

地震流体地球化学应用研究概述

盛艳蕊, 杨歧焱, 张子广

河北省地震局, 石家庄 050021

摘 要:综述了近几年国内外有关流体地球化学异常与地震活动、土壤气监测断裂构造活动与火山喷发以及深部流体地球化学研究方面的成果。多项研究表明,地下气体的映震能力较高,研究断层土壤气地球化学特征随时间的变化,可进一步研究地震动力学特征,从而为震情判定提供依据。因此加强断层土壤气测量来监测断裂活动,是探索地震前兆与地震预测的重要途径,是今后地震地下流体的研究方向。深部流体是地球各大圈层相互作用中最活跃因素,对地球深部构造活动起重要作用,可为地震预报提供有力依据。因此对其地球化学特征及运移机制的研究应给予充分重视。

关 键 词:地震;流体;地球化学;土壤气

中图分类号:P315.72 文章编号:1007-2802(2015)04-0837-06 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2015.04.019

A Review on Applications of Seismic-Fluid Geochemistry

SHENG Yan-rui, YANG Qi-yan, ZHANG Zi-guang

Hebei Seismological Bureau, Shijiazhuang 050021, China

Abstract: The paper reviewed the application advances of fluid geochemistry in monitoring earthquake and in detecting fault activities, volcano eruption and deep-earth fluid processes. It had been shown that emission of underground gases are effective indicators for earthquake and for understanding the earthquake fault geodynamic characteristics and the relationship between seismic activity and fault gas, and that soil gas geochemistry methods were used to investigate the surface rupture and the concentrations of Rn and Hg in fault zones. It is an important approach to measure soil gas in the fault zone for monitoring fault activities and finding earthquake precursors and new methods for earthquake prediction, and it is the direction for studying seismic geochemistry of underground fluid in the future. The deep fluid is the most active factor in interactions between the earth's spheres, more attention should be paid in its geochemical characteristics and migration mechanism and this will provide basis for earthquake prediction.

Key words: earthquake; fluid; geochemistry; soil gas

地壳的孔隙和裂隙充满了流体,包括地壳浅层流体、深部流体和超临界流体(车用太等,2006)。流体对地壳应力变化极为敏感,地球内部流体由于受应力应变的制约及周围环境相互作用,处于一种动态平衡状态,孕震过程中产生地壳变形(如裂隙、断层错动等),将破坏这种动态平衡,使得地下深部的流体沿破裂面迅速运移,造成其地球化学变化(Bernard,2001;罗灼礼等,2002;King,2006)。地震前兆模式裂隙串通理论认为,在地震孕育过程中,由于受到构造应力的作用,地壳岩石中随机存在分布的各种微裂隙,在作用力方向上数量不断增加,

规模不断增大,形成微裂隙密集带串通成破裂带,利于岩石破裂释放气体以及深部气体向上迁移(Mjachkin *et al.*,1975)。Du等(2007)提出孕震体和地球化学地震前兆异常模型,认为地球深部流体迁移是地震前地球化学异常的重要机理之一,与地震有关的流体化学异常可以归因于液体混合的牵引过程以及地壳应力变化引起的流体-岩石相互作用。由此可见,流体地球化学异常可以很好地反映地震活动以及地球深部的运动。

本文在以往综述的基础上,总结近几年来国内外学者在地下流体(地壳浅层和深部流体)地球化

收稿日期:2014-08-22 收到,2014-09-16 改回

基金项目:河北省地震科技星火计划项目(201308)

第一作者简介:盛艳蕊(1983-),女,工程师,硕士,研究方向:地震地下流体. E-mail: shengyr2007@sian.com.

学特征与地震活动以及土壤气在活断层(或隐伏断层)探测、余震震情判定和火山区的应用方面取得的成果,寻找目前地震流体地球化学研究的热点,探索地震前兆与地震预测的方法,提出地震流体地球化学研究今后可能的工作方向。

1 流体地球化学异常与地震活动

地震活动与地壳深部物质运动、地壳应力有关,地震孕育过程中,受岩石挤压等作用,地下流体沿断裂逸出,形成地震前兆异常(杜建国和康春丽,2000;Ramola *et al.*,2008;Dipak Ghosh *et al.*,2009)。地下流体观测到的典型的地球化学异常,有气态组分(H_2 、He、 CO_2 、 CH_4 等)、Rn、Hg以及Na、Ca、Mg、Cl等浓度异常,这些异常通常发生在地震前一天至几个月(Quattrocchi *et al.*,2000;Planinic *et al.*,2001;Mazek *et al.*,2002;晏锐等,2004;Yang *et al.*,2005;刘锦等,2010)。

地下流体地球化学异常十分显著时,不需要数据处理,由原始动态曲线直接识别出(车用太等,2006)。Virk等(2001)发现1999年印度Chamoli 6.5级地震前5天He出现异常,早于氡异常3天,表明He受应变积累的影响优于Rn,地震前9天He/Rn值出现突升突降异常,认为该异常为地震前兆的可靠信号。Yang等(2005)应用台湾西南地区的活动断裂带土壤气观测数据,对监测点附近30个 $M_L \geq 4.5$ 地震进行异常识别,发现有26个地震震前1~20天出现了氡和钍的异常高值点,而且氡气同位素的比率与氡和钍的变化呈现了很好的相关性;认为地震前由于地应力的变化,引起岩石微破裂,氡和钍被载气(CO_2 和 CH_4 等)从地壳深部携带到地表,使其浓度发生变化,出现震前异常。Du等(2006)发现2007年云南普洱M6.4地震前1天至3个月,距离震中180~440 km范围出现13项化学异常,异常点多位于腾冲子块体(隶属川滇块体)的北东向断层附近,但震中附近100 km范围内的观测点未出现明显异常,可能与复杂的地质条件有关。

地下流体有些异常隐含在正常动态中,异常不显著,很难直观识别,需要进行数学方法处理,常用的异常识别方法有差分法、响应比法、变差法等(车用太等,2006)。Biagi等(2000)收集俄罗斯南部堪察加半岛(强震活跃区)的5口观测深井的离子观测数据,首先平滑滤波去掉由于观测错误引起的高频波动,对过去10年发生在井孔周围250 km范围内5个 $M > 6.5$ 地震,应用3倍均方差,提取出3个地震之前的异常变化。Janja等(2010)利用2倍均

方差及梯度两种方法分析气氡浓度变化,发现2004年11月24日意大利NE地区的 $M_L 5.1$ 级地震前3周出现明显异常。

2 土壤气与断裂构造活动

断裂带是地球放气的窗口之一,因此,在断裂带附近监测土壤气浓度变化,是探索地球内部活动的重要途径之一。土壤气测量以测量跨断层土壤气体多组分为主,断裂带地下水化学成分、水溶气、同位素观测为辅,研究断裂带地球化学特征,具有方便、快捷、高效和低成本等特点,近年来在世界范围内广泛应用(任明甫,2000;Guerra and Lombardi,2001;Du *et al.*,2007;Erees *et al.*,2007;Vivek *et al.*,2008;Lombardi and Voltattorni,2010)。

2.1 利用土壤气监测断裂活动

在断裂带附近进行断层土壤气浓度测量,可以监测断裂带活动及附近地区的地震危险性。Vivek等(2008)运用电离室和ASM 100HDS测土壤气氡和氦的浓度来研究印度Dhramsala地区北西喜马拉雅新构造断层附近的土壤气的变化,在主要断层的剖面(MBT-2)发现土壤气中的氡和氦的水平升高,氡和氦的异常表明该断层的显著活动。Guerra和Lombardi(2001)在意大利西南部Pisticce进行土壤气He、 CO_2 和 ^{222}Rn 观测,研究土壤气分布和断层的关系,结果表明土壤气的空间分布特征与构造类型有关,土壤气的逸出量取决于地震活动水平。李营等(2009)发现延怀盆地土壤气Rn、Hg、He和 CO_2 地球化学背景场在空间上呈现东部高、西部低(以延怀盆地北缘断裂为界)的特征,与延怀盆地东部地震构造活动较强相对应。Walia等(2010)2010年在台湾南部的Hsinhua断裂附近收集110个样本研究Rn、He、 CO_2 和 N_2 的地球化学特征,通过土壤气变化确定Hsinhua断裂和构造特征。

2.2 利用土壤气探测活断层

深部气体沿裂隙、破碎带和断层等上涌,在地表附近可以观测到来自地壳深部的气体,因此,土壤气在活断层及隐伏断层探测中得到广泛应用。土壤气中氡、汞浓度测量在活断层探测研究方面是极为有效的,其异常分布与断层位置有很好的对应关系(汪成民等,1991;王基华等,1994;程鉴基,1997;魏柏林等,1998)。大量研究实验表明,隐伏断层的位置可以由断层土壤气浓度测量确定(张炜等,1988;阎贤臣等,1987;汪成民等,1989;朱自强等,1990)。张新基等(2005)运用断层气测量方法进行野外现场勘测,分析测线上Rn、Hg的变化特

征及断层可能的位置,确定了断层的走向。周晓成等(2007)根据呼和浩特地区隐伏断层土壤气中 Rn、Hg 的浓度,在 8 条测线上进行了土壤气中 Rn、Hg 浓度野外现场测量,在 8 个地球化学剖面中有 7 个在断层带上发现了异常,其土壤气 Rn、Hg 异常强度一般是背景值的 1.7~10.3 倍。根据断层带上土壤气氦、汞异常特征确定了断层的具体位置,说明土壤气氦、汞测量在隐伏断层探测中是非常有效的。Lombardi 等(2010)选取意大利的不同地震地质背景的两个地区(老震区和无震区)进行土壤气对比观测,探索地震前后沿裂隙和断层面上油气运移机制,研究表明,土壤气体地球化学可以应用于定位构造的不连续性(甚至“盲断层”地表有松散沉积物时)。张慧等(2010)在兰州市主要活动断层上开展断裂带土壤气试验研究,结果显示断层带上方土壤气 Rn、Hg 具有明显的峰值异常,其异常的形态特征对断层产状和断层性质有显著的反映,覆盖层厚度对断层带土壤 Rn、Hg 浓度的峰值形态及特征具有显著的影响。Mohamed 和 Ahmad(2010)在叙利亚的 Afamia B 大坝水库渗水区布设 82 个土壤气氦采样点,测值高于正常背景值 2~5 倍的异常,在破裂区气氦达到最高值,由此发现了两条隐伏断层 F₁ 和 F₂,根据地下水流动的方向,表明 F₂ 是一个破碎区,大坝渗漏的水沿着 F₂ 断裂走向垂直向下渗透。

2.3 利用土壤气判定余震震情

地震的发生是岩石破裂、释放能量的过程,地震前后震区应力场改变,使得区域内土壤气地球化学特征改变,这对研究余震震情有重要参考意义。林元武等(1998)通过张北—尚义 6.2 级地震现场 CO₂ 动态特征和怀来后郝窑断层气 CO₂ 震后动态特征,对震后趋势做出了准确的判断。2008 年 12 月至 2009 年 6 月,Zhou 等(2010)在汶川地震破裂区,跨龙门山断裂布设 8 个剖面测量 He、H₂、CO₂、Rn、Hg 等气体浓度,结果显示,He 和 H₂ 浓度随余震的减少浓度降低,CO₂、Rn 和 Hg 的浓度在断裂的南段和北段明显不同,认为断层土壤气浓度的变化与该区余震活动及构造应力变化有关。刘雷等(2012)在玉树地震后进行了断层土壤气 Rn 以及 CO₂ 等地球化学连续观测,发现震后断层带 CO₂ 和气 Rn 浓度增加,表明地震前后断层的活动性增强,改变了区域内原有的应力场水平,导致了深部流体沿着地震断裂运移到地壳浅部。利用断层土壤气研究地震前后气体地球化学特征随时间的变化,从而进一步研究地震动力学特征,为余震震情判定提

供依据。

3 流体地球化学在火山区中的应用

火山区土壤气中气体通量增加与地震活动增强有较好的关系(Baubron *et al.*, 2002),因此,利用土壤气浓度变化来估计火山区的气体排放量,判断火山及地震构造活动是否活跃(Giammanco *et al.*, 2010),该方法可行的。菲律宾中部塔奥火山,从对土壤气 Rn 的连续监测表明,1994 年离火山 48 km 的地方发生 Ms7.1 级地震,地震前 22 天土壤气 Rn 明显增加,异常幅度是正常背景值的 6 倍(Richon *et al.*, 2003)。意大利 Stromboli 火山 2007 年爆发前不久,土壤气中 CO₂ 通量大幅度增加,³He/⁴He 值也大幅增加(Rizzo *et al.*, 2009),岩浆的喷发速率与土壤气 Rn 的脱气速率呈正相关,这意味着岩浆气体运移可能与触发地震的火山活动一定联系(Cigolini *et al.*, 2007)。高清武和李霓(1999)通过研究腾冲和五大连池火山流体的地球化学特征,发现两个火山区的气体化学组成均以 CO₂ 高值为特点,但腾冲火山区地热流体中 H₂ 和 CH₄ 含量较高,气体化学组成具有分区性特点,这表明两个火山区流体状态化学组成的差异与两个火山群的成因及所处大地构造环境有关。琼北火山区地下流体地球化学调查结果显示,马鞍岭火山附近较大范围内深层地下水仍有一定强度的深源 CO₂ 释放活动,火山口附近地下水的 Na 含量也相对偏高,应继续关注(上官志冠等,2003)。

4 深部流体地球化学研究

深部流体主要包括地幔流体和深部地壳流体(金之钧等,2002),其运移和释放对地壳稳定有很大影响,在地震的孕育和发生过程中起重要作用,因此,研究地球深部流体在震源介质中的地球化学行为,可以为探索地球深部流体在孕震过程中的作用提供依据(杜建国和康春丽,2000;罗立强等,2004;曾令森等,2005)。

中国大陆科学钻探(CCS D)利用现代深部钻探高新技术,实施中国第一口 5000 m 科学深钻,揭示板块边部的深部物质组成及成矿与流体作用,为开展深部流体地球化学研究提供了珍贵的样品,为研究地下流体在地震孕育中的作用和探索前兆异常成因构建平台。罗立强等(2004)通过日均值浓度分析、差分分析以及最大相关系数分析,发现 CCS D 主孔周围 500 km 范围内震级 M_L ≥ 4.0 地震前后,地下流体某些组分会出现异常波动。2004 年苏门

答腊 9.3 级地震前 1.5 h,CCSD 在线流体地球化学监测到流体组分从基本上不含 Ar、He 及 N₂ 突跳到富含 Ar、亏损 He 和 N₂ 的气体地球化学异常,推测该地震产生的面波在 CCSD 现场激发的动态效应,导致库仑应力失稳,增加了深部岩石或破裂带的渗透率,产生 CCSD 观测到的气体异常(曾令森等,2005)。孙青等(2004)在大陆钻孔的泥浆中发现 He 含量以及 N₂、Ar 地球化学异常,认为在地震构造活动和深部岩浆作用下,深源气体沿破裂面、裂隙、破碎带和断层等,进入钻孔泥浆,形成异常。

研究深部流体的地球化学特征,为探索大断裂或断层等深部地震构造活动具有重要意义,是目前国内外努力探索的地震预测方法之一。深钻流体地球化学监测发现,气体中 He、Ar、N₂、Rn、Hg 的浓度有许多前兆和同震异常(Matsuda *et al.*, 2004)。汶川地震破裂带深钻气体测量表明,气体异常一般在余震前数天出现,并在震后持续多天,不同气体组分所呈现的异常规律不同,且异常数量随着震中距的增加而明显减少,并表明地壳流体的活动与地震活动实际上是伴生关系(温静,2010)。Italiano 等(2012)研究 2012 年意大利 Po Valley 南部发生的地震序时深部流体的作用,结果表明深部流体在地震孕育过程中沿断层和裂缝到达地表,产生显著地球化学异常。在圣安德烈斯断裂深钻 2117~3196 m 处,³He/⁴He 值为 0.35~0.46,在 3194~3301 m 处,³He/⁴He 值在 0.22~0.88 范围内变化,³He/⁴He 值随深度不断增大,表明有来自地幔连续的流体供给(Wiersberg and Erzinger,2006,2011),为探索断裂深部活动和地震预测提供依据。

5 小结及讨论

(1)近几年,由于地下水开采等影响,定点观测的地下流体化学观测受到明显干扰,严重影响地震前兆异常的可靠性。如处于地热异常区的河北后郝窑井,属于前兆灵敏观测井,但 2007 年以来附近地热资源的大力开发,使其观测资料预报效能降低,因此需要新的观测技术来解决地震预报面临的这个问题。研究表明,地下气体的映震能力较高,深部气体受构造地块不均匀挤压沿断裂带迁移至地表,造成断层附近气 Rn、Hg、H₂ 气等气体浓度的变化,分析地震前后断裂带土壤气浓度变化特征,可以进一步研究地震动力学特征,因此,加强断层土壤气测量来监测断裂活动,是探索地震前兆与地震预测的重要方法,是今后地震地下流体的工作方向。

(2)土壤气的空间分布特征与构造类型有关,土壤中的气体浓度的异常分布与断层的走向一致的,可见土壤气地球化学特征是判别断层位置的有效参数。土壤气异常的形态特征对断层产状和断层性质有显著的反映,根据断层带上土壤气异常特征可以确定断层的具体位置,表明土壤气测量是隐伏断层探测的有效手段,地下流体地球化学在活断层和隐伏断层探测以及地震危险区的划分方面的应用推广值得研究。

(3)火山区流体状态化学组成的差异与火山的成因及所处地区构造环境有关,火山区土壤气的通量变化与地震活动增强有较好的对应关系,利用气体地球化学监测火山地区的脱气及火山区地震活动,是判别火山是否活动的有效手段之一。

(4)深部流体是地球各大圈层相互作用的最活跃因素,对地球深部构造活动起重要作用,在地震孕育和发生过程中,深源气体沿破裂面、裂隙、破碎带和断层等向地表迁移,在地表附近可以监测到地下流体某些组分的异常变化,今后工作应关注深部流体地球化学特征及运移机制的研究,为探索地震预报提供有力依据。

致谢:感谢中国地震局地震预测研究所杜建国研究员在文章编写中提供指导。

参考文献 (References):

- Baubron J C, Rigo A, Toutain J P. 2002. Soil gas profiles as a tool to characterize active tectonic areas: The Jaut Pass example (Pyrenees France). *Earth Planetary Science Letter*, 196: 69-81
- Bernard P. 2001. From the search of precursors to the research on crustal transients. *Tectonophysics*, 338: 225-232
- Biagi P F, Ermini A, Kingsley S P, Khatkevich Y M, Gordeev E I. 2000. Groundwater Ion Content Precursors of Strong Earthquakes in Kamchatka Russia. *Pure Apply Geophysics*, 157: 1359-1377
- Cigolini C, Laiolo M, Coppola D. 2007. Earthquake volcano interactions detected from radon degassing at Stromboli (Italy). *Earth Planetary Science Letter*, 257(3-4): 511-525
- Dipak G, Argha D, Rosalima S. 2009. Anomalous radon emission as precursor of earthquake. *Journal of Applied Geophysics*, 69: 67-81
- Du J G, Si X Y, Chen Y X, Fu H, Jian C L, Guo W S. 2008. Geochemical anomalies connected with great earthquakes in China. *Geochemistry Research Advances*. *Geochemistry Research Advances*: 1-37
- Du J, Cheng W, Zhang y, Jian C, Guan Y, Zhou X. 2006. Helium and Carbon Isotopic Compositions of Thermal Springs in Earthquake Zone of Sichuan, Southwestern China. *Journal of Asia Earth Science*, 26: 533-539
- Du J, Zhang Y, Li H. 2007. Advances in studies of thermal-fluid geo-

- chemistry and hydrothermal resource in China. In: Ueckermann, H. I(ed.). *Geothermal Energy Research Trends*, New York: Nova Science Publishers, Inc., 51-88
- Erees F S, Aytas S, Sac M M, Yener G, Salk M. 2007. Radon concentrations in thermal waters related to seismic events along faults in the Denizli Basin, Western Turkey. *Radiation Measurements*, 42: 80-86
- Giammanco S, Bellotti F, Gropelli G, Pinton A. 2010. Statistical analysis reveals spatial and temporal anomalies of soil CO₂ efflux on Mount Etna volcano (Italy). *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 194(1-3): 1-14
- Guerra M, Lombardi S. 2001. Soil-gas method for tracing neotectonic faults in clay basins; The Pisticci field (Southern Italy). *Tectonophysics*, 339: 511-522
- Italiano F, Liotta M, Martelli M, Martinelli G, Petrini R, Riggio A, Rizzo A L, Slejko F, Stenni B. 2012. Geochemical features and effects on deep-seated fluids during the May-June 2012 southern Po Valley seismic sequence. *Annals of Geophysics*, 55(4): 815-821
- Janja V, Anna R, Marco S, Boris Z, Ivan K. 2010. A radon anomaly in soil gas at Cazzaso, NE Italy, as a precursor of an M_L = 5.1 earthquake. *Nukleonika*, 55(4): 507-511
- King C Y, Zhang W, Zhang Z. 2006. Earthquake-induced groundwater and gas changes. *Pure Apply Geophys*, 163: 633-645
- Lombardi S, Voltattorni N. 2010. Rn, He and CO₂ soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults. *Applied Geochemistry*, 25: 1206-1220
- Matsuda T, Omura K, Ikeda R, Arai T, Kobayashi K, Shimada K, Tanaka H, Tomita T, Hirano S. 2004. Fracture zone conditions on a recently active fault: Insights from mineralogical and geochemical analyses of the Hirabayashi NIED drill core on the Nojima fault, southwest Japan, which ruptured in the 1995 Kobe earthquake. *Tectonophysics*, 378(3-4): 143-163
- Mazek B, Italiano F, Zivcic M, Zivcic M, Vaupotic J, Kobal I, Martinelli G. 2002. Geochemical monitoring of thermal waters in Slovenia. relationships to seismic activity. *Applied Radiation and Isotopes*, 57: 919-930
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A. 1975. Two models for earthquake forerunners. *Pure Apply Geophysics*, 113(1): 169-181
- Mohamed A H, Ahmad A A. 2010. The role of soil gas radon survey in exploring unknown subsurface faults at Afamia B dam, Syria. *Radiation Isotopes*, 1-6
- Planinic J, Radolic V, Lazanin Z. 2001. Temporal variations of radon in soil related to earthquakes. *Apply Radiation Isotopes*, 55: 267-272
- Quattrocchi F, Pik R, Pizzino L, Guerra M, Scarlato P, Angelone M, Barbieri M, Conti A, Marty B, Sacchi E, Zuppi G M, Lombardi S. 2000. Geochemical changes at the Bagni di Triponzo thermal spring during the Umbria-Marche 1997-1998 seismic sequence. *Journal of Seismology*, (4): 567-587
- Ramola R C, Prasad Y, Prasad G, Kumar S, Choubey V M. 2008. Soil-gas radon as seismotectonic indicator in Garhwal Himalaya. *Applied Radiation and Isotopes*, 66: 1523-153
- Richon P, Sabroux J C, Halbwachs M, Vandemeulebrouck J, Poussielgue N, Jtabbagh, Punongbayan R. 2003. Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994). *Geophysical Research Letters*, 30(9): 1481, doi: 10.1029/2003GL016902, 2003
- Rizzo A, Grassa F, Inguaggiato S, Liotta M, Longo M, Madonia P, Brusca L, Capasso G, Morici S, Rouwet D, Vita F. 2009. Geochemical evaluation of observed changes in volcanic activity during the 2007 eruption at Stromboli (Italy). *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 182(3-4): 246-254
- Virk H S, Walia V. 2001. Helium/radon precursory signals of Chamoli Earthquake. *India Radiation Measurements*, 34: 379-384
- Vivek Walia, Sandeep Mahajan, Arvind Kumar, Surinder Singh, Bikramjit Singh Bajwa, Sunil Dhar, Tsanyao Frank Yang. 2008. Fault delineation study using soil-gas method in the Dharamsala area, NW Himalayas, India. *Radiation Measurements*, 43: S337-S342
- Walia V, S J Lin, C C Fu, T F Yang, Li W H, Liang K W, Chen C H. 2010. Soil-gas monitoring: A tool for fault delineation studies along Hsinhua Fault (Tainan), Southern Taiwan. *Applied Geochemistry*, doi: 10.1016/j.apgeochem.2010.01.017
- Wiersberg T, Erzinger J. 2006. A helium isotope cross-section study through the San Andreas Fault at seismogenic depths. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 007, 8: Q01002, doi: 10.1029/2006GC001888.
- Wiersberg T, Erzinger J. 2011. Chemical and isotope compositions of drilling mud gas from the San andreas fault observatory at depth (SAFOD) boreholes; Implications on gas migration and the permeability structure of the San Andreas fault. *Chemistry Geology*, 284(1-2): 148-159
- Yang T F, Walia V, Chyi L L, Fu C C, Chen C H, Liu T K, Song S R, Lee C Y, Lee M. 2005. Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan. *Radiation Measurements*, 40: 496-502
- Zhou X C, Du J G, Chen Z, Cheng J W et al. 2010. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan Ms 8.0 earthquake, southwestern China. *Geochemical Transactions*, 11: 5
- 车用太, 鱼金子等. 2006. 地震地下流体力学. 北京: 气象出版社
- 程鉴基. 1997. 采断层气异常与活断层关系浅析. 地壳形变与地震, 17(2): 97-100
- 杜建国, 康春丽. 2000. 地震地下流体发展概述. 地震, 20(增刊): 107-114
- 杜建国, 康春丽. 2000. 强地震前兆异常特征与深部流体作用探讨. 地震, 20(3): 95-101
- 高清武, 李霓. 1999. 腾冲和五大连池火山区流体地球化学特征及成因探讨. 地质论评. 45(4): 345-351
- 金之钧, 杨雷, 曾溅辉, 张刘平. 2002. 东营凹陷深部流体活动及其生烃效应初探. 石油勘探与开发. 29(2): 42-44
- 李营, 杜建国, 王富宽, 周晓成, 盘晓东, 魏汝庆. 2009. 延怀盆地土壤气体地球化学特征. 地震学报, 31(1): 82-91
- 林元武, 刘五洲, 王基华, 车用太. 1998. 张北-尚义地震现场 CO₂ 测量与震后趋势判断. 地震地质, 20(2): 117-121
- 刘锦, 何萍, 陈贵美. 2010. 广东潮州井水化学地震前兆异常特征分析. 地震研究, 33(4): 288-293
- 刘雷, 杜建国, 周晓成, 李营, 谢超, 崔月菊. 2012. 青海玉树 Ms7.1

- 地震震后断层流体地球化学连续观测.地球物理学进展, 27(3): 0888-0893
- 罗立强, 孙青, 詹秀春. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 0-2000 米流体剖面及流体地球化学研究. 岩石学报, 20(1): 185-191
- 罗灼礼, 郭大庆, 张天中, 杜建国. 2002. 实验场区地震预报新技术新方法. 北京:地震出版社
- 任明甫. 2000. 利用断层气(土气氦)探测琼北地区的断裂活动性. 华南地震, 20(4): 66-70
- 上官志冠, 高清武, 刘伟, 胡久常. 2003. 琼北火山区流体地球化学特征及近期火山喷发危险性评估. 地震地质, 25(增刊): 43-50
- 孙青, 罗立强, 詹秀春. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 0-2000 米的 N_2 、 A_r 和 H_2 . 流体地球化学. 岩石学报, 20(1): 179-184
- 汪成民, 李宜珊, 魏柏林. 1991. 断层气测量在地震科学中的应用. 北京:地震出版社
- 汪成民, 宇文欣, 周旭明, 殷积涛, 郭德明, 许学礼, 谷森林, 王庆师, 孙如波. 1989. 从断层气测量结果看德都地震. 中国地震, 5(2): 57-62
- 王基华, 王亮, 孙凤民, 金晓微. 1994. 隐伏断层性状的汞地球化学标志研究. 中国地震, 10(2): 112-122
- 魏柏林, 黄河生, 陈庞龙. 1998. 应用化探方法研究断层活动性及发震构造. 华南地震, 18(4): 50-58
- 温静. 2010. 汶川地震断裂带科学钻探地下流体气体组分异常与余震的关系研究. 北京:中国地质大学
- 阎贤臣, 张增, 王长岭. 1987. 活断上层覆土壤中气体成分特征. 中国地震, 3(4): 52-59
- 晏锐, 黄辅琼, 顾瑾平. 2004. 中国大陆 7 级强震前地下流体前兆时空特征. 地震, 24(1): 126-131
- 曾令森, 许志琴, 罗立强, 詹秀春, 梁风华, 杨经绥, 李海兵. 2005. CCSD 在线流体监测捕获的气体地球化学异常与 2004 年 9.3 级苏门答腊地震可能的超远程关系. 岩石学报, 21(2): 521-524
- 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. 西北地震学报, 32(3): 273-278
- 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. 中国地震, 4(2): 121-123
- 张新基, 张慧, 苏鹤军, 刘旭宙. 2005. 刘家堡活动断层土壤气氦、汞地球化学特征. 地震, 25(4): 88-92
- 周晓成, 郭文生, 杜建国, 王传远, 刘雷. 2007. 呼和浩特地区隐伏断层土壤气氦、汞地球化学特征. 地震, 27(1): 70-76
- 朱自强, 汪成民, 宇文欣, 简春林. 1990. 大同-阳高 6.1 级地震现场断层气测量结果的初步分析. 地震, 10(4): 75-80

(本文责任编辑:龚超颖)

·招聘信息·

博士后招聘信息:

1. 北京大学招聘高水平博士后研究人员, 详情请参阅: <http://www.postdoctor.org.cn/recruit.asp>.
2. 南京大学招聘高水平博士后研究人员, 详情请参阅: <http://rczp.nju.edu.cn/urp-portal/portal/group/Recruit>

硕/博士生招生信息:

1. 香港科技大学环境科学学科: <http://envs.ust.hk>
2. 大气/海洋环境科学理学硕士/博士/环境健康及安全理学硕士课程: <http://pg.ust.hk/>
3. 香港理学博士奖学金计划: <http://pg.ust.hk/hkpbs/>

教学/科研岗位招聘信息:

1. 北京大学地球科学与空间科学学院、城市与环境学院面向海内外公开招聘地质构造、地貌第四纪地质类教学/科研人员。详见: <http://hr.pku.edu.cn/bjdxrcjh/brjh/tzgg3/34908.htm>
2. 南京大学面向海内外诚聘地球物理学、地质学、地质资源与地质工程、水文学及水资源类副教授, 详见: <http://rczp.nju.edu.cn/urp-portal/portal/group/Recruit>
3. 中国科学技术大学面向海内外招聘研究员、副研究员和助理研究员。详情见: <http://employment.usc.edu.cn/cn/index-info.aspx?sign=103>
4. 吉林大学面向海内外招聘地下水科学与工程、环境科学、环境工程、水文学及水资源及其相关专业教学/科研人员。详见: <http://cer.jlu.edu.cn/cer/bencandy.php?fid=110&id=3155>
5. 中国石油大学(华东)面向海内外招聘教学/科研人员。详见: http://rsc.upc.edu.cn/article_show.asp?id=2286
6. 中国矿业大学面向海内外招聘教学/科研人员。详见: <http://pd.cumt.edu.cn/3e/68/c352a81512/page.htm>
7. 兰州大学面向海内外招聘教学/科研人员。详见: <http://ldrsc.lzu.edu.cn/lzupage/2015/03/18/N20150318111144.html>

其他招聘信息:

- 兰州大学招聘专职辅导员, 详情请参阅: <http://ldrsc.lzu.edu.cn/lzupage/2015/03/23/N20150323162016.html>

(杨志军 供稿)