同时对断层活动增强有灵敏响应的 H_2 含量也没有明显的增加,表明气氡浓度的上升并不代表断层活动的增强。

4.2 跨断层气氡测量结果分析

共测量了2条剖面以及断层监测点2个不同深度的气氡浓度,测量结果见表2,测值的空间变化见图5。从表2和图5可以看出,断层深孔气体中的氡浓度最高,其次为浅孔的,HT1剖面 and HT2剖面测值与具体的测点有关,但深孔和浅孔都高于2条剖面的。HT1剖面从整体来看,5个测点,从断层陡坎到垂直断层的走向方向上,开始为上升变化,紧接着出现了快速的下降,最后2个测点测值较为相近,

表2 测线及监测点气氡浓度

Table 2 The gas radon concentrations of measuring lines and monitoring point

测线	气氡浓度测值/(Bq/L)				
	1	2	3	4	5
HT1	19.10	28.10	6.81	1.03	2.31
HT2	9.14	—	37.60	—	2.58
深孔	—	—	85.95	—	—
浅孔	—	—	45.85	—	—

注:—:表示没有测量。

都为低值。HT2剖面总共3个测值,从断层陡坎开始,依次为上升—下降变化。在低值点2条测线的测值相当。

大量研究结果表明(阎贤成等,1987;张炜等,1998;朱金芳等,2005;张慧等,2010,2013;伍剑波等,2014),深部地下气体沿着断裂带向上运移和富集,在断裂带上方形成土壤气体异常晕,产状较陡的逆断层带土壤气浓度曲线具有典型的“低—高一低”峰值形态特征,即典型特征线,嘉峪关断层就属于此类断层,其气氡浓度典型特征线如图5虚线所示。图5是2条跨断层测线的土壤气氡浓度曲线图,由图可以看出:HT2具有“低—高一低”的弓形特征,与典型特征浓度曲线形态相一致,但HT1在监测点附近,即断层位置呈下降趋势,偏离典型曲线,由此可以判断,HT2区地下气氡能够正常逸出,而HT1区地下气氡并不能正常逸出。在现场测量中也发现,HT1区气体量很少,有些测点由于气量太少而无法完成氡气浓度的正常测量。对2条测线气氡在断层位置的测值,HT2测线测值几乎是HT1测线的6倍。对比断层位置HT2测线和监测点的测值,它明显低于断层监测点深孔的测值,略低于浅孔的测值。对比条测线所处的环境,HT2测区位于戈壁滩(图6中A区),气氡观测以来环境没有变化,而HT1测区自2015年以来,进行填土绿化工程(图6中C区),种植大量红沙柳和少量白杨树,开始定期浇水,因此观测环境存在明显变化,这与气氡监

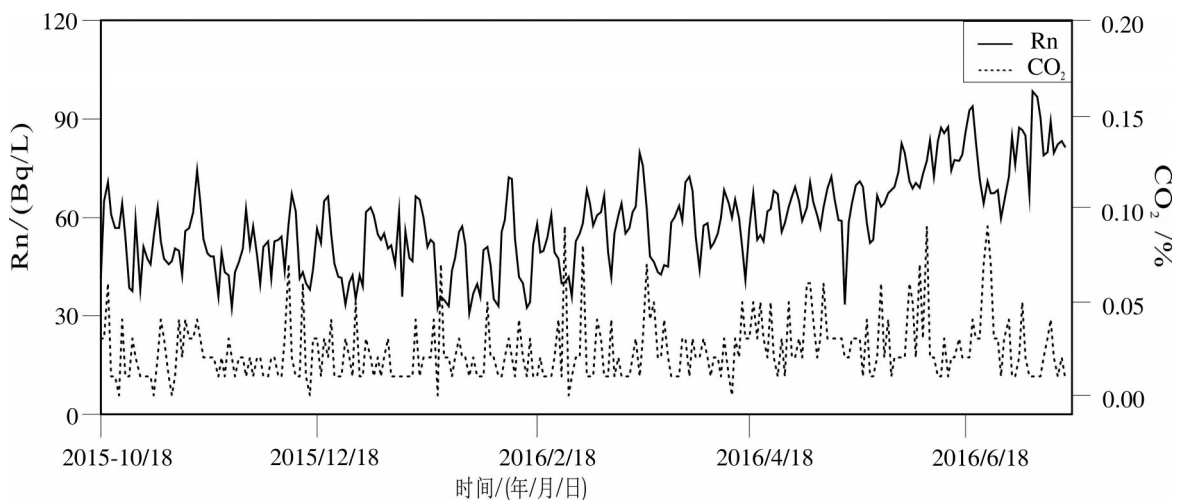


图4 监测点气氡浓度与 CO_2 浓度日值曲线图

Fig.4 The daily value graph of concentrations of gas radon and CO_2

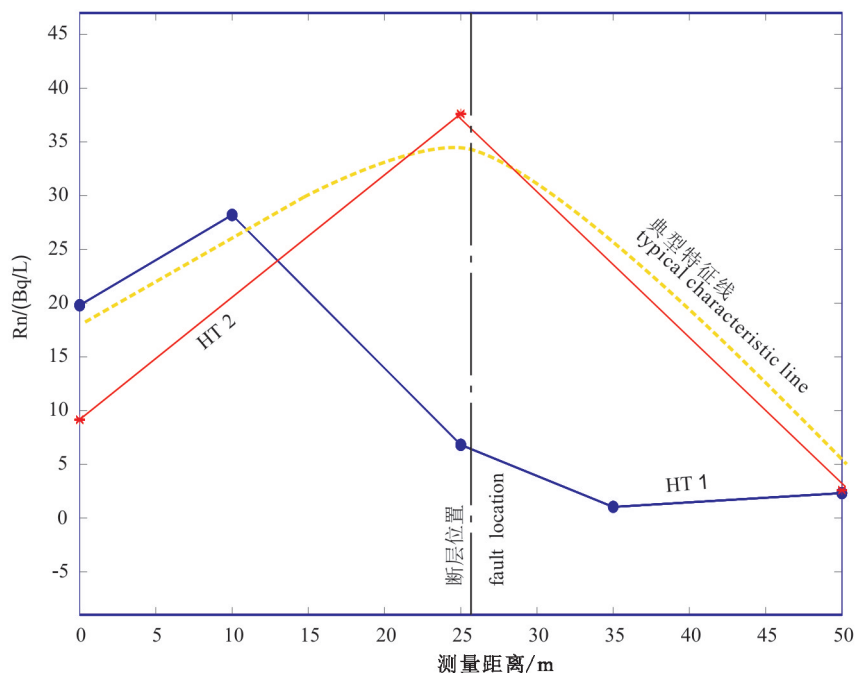


图5 跨断层测线气氡浓度曲线图
Fig.5 Gas radon concentrations graph of measuring lines

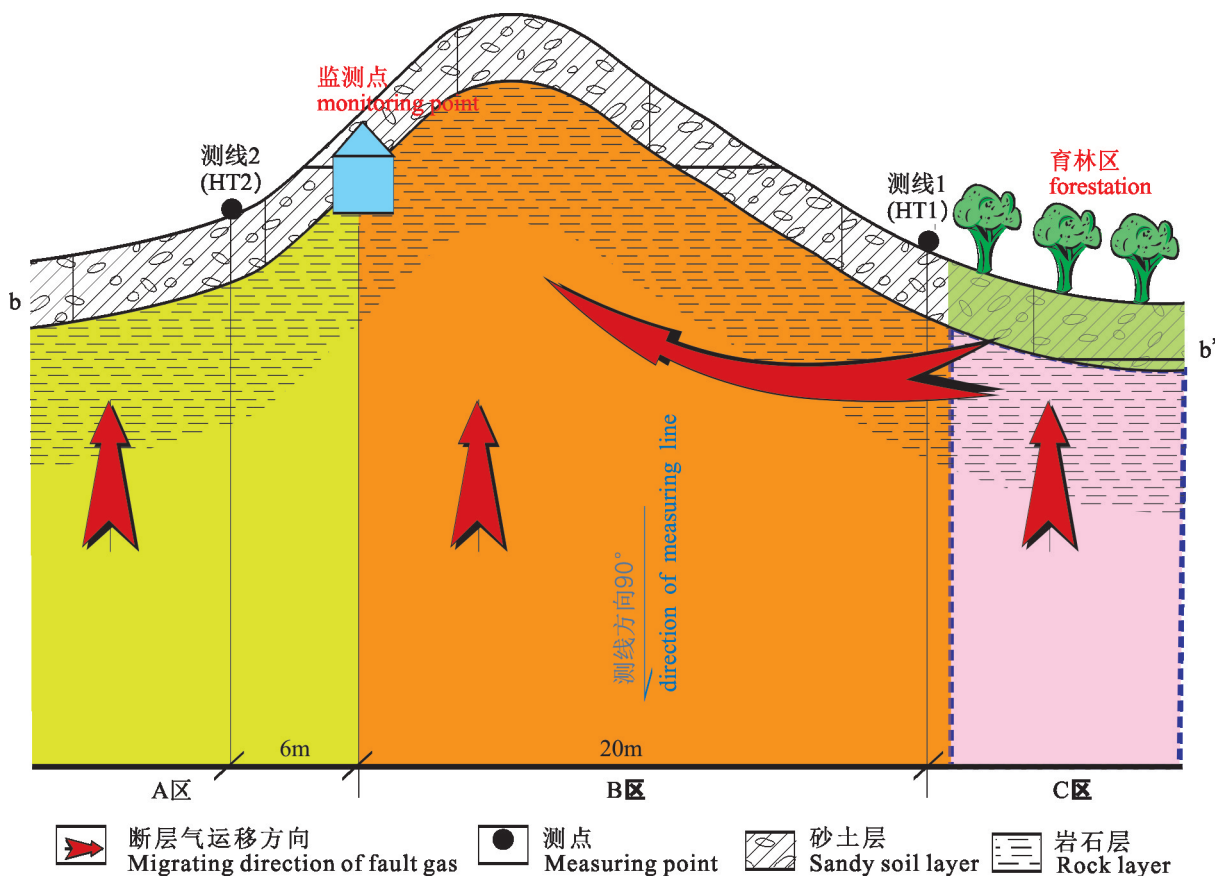


图6 气氡逸出模型图(见图3b—b'剖面)
Fig.6 The model diagram of gas radon escaping (see Fig. 3 b—b' section)

测数据出现上升趋势的时间节点相一致(图2)。综合以上分析认为:嘉峪关断层监测点周围环境的改变是本次气氡浓度上升的原因。

4.3 断层气氡高值变化机理分析

影响氡析出率的主要因素除气象因素外,还与岩层孔隙、裂隙发育程度及其连通性及含水饱和度等有关。根据杜建国等(1998)对八宝山断裂的研究结果,土壤孔隙一般为亲水性,浇水(包括降雨)时土壤孔隙由水充填,同时引起黏土矿物湿膨胀,导致土壤气体脱气受阻。孙凯男等(2004)研究结果显示孔隙度降低会导致氡的析出率降低。由图6可以看出,HT1测线位于育林区,由于该区域位于戈壁滩,育林前需填土浇水,之后种植林木。由于所填土层和砂土层相比,其孔隙度低,孔隙连通性差,导致氡析出率降低,另外大量的浇水也使表层土壤气体脱气受阻。因此,出现了位于育林区的HT1测线断层位置气氡的测值远低于正常逸出值。

由于温度梯度和压力梯度等因素的影响,地壳中的气体向上运移的能力强于水平运移的能力,当地壳或覆盖层水平方向相对均匀时,气体主要向上运移(图6),即图6 A区和B区的气体可以直接垂直析出地表。但C区的气体运移到土壤埋层时,埋层由于阻止氡析出能力强而使气体向上运移受阻。气体析出受阻导致土层下方气体聚集形成高压高浓度区,进而在水平方向产生侧向压力和浓度梯度,迫使气体向水平压力和浓度更低的方向运动,而断层部位由于岩石破碎,孔隙度高,孔隙连通性好,压力低,因此高压区的气体向断层方向,即B区运动(如图6大箭头方向所示),最终导致断层监测位置氡浓度的升高。由于育林区的树木种类主要是灌木,它的根系不是很发达,且生长周期较短,因此气氡的浓度2017年和2016年相比,已经没有大的变化(图2)。

氡同位素的半衰期很短,最长的也仅3.825 d,氡能否在大量衰变前运移20 m而到达气样取样位置呢?

乐仁昌等(2006)认为如果仅用扩散和对流计算,氡迁移的最大距离为10~20 m, Walia et al. (2005)认为扩散不能让氡在其原子衰变前移动10 m的距离。但氡的迁移方式很多,吴慧山等(1997)认为接力传递作用就可以很好地解释氡的

较长距离的运移。因此,在载气没有显著增加的情况,氡在衰变完前迁移20 m是完全可能的。

5 结 论

本文利用跨断层土壤气测量的方法,在排除仪器故障和气象干扰的前提下,通过断层气多组分相关性和理论建模分析,对嘉峪关气氡2015年以来的高值变化进行了深入研究,得出以下主要结论:

(1)断层气多组分相关性分析结果表明:在气氡浓度快速上升的前后,CO₂和CH₄浓度与氡浓度变化的相关性较差,没有构造活动成因的深部变化信息,因此,断层气氡出现高值异常并不意味着断层活动的增强。

(2)跨断层土壤气氡浓度测量结果表明:观测环境的改变是导致氡浓度上升的主要原因。通过监测点气氡浓度上升的机理分析,认为盖土灌水育林改变了氡的逸出通道,使原来垂直逸出的部分气体向断层位置迁移,引起监测点位置的氡浓度升高。

(3)本文研究表明,断裂带土壤气浓度能够反映断层活动信息,但必须对其异常变化的因素加以甄别,以便提高判断的准确性。

致谢:参加本项工作的还有嘉峪关台站的张俏丽和尚俊斌两位观测人员;两位审稿专家及编辑提出了宝贵的修改意见和建议,在此表示衷心的感谢。

References

- Che Yongtai, Liu Yaowen, He Lan. 2015. Hydrogen monitoring in fault zone soil gas—A new approach to short/immediate earthquake prediction[J]. *Earthquake*, 35(4):1–10(in Chinese with English abstract).
- Ciotoli G, Lombarsi S, Annunziatellis A. 2007. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy[J]. *Journal Geophysical Research*, 112, B5:5407.
- Du Letian. 2008. The exhausting of the earth[J]. *China Population, Resources and Environment*, 18(S):694–599(in Chinese with English abstract).
- Du Jianguo, Wang Xianbin, Xie Hongsen. 1994. Mantle degassing—A Gasgeochemical feature of deep Earth matter movement[J]. *Advance in Earth Sciences*, 9(3):48–52(in Chinese with English abstract).
- Du Jianguo, Yu Wenxin, Li Shengqiang, Jian Chunlin, Zhu Ziqiang. 1998. The geochemical characteristics of escaped radon from the Babaoshan fault zone and its earthquake reflecting effect[J]. *Earthquake*, 18(2):155–162(in Chinese with English abstract).

- Fu Chingchou, Yang Tsanyao Frank, Jane Du, Viecek Walia, Chen Yuegau, Liu Tsungkwei, Chen Chenghong. 2008. Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in southern Taiwan[J]. *Radiation Measurements*, 43(S1):S348–S352.
- Han Xiaokun, Li Ying, Du Jianguo, Zhou Xiaocheng, Li Xiaoqiang. 2013. Geochemical characteristics of soil gas in the central south segment of Xiadian Fault[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(6):976–982(in Chinese with English abstract).
- He Chaofeng, Chen Zhoufeng, Qi Xin, Wang Qiuliang, LinYazhou. 2016. Study on soil radon features and activity analysis of the Macheng–Tuanfeng fault[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 36(6):504–512(in Chinese with English abstract).
- He Genqiqo, Zhang Bi'ao, Miao Yuanmo. 1989. Discussion of the microgas distribution and recent activity of Aerjin Fault[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 11(1):16–20(in Chinese with English abstract).
- He Wengui, Yuan Daoyang, Wang Aiguo, Liang Mingjian, Zheng Wenjun. 2010. The recent active characteristics of the Middle Segment of Jiayuguan Fault[J]. *Earthquake Research in China*, 26(3):296–303(in Chinese with English abstract).
- Le Renchang, JiaWenyi, He Zhijie. 2006. An experimental study on long distancemigration of radon in the air[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 33(5):536–540(in Chinese with English abstract).
- Liu Jinghua, Wang Zhuwen. 2009. Numerical simulation of the soil radon concentration distribution in the overburden above active faults[J]. *Progress in Geophysics*, 24(2):644–650(in Chinese with English abstract).
- Liu Xueling, Ma Jianying, Yang Xulian, Ren Feng, Li Yibin. 2011. Validity study of fault gas detection method in detecting deep buried active faults[J]. *Earthquake*, 31(1):67–84(in Chinese with English abstract).
- Meng Guangkui, He Kaimin, Ban Tie, Jiao Decheng. 1997. Study on activity and segmentation of active fault using measurements of radon and mercury gases[J]. *Earthquake Research in China*, 13(1):43–51(in Chinese with English abstract).
- Scholz, Christopher H. 2002. *The Mechanics of Earthquake and Faulting*[M]. 2nd ed..Cambridge: Cambridge University Press, 504.
- Su Hejun, Zhang Hui, Li Chenhua, Wu Jianbo, Zhou Huiling. 2016. Geochemical features of fault gas on Northern margin fault of Xiqinling and its seismic hazard analysis[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(3):671–676(in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaolong, Wang Guangcai, Shao Zhigang, Si Xueyun. 2016. Geochemical characteristics of emergent gas and groundwater in Haiyuan fault zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 233(3):140–150(in Chinese with English abstract).
- Toutain J P, Baubron J C. 1999. Gas geochemistry and seismotectonics:a review[J]. *Tectonophysics*, 304(2/1):1–27.
- Viecek Walia, Su T C, Fu C C, Yang T F. 2005. Spatial variations of radon and helium concentrations in soil– gas across the Shan–Chiao fault, Northern Taiwan[J]. *Radiation Measurements*, 40(2/6):513–516.
- Wang Jiang, Li Ying, Chen Zhi. 2017. Gas geochemistry and activity of the Kouquan fault in Shanxi Province[J]. *Earthquake*, 37(1):39–51(in Chinese with English abstract).
- Wang XiLong, Li ying, Du Jianguo, Chen Zhi, Zhou Xiaocheng, Li Xinyan, Cui Yuejun, Wang Haiyan, Zhang Zhihong. 2017. Geochemical characteristics of soil gases Rn, Hg and CO₂ and their genesis in the capital area of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 39(1):85–101(in Chinese with English abstract).
- Wu Huishan, Bai Yunshan, LinYufei, et al. 1997. The action of relay transmission of the radon migraton[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 40(1):136–142(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianbo, Zhang Hui, Su Hejun. 2014. Numerical simulation for migration rule of fault gas radon in different overburden[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 36(1):118–128(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, GuoTingting, Liu Shaozhuo, Yu Guihua, Chen Guihua, Wu Xiyan. 2016. Discussion on issues associated with setback distance from active fault[J]. *Seismology and Geology*, 38(3):477–502(in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Zhao Boming, Ma Shengli. 2011. *Method and Application of Active Fault Earthquake Disaster Prediction*[M]. Beijing: Science Press. 305(in Chinese with English abstract).
- Xu Yongchang, Shen Ping, Liu Wenhui. 1996. Volatile natural gas geochemistry of mantle– derived in eastern Oil and Gas area – II Volatile in the mantle helium, argon and carbon compounds[J]. *Science in China(Series D)*, 26(2):187–192(in Chinese).
- Yan Xianchen, Zhang Zeng, Wang Changling. 1987. Characteristics of gas components in the overlying soil on active faults[J]. *Earthquake Research in China*, 1987, 3(4):52–60(in Chinese).
- Yang T F, Chou C Y, Chen C H, Chyi L L, Jiang J H. 2003. Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan[J]. *Radiation Measurements*, 36(1/6):425–429.
- Zhang Hui, Zhang Xinji, Su Hejun, Liu Xuzhou. 2010. Field test on the geochemical features of radon and mercury from soil gas on the active faults in Lanzhou[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 23(3):273–278(in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, MA Jing, Gan Weijun, Min Wei, Mao Fengying, Wang Qi. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China(D)*, 46(S2):13–24(in Chinese).
- Zhang Hui, Su Hejun, Li Chenhua. 2013. Field test on the geochemical detection of concealed fault In Hezuocity[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 35(3):618–624(in Chinese with English abstract).

Zhu Jinfang, Huang Zonglin, Xu Xiwei, Zheng Rongzhang, Fang Shengming, Bai Denghai, Wang Guangcai, Minwei, Wen Xueze, Han Zhujun. 2005. Active faults exploration and seismic hazard assessment in Fuzhou City[J]. Earthquake Research in China, 21(1): 1-16(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 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[J]. 地震, 35(4):1-10.
- 杜建国, 王先彬, 谢鸿森. 1994. 深部物质运动的气体地球化学特征[J]. 地球科学进展, 9(3):48-52.
- 杜建国, 宇文欣, 李圣强, 简春林, 朱自强. 1998. 八宝山断裂带逸出氢的地球化学特征及其映震效能[J]. 地震, 18(2):155-162.
- 杜乐天. 2008. 地球排气作用[J]. 中国人口·资源与环境, 18(S): 594-599.
- 韩晓昆, 李营, 杜建国, 周晓成, 李小强. 2013. 夏垫断裂中东南段土壤气地球化学特征[J]. 物探与化探, 37(6):976-982.
- 何超枫, 陈州丰, 齐信, 王秋良, 林亚洲. 2016. 麻城-团风断裂带土壤氦特征及活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 36(6):504-512.
- 何跟巧, 张必敖, 缪元模. 1989. 阿尔金断裂微量气体分布与断层现今活动性讨论[J]. 西北地震学报, 11(1):16-20.
- 何文贵, 袁道阳, 王爱国, 梁明剑, 刘兴旺, 郑文俊. 2010. 嘉峪关断层中段的新活动特征[J]. 中国地震, 26(3):296-303.
- 乐仁昌, 贾文懿, 何志杰. 2006. 氦在空气中长距离试验研究[J]. 成都理工大学学报, 33(5):536-540.
- 刘菁华, 王祝文. 2009. 活断上层覆盖层中土壤氦浓度分布的数值模拟[J]. 地球物理学进展, 24(2):644-650.
- 刘学领, 马建英, 杨绪连, 任峰, 李一兵. 2011. 断层气探测方法在隐伏活动断层探测中的有效性研究[J]. 地震, 31(1):67-84.
- 孟广魁, 何开明, 班铁, 焦德成. 1997. 氦、汞测量用于断裂活动和分段的研究[J]. 中国地震, 13(1):43-51.
- 苏鹤军, 张慧, 李晨桦, 伍剑波, 周慧玲. 2013. 秦岭北缘断裂带断层气浓度空间分布特征与强震危险性分析[J]. 地震工程学报, 35(3):671-676.
- 孙凯男, 郭秋菊, 程建平. 2005. 土壤物理性质对土壤氦浓度及地表析出率的影响[J]. 中华放射医学及防护杂志, 25(1):78-80.
- 孙小龙, 王广才, 邵志刚, 司学芸. 2016. 海源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.
- 王江, 李营, 陈志. 2017. 口泉断裂断层气地球化学变化特征及断层活动性[J]. 地震, 37(1):39-51.
- 王喜龙, 李营, 杜建国, 陈志, 周晓成, 李新艳, 崔月菊, 王海燕, 张志宏. 2017. 首都圈地区土壤气Rn, Hg, CO₂地球化学特征及其成因[J]. 地震学报, 39(1):85-101.
- 吴慧山, 白云山, 林玉飞, 常桂兰. 1997. 氢迁移的接力传递作用[J]. 地球物理学报, 40(1):136-142.
- 伍剑波, 张慧, 苏鹤军. 2014. 断层气氦在不同类型覆盖层中迁移规律的数值模拟[J]. 地震学报, 36(1):118-128.
- 徐锡伟, 郭婷婷, 刘少卓等, 于贵华, 陈桂华, 吴熙彦. 2016. 活动断层避让相关问题的讨论[J]. 地震地质, 48(3):477-502.
- 徐锡伟, 赵伯明, 马胜利等. 2011. 活动断层地质灾害预测方法及应用[M]. 北京:科学出版社, 305.
- 徐永昌, 沈平, 刘文慧, 陶明信. 1996. 东部油气区天然气中幔源挥发分的地球化学-II, 幔源挥发份中的氦、氩级碳化合物[J]. 中国科学(D辑), 26(2):187-192.
- 阎贤臣, 张增, 王长岭. 1987. 断上层覆盖土壤中气体成份特征[J]. 中国地震, 1987, 34(4):52-60.
- 张慧, 苏鹤军, 李晨桦. 2013. 合作市隐伏断层控制性地球化学探测场地试验[J]. 地震工程学报[J], 35(3):618-624.
- 张慧, 张新基, 苏鹤军, 刘旭宙. 2010. 兰州市活动断层土壤气汞、氦地球化, 学特征场地试验[J]. 西北地震学报, 32(3):273-278.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琦. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学, 33(S):12-20.
- 张炜, 罗光伟, 邢玉安, 魏家珍. 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.
- 周晓成, 柴焱章, 雷启云, 司学芸, 王传远. 2013. 银川隐伏断层带中H₂的地球化学特征[J]. 物探与化探, 37(1):147-149.
- 朱金芳, 黄宗林, 徐锡伟, 郑荣章, 方盛明, 白登海, 王广才, 闵伟, 闻学泽, 韩竹军. 2005. 福州市活断层探测与地震危险性评价[J]. 中国地震, 21(1):1-16.