

断层逸出气测量在活动断裂研究中的应用*

耿杰

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 从断层逸出气测量应用于活动断裂研究的工作原理、研究方法及技术思路入手, 对沂沭断裂带、海原 8.5 级地震断裂、鲜水河断裂带和山东平原地区活动断裂等的断层逸出气进行系统地分析、对比和研究, 探讨了断层逸出气与断层活动性和贯通性之间的关系, 及其在断层几何学研究和平原地区活断层探测中的应用等问题。结果表明: 断层逸出气 R_n , Hg 的含量和变化梯度可以作为评价断层活动性和贯通性的参考指标, 断层逸出气测量为断层几何学和运动学研究提供了一种快捷方便的探测方法, 是确定隐伏断层具体位置的有效手段之一。

关键词: 断层逸出气; 活动断裂; 断层活动性; 断层几何学; 平原地区

中图分类号: P315.724

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2020)04-0620-10

0 引言

地壳在应力作用下发生形变和破裂(郭增建, 秦保燕, 1979; 马瑾, 1987; Scholz, 1996; 马胜利, 马瑾, 2003), 产生地震和断裂(韩竹军等, 1996; 王彦斌等, 2000; 付碧宏, 王萍, 2009)。在这一过程中, 地壳内岩体、流体中伴随着能量的传递和物质的交换(汪成民, 李宣璐, 1991a), 地下流体的某些化学组分对此会有灵敏的反映(蔡祖煌, 1986; 张炜等, 1987; 李彤起等, 1990; 耿杰, 张昭栋, 1997), 并通过活动断裂在地表显示出来(朱宏任等, 1988; 赵振燊等, 2011), 被称为断层逸出气(汪成民等, 1991a)。断层逸出气为获取地壳深部信息(马弗良诺夫, 1981; 张炜等, 1988; 刘耀伟等, 1989)、确定断层空间分布(张慧等, 2010; 韩晓昆等, 2013)、研究断层活动特征和运动习性等提供了探测窗口(王华林等, 1991a; 孟广魁等, 1997)。

测量断层逸出气和深部溢出物质是地球化学勘探中用于寻找矿床、地热和油气资源的有效方法之一。20 世纪 80 年代至今, 为了寻求断层逸出气测量在地震科学和断层活动性研究中的可能性, 国内外学者相继在美国的圣安德烈斯断裂(King et

al, 1996)、日本的 Yamasaki 断裂(Wakita et al, 1980)、意大利的 Pernicana 断裂(Giammanco et al, 1998)和我国的阿尔金断裂带(张必敖等, 1987)、鲜水河断裂带(朱宏任等, 1988; 陈建民等, 1991)、海河隐伏断裂(邵永新, 2007)、海原断裂带(姜大庸, 阎贤臣, 1990)、玛曲断裂带(赵振燊等, 2011)、夏垫断裂(韩晓昆等, 2013)、西秦岭北缘断裂带(李晨桦等, 2016)、郯庐断裂带(郑海刚等, 2016; 张扬等, 2016; 耿杰等, 2018)等开展了许多卓有成效的工作, 如利用断层逸出气测量探测断层的位置、研究断层活动性和断层几何学、评价断裂地震危险性等, 取得了许多有价值的认识、成果和进展。

在前人研究工作基础上, 本文简要介绍了利用断层逸出气研究活动断裂的工作原理、研究方法及技术思路, 通过对沂沭断裂带(汪成民等, 1988, 1991b; 耿杰等, 2018)、海原 8.5 级地震断裂(姜大庸, 阎贤臣, 1990)、郯城 8.5 级地震断裂(汪成民等, 1988)、鲜水河断裂带(朱宏任等, 1988; 陈建民等, 1991)和山东平原地区活动断裂(王华林等, 1991b)的断层逸出气进行系统分析, 探讨了断层逸出气与断层活动性和贯通性之间的关系、断层逸出气在断层几何学研究和平原地区活断层探测中的应用等问题。

* 收稿日期: 2019-12-26.

基金项目: 中国地震局地震预测预报系统运维 [2200405 (018)] 专项和地震预测指标体系更新与补充 (1311490) 联合资助.

1 基本原理、研究方法及技术思路

地球被视为一个新陈代谢的活体，是一个巨大的、复杂的、可以与外界交换能量的开放系统，地球逸出气是探索地球内部构造、地震和火山活动的重要窗口。构造运动是地壳活动的标志，正在活动的断层又是构造运动最突出的部位，它与地震的发生有着十分密切的关系。由于断裂破碎带内充填物少、未胶结、连通性好，往往成为地下深部流体的通道。而活动断裂又常常是地下水活动和储存的场所，也是天然气体储存和富集的有利场所（蔡振业，刘永建，1991）。深部地下流体沿着断裂带向上运移和富集，在断裂带上方覆盖层形成了漏斗形的断层逸出气体异常晕（张炜等，1987）。马弗良诺夫（1981）的研究结果表明，一些深大断裂附近出现了明显的汞蒸气浓度的异常，而最高的浓度出现在地震活动最多的深断裂区。大量的测量和研究结果表明，活动断裂上方会出现断层逸出气异常带（图1），可以利用气体地球化学测量方法确定断裂位置和断层活动性。因此，断层逸出气成为获取地壳深部信息、确定断层空间分布、研究断层活动特征和运动习性、捕捉断裂活动和地震前兆的窗口。这是断层逸出气在活动断裂研究中的应用的基本原理。

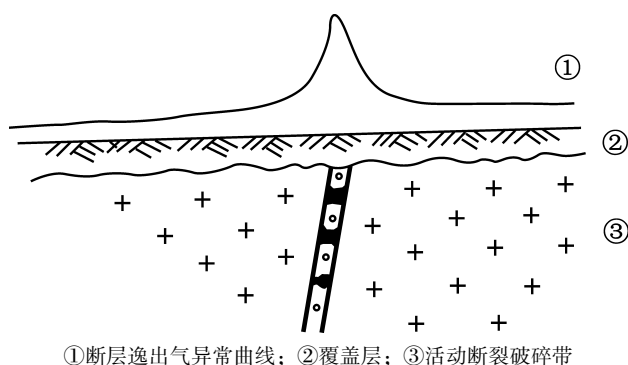


图1 活动断裂与断层逸出气异常示意图

Fig. 1 Schematic diagram of active fault and fault overflow gas anomaly

利用断层逸出气研究活动断裂的方法和步骤如下：

（1）在综合分析探测区域地质构造条件和场地测试条件的基础上，选取典型活动断裂和适宜的断层逸出气测量仪器和设备，选择合理的测量

点距和测项，进行点面相结合的断层逸出气测线和测网布设，开展断层逸出气取样、观测，获得可靠的资料。这是断层逸出气应用于活动断裂研究中的重要基础。

（2）采用合理的数据处理方法，获得断层逸出气测值剖面曲线和平面分布图。通过断层活动时代、断层活动强度、断裂切割深度和地震活动与断层逸出气峰值曲线对比，研究断层逸出气含量和变化梯度与断层活动强度、活动时代、贯通性和地震活动的关系。

（3）通过断层逸出气含量、变化梯度曲线和平面分布等值线图与活动断层几何分布图对比，研究断层几何学、运动学与断层逸出气的关系。

（4）平原地区活动断裂研究遵循技术思路：①在平原地区选取典型活动断裂，进行断层逸出气测量（ R_n ， H_g 等气体），确定活动断裂位置并初步评价断裂活动性；②在断层逸出气测量确定的活动断裂两侧布设钻孔联合剖面，在钻探过程中进行岩芯编录，包括地层的颜色、成份、颗粒大小、含水程度和化石情况等，取 ^{14}C 和释光样品（TL等）进行年代测试；③通过活动断裂两侧的地层层位、岩性、岩相和年代样品对比，确定断层的活动量、性质和时代，从而使平原地区活断层研究定量化。

2 断层逸出气与断层活动性和贯通性关系

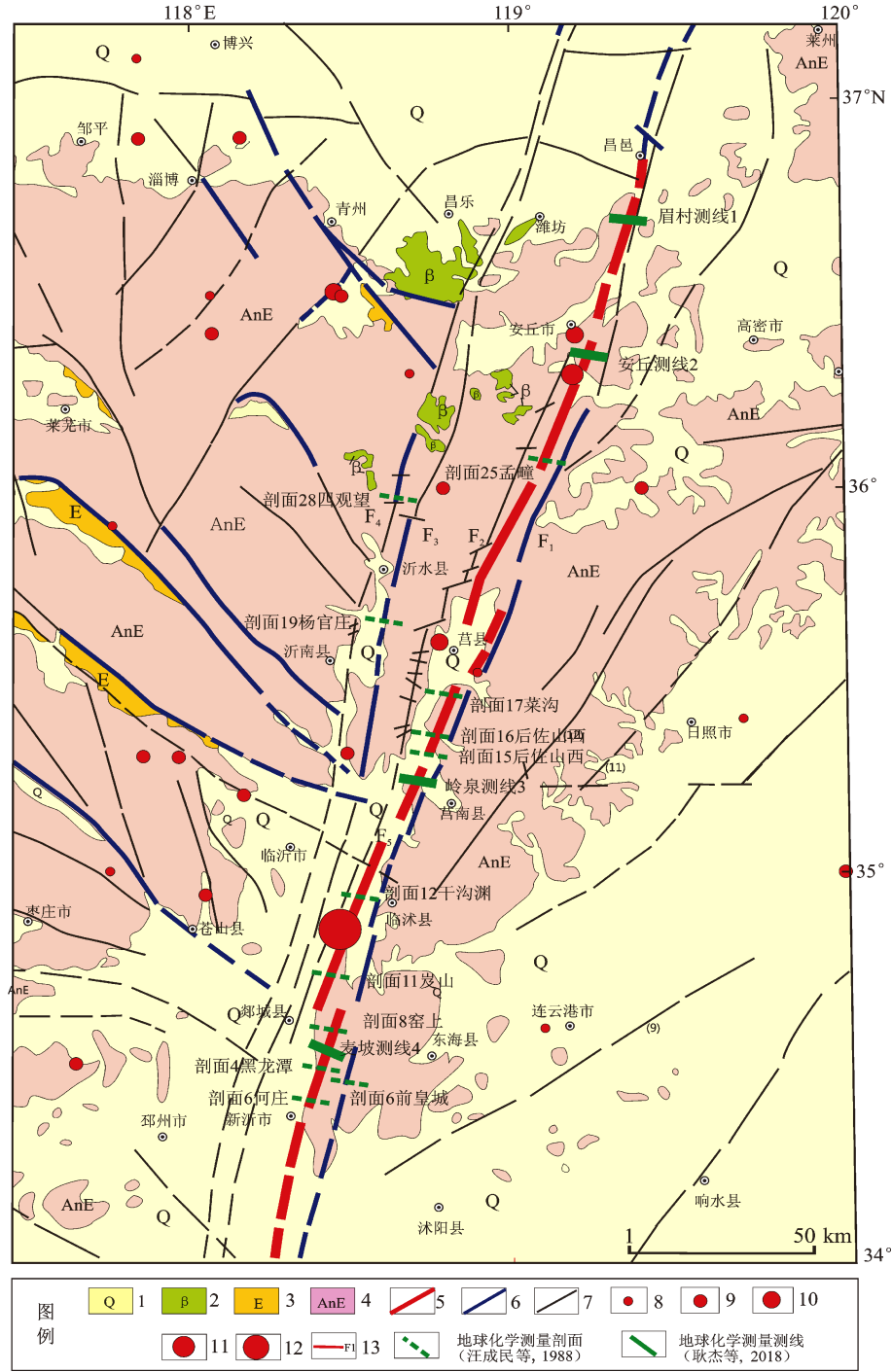
一般认为原生 H_g 直接来源于地幔，在地幔物质的长期分异过程中，由于 H_g 具有较高的挥发性，会沿深部断裂活动和运移，在深大断裂上部附近富集。通常人们把 H_g 作为可以反映断层活动特征和深部贯通性的元素（刘耀炜等，1989）。 H_2 化学性质比较稳定，不具有挥发性，是揭示岩石新鲜破裂程度最直接的气体，可作为断裂活动的元素。在强活动断层和强震中区往往出现高 R_n 异常，通常把 R_n 作为反映应力集中程度的元素。因此，断层逸出气 R_n ， H_g 和 H_2 的含量和变化梯度可以作为评价断层活动性和贯通性的参考指标。

2.1 沂沭断裂带

沂沭断裂带是郯庐断裂带最为活动的段落，主要由4条断裂组成，自东向西依次为昌邑—大店断裂（ F_1 ）、安丘—莒县断裂（ F_2 ）、沂水—汤头

断裂 (F_3) 和郯部—葛沟断裂 (F_4)。沿沂沭断裂带最为活动的安丘—莒县断裂上发生过公元前 70 年安丘 7 级地震和 1668 年郯城 8.5 级地震 (图 2)。通过对汪成民等 (1988) 在沂沭断裂带上完

成的 12 条断层逸出气测量剖面 and 耿杰等 (2018) 在安丘—莒县断裂上完成的 4 条断层逸出气测量测线上的断层逸出气曲线进行分析、对比和研究, 获得如下认识:



1. 第四系; 2. 新生代玄武岩; 3. 下第三系; 4. 前第三系; 5. 全新世活断层; 6. 晚更新世活断层; 7. 早、中更新世断层和前第四纪断裂 (线宽 0.3 mm); 8. $M_{4.0} \sim 4.9$ 地震; 9. $M_{5.0} \sim 5.9$ 地震; 10. $M_{6.0} \sim 6.9$ 地震; 11. $M_{7.0} \sim 7.9$ 地震; 12. $M_{8.0} \sim 8.9$ 地震; 13. 断层编号: F_1 : 昌邑—大店断裂; F_{2+5} : 安丘—莒县断裂 (1668 郯城 8.5 级地震断层和安丘 7 级地震断层); F_3 : 沂水—汤头断裂; F_4 : 郯部—葛沟断裂

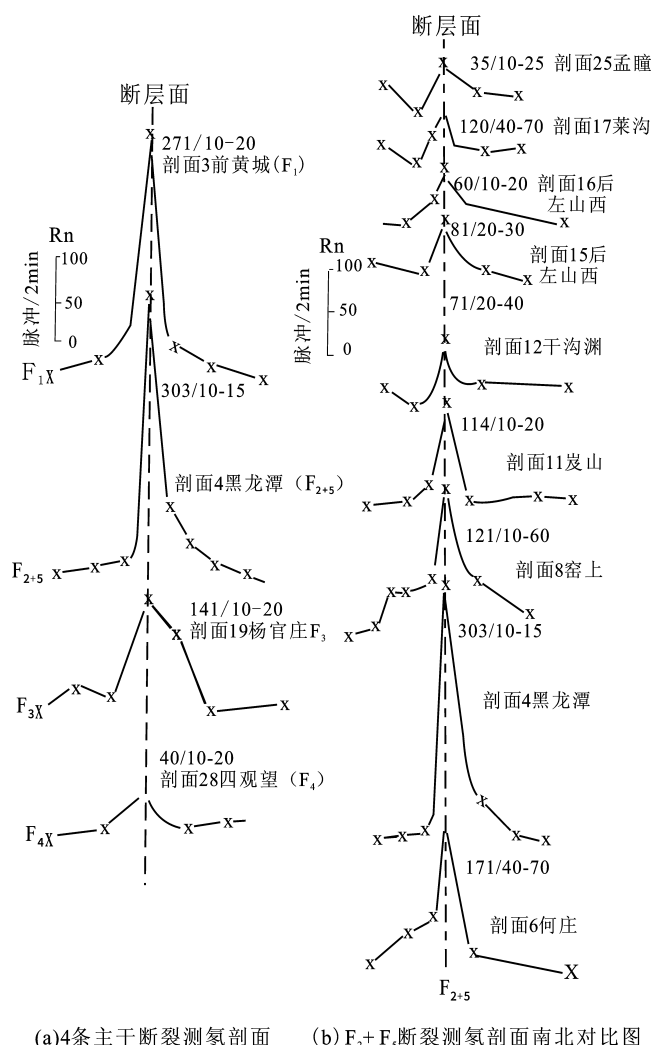
图 2 沂沭断裂带断层逸出气测线和剖面分布

Fig. 2 Distribution map of the observational lines and the profiles of fault overflow gases along Yishu fault zone

(1) 活动断裂断层逸出气释放量大小可以作为断裂活动强度的判定指标。沂沭断裂带上12条剖面断层逸出气释放量曲线(图3)显示, F_{2+5} 断裂的何庄至岌山段, 即1668年郯城8.5级地震断层段断层逸出气峰值最大, 断裂活动性最剧烈(图3b)。 F_{2+5} 断裂断层逸出气释放量由南向北逐渐变小, 与断裂活动时代由新到老一致, 即 F_{2+5} 断裂南段全新世活动向北段过渡到晚更新世活动。同时发现组成沂沭断裂带的4条断裂(图3a)中, 逸出气释放量的大小顺序为 F_{2+5} (峰值为303 脉冲/2 min)、 F_1 (峰值为271 脉冲/2 min)、 F_3 (峰值为141 脉冲/2 min)、 F_4 (峰值为40 脉冲/2 min)。其中, F_{2+5} 断裂断层逸出气释放量最大, 与地震地质调查、 ^{14}C 绝对年龄测量和地震活动分析结果(王华林等, 2017)一致。沂沭断裂带东地堑2条断裂(F_1 和 F_2)的活动强度大于西地堑2条断裂(F_3 和 F_4); 沂沭断裂带东地堑两条断裂活动时代较西地堑两条断裂新。

(2) 断裂活动性质和活动强度不同, 可以产生不同的构造组合和裂隙分布, 从而控制着跨活动断层测线的地球化学测项测值分布特征。安丘—莒县断裂上4条断层逸出气曲线显示(耿杰等, 2018), 跨公元前70年安丘7级地震断裂活动段的眉村和安丘测线的地球化学组分最大测值分别为: C_{Rn} 为 89.61 ~ 203.29 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, C_{CO_2} 为 0.55% ~ 1.45%, C_{H_2} 为 117.20 ~ 287.20 ppm; 跨1668年郯城8.5级地震断裂活动段的岭泉和麦坡测线的地球化学组分最大测值分别为: C_{Rn} 为 57.80 ~ 165.04 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, C_{CO_2} 为 1.45% ~ 2.43%, C_{H_2} 为 389.90 ~ 634.70 ppm。汪成民等(1991a, b)研究发现, C_{Rn} 和 C_{H_2} 可分别作为应力集中和断裂贯通性的指标, 一般 C_{Rn} 值越大, 应力集中越强; C_{H_2} 值越大, 断裂贯通性越好。分析认为, 安丘段的应力集中高于郯城段, 而郯城段的断裂贯通性高于安丘段。

(3) 在相同的断裂活动段上, 正断层断层逸出气释放量大于逆断层断层逸出气释放量。通过对安丘—莒县断裂上的4条断层逸出气曲线研究还发现, 眉村和岭泉测线为跨正断层测线, 安丘和麦坡测线为跨逆断层测线, 跨正断层测线的 C_{Rn} , C_{CO_2} 和 C_{H_2} 最大测值总体高于跨逆断层测线测值。这是因为正断层产生于引张应力环境, 逆断层产



(a) 4条主干断裂测氡剖面 (b) F_2 、 F_5 断裂测氡剖面南北对比图

图3 沂沭断裂带测氡剖面断层逸出气对比曲线

Fig. 3 Correlation curve of fault overflow gases in measuring Rn section along Yishu fault zone

生于挤压应力环境, 引张应力环境更有利于张裂隙的产生, 形成地球化学组分的运移通道, 而挤压应力环境更有利于裂隙的闭合, 但不利于张裂隙的产生。

2.2 鲜水河断裂带

鲜水河断裂带位于青藏高原东南缘的四川西部地区, 是一条NW走向的弧形左旋走滑断裂带。曾发生过1816年炉霍7级和1973年炉霍7.9级大地震。沿鲜水河断裂带各段都保存有清晰而完好的地表破裂变形带。将朱宏任等(1988)和陈建民等(1991)沿鲜水河断裂带进行的断层逸出气研究成果与断裂和地震活动资料进行对比研究, 认为断层逸出气 Rn 和 Hg 的含量和变化梯度可以作为评价断层活动性和贯通性的参考指标。

综合前人研究资料, 绘制鲜水河断裂带断层逸出气测量平面、剖面与地震分布图 (图 4)。图 4 显示, 侏倭—炉霍段 Hg 峰值为 900 ~ 1 200 ng, Rn 异常值为 60 脉冲/2min, 发生过 1816 年炉霍 7 级和 1973 年炉霍 7.9 级大地震; 道孚段 Hg 峰值为 300 ng, Rn 异常值为 55 脉冲/2min, 发生过道孚 6.9 级大地震; 中谷段 Hg 峰值为 150 ng, 其附近近年无大震记录。综上, 断层逸出气 Rn 和 Hg 的含量大小与地震活动强度具有良好的对应关系。

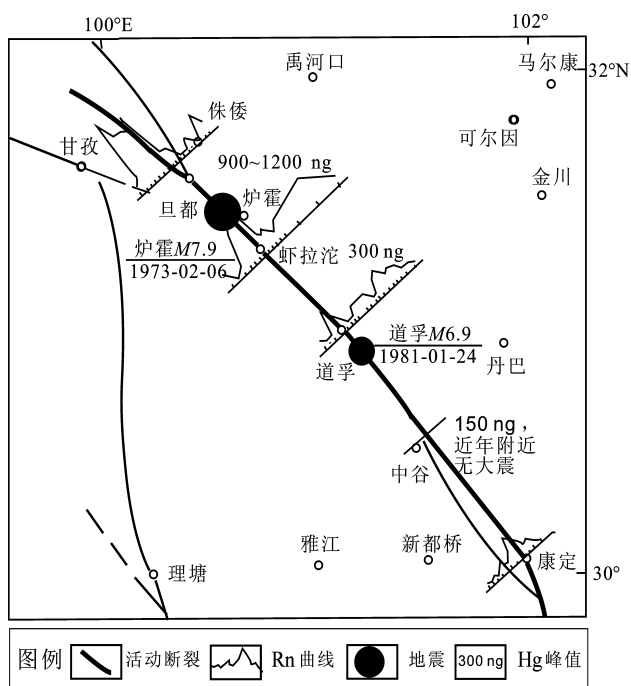


图 4 鲜水河断裂带部分地段断层逸出气测量平面、剖面分布与地震分布

Fig. 4 Distribution of the plane and profile of fault overflow gas measurement and earthquakes in some sections of Xianshuihe fault zone

2.3 海原 8.5 级地震断裂

1920 年海原 8.5 级地震是近代以来全球范围内发生过的最大的地震之一, 沿海原活动断裂发生, 在地表形成一条明显的地震断裂, 东起硝口, 向 NWW 延伸, 至兴泉堡终止, 总长 215 km。海原地震断裂由多条长度、性质不同的断层组成, 呈雁行排列, 均具有左旋走滑特征 (邓起东等, 1987)。

姜大庸和阎贤臣 (1990) 对海原 8.5 级地震断裂的断层逸出气进行了测试和研究, 断层逸出气测线分布见图 5, 其中, III 和 VIII 测线布设在走滑断层运动产生的引张区, V 测线布设在走滑断层运动产生的挤压区, VII 测线布设在活动断裂以外的老断层上。图 5 显示, 海原地震断裂上 Hg 的基值相对稳定, 各测线 Hg 峰值为基值的 2 ~ 4 倍, Hg 峰值变化幅度最大的为 IV, VIII 测线, 这里也是 Rn 的高异常段。V 测线 Hg 峰值异常没有 IV, VIII 测线明显, 位于老断层上的 VII 测线 Hg 的异常幅度最小, 峰值为基值的 1.3 倍。

从 Rn 测定结果看, 各段上 Rn 的变化幅度差别较大, 拉张区大于挤压区。2 个拉张盆地中 2 条测线 Rn 变幅最大, 峰值为基值的 4 ~ 9 倍。位于老断层的 VII 测线 Rn 变幅远低于海原地震断裂上各测线的变幅, 峰值为基值的 1.3 倍。

海原地震断裂上 Rn 和 Hg 含量与断裂活动性和断层构造部位密切相关。活动断层高于非活动断层, 同一活动断裂带上拉张区高于压扭区。拉张区内插入盆地的断层端部 Rn 和 Hg 异常相对突出。

2.4 共轭活动断裂

蔡振业和刘建永 (1991) 对某地共轭活动断裂进行了 25 个测点的氢气浓度测量 (图 6a)。

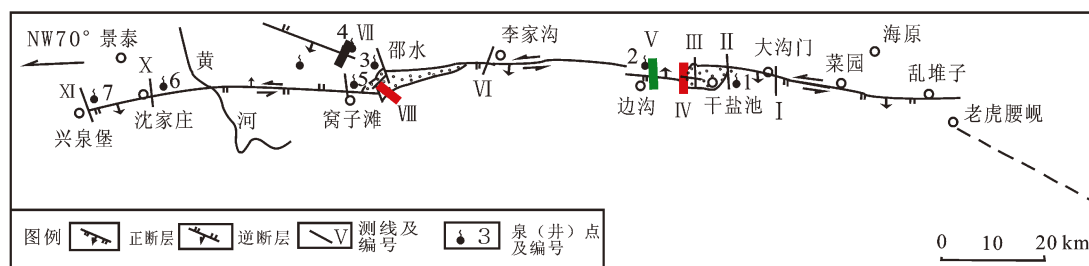


图 5 海原 8.5 级地震断裂及断层逸出气测线、泉点分布

Fig. 5 Distribution map of the lines of fault overflow gas and spring points along Haiyuan M8.5 earthquake fault

按图 6a 中坐标轴方向划分方格网, 网格大小依推算精度的要求而定, 通过推算方法得到了内插推算的浓度值, 并按其分布绘制了 Rn 浓度异常等值线图 (图 6b)。从图 6 可以看出, F_1 和 F_2 为共轭活动断裂, F_1 为左旋走滑断层, 属于主要活动断层; F_2 为右旋走滑断层, 属于辅助活动断层。在 F_1 和 F_2 的交会区出现次峰值异常区, 峰值异常值为 $2\,500\text{ Bq/m}^3$; 在 F_1 主要活动断层运动产生的引张区分别出现 2 个峰值异常区, 分别与走滑断裂枢纽部位和走滑运动伴生的拉分区相对, 峰值异常值分别为 $2\,500\text{ Bq/m}^3$, $4\,000\text{ Bq/m}^3$ 。根据走滑断层运动数值模拟 (罗灼礼, 1980) 和物理实验 (刘力强, 1998) 结果, 走滑断裂枢纽部位为挤压

区, 是挤压应力增大区, 由于共轭活动断裂之间的相互交会和挤压应力作用, 岩石破碎强烈, 利于氦气的溢出, 故出现氦气峰值异常区。走滑运动伴生的拉分区, 是引张应力增大区, 岩石形成张性破裂, 更有利于氦气的溢出, 因而在走滑运动伴生的拉分区会出现氦气更大峰值异常区。

综上所述认为, 断层逸出气测量可以应用于断层几何学和运动学研究之中, 走滑断裂枢纽部位和走滑运动伴生的拉分区、挤压区具有不同地球化学场特征。根据断层逸出气测量获得的地球化学场分布特点, 可以确定走滑断裂枢纽部位、拉分区和挤压区, 为断层几何学和运动学研究提供一种快捷方便的探测方法。

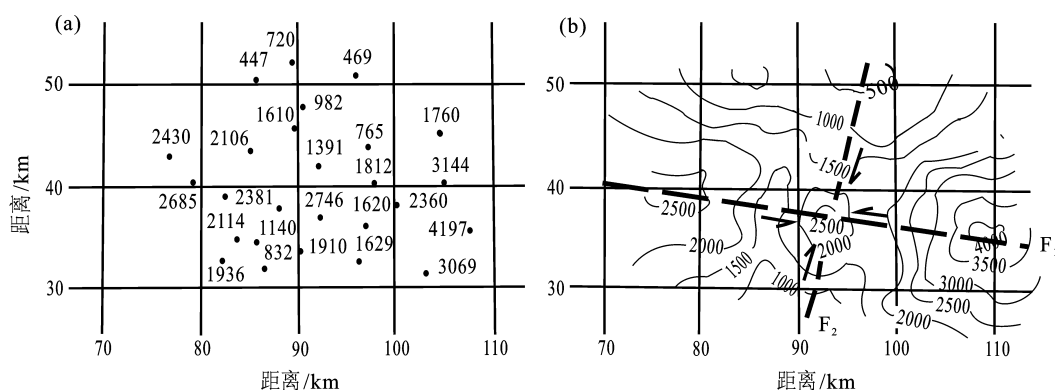


图 6 某地共轭活动断裂实测 (a) 和计算 (b) Rn 浓度等值线图 (单位: Bq/m^3)

Fig. 6 Contour map of measured (a) and calculated (b) radon concentration in a conjugate active fault (unit: Bq/m^3)

3 断层逸出气在平原地区活断层探测中的应用

夏垫断裂中南段 (韩晓昆等, 2013) 和延怀盆地土壤气体地球化学特征 (李营等, 2009)、呼和浩特地区隐伏断层 (周晓成等, 2007)、海河隐伏活断层探测 (邵永新等, 2007) 和刘家堡活动断层土壤气氦、汞地球化学特征 (张新基等, 2005) 研究表明, 根据土壤气氦、汞等断层逸出气异常特征, 可以确定平原隐伏区断裂的具体位置。王华林和耿杰 (1991a) 将断层逸出气测量应用于平原地区活断层探测, 具有良好效果。

按照本文提出的平原地区活动断裂研究遵循的技术思路, 通过断层逸出气 Rn 测量和工程钻探剖面联合探测了山东平原地区的益都断裂和小宋

—解元集断裂的活动性, 确定了断裂位置、位移量、活动时代和活动性质。

3.1 益都断裂

益都断裂是一条规模较大、第四纪晚期活动的 NW 向断裂, 其南段出露, 中、北段隐伏, 沿断裂曾发生了一系列中强地震。在该断裂与上五井断裂交会处发生过 1829 年临朐 6 ¼ 级地震, 与安丘—莒县断裂交会处发生过公元前 70 年安丘 7 级地震。野外考察、探槽开挖和 ^{14}C 年代测定结果 (王华林等, 1991a) 表明, 在临朐肖家店子大冲沟处发现断裂断错第四纪含砂砾透镜体亚粘土层、含沙亚粘土层和含钙质结核黄土层。黄土层的 ^{14}C 年代为 $(7\,000 \pm 195)\text{ a}$, 说明该断裂活动发生距今 7 000 a 左右。该断裂在图 7 中 2 号剖面上表现为高角度正断层活动, 垂直断距 2 m, 断层面的擦痕显示断层右旋正断活动。

伏断裂。在东濮黄河公路大桥的工程地震工作中, 对这条隐伏断裂进行了断层逸出气测量, 在解元集测线断层逸出气有高峰值异常显示, 在高峰值异常布设了2个钻孔。

图9是跨解元集断裂的断层逸出气和钻孔联合剖面。由图可见, 断层附近具有高峰值, 推断断裂位置处揭露出断裂, 断裂已断错距今6 ka的地层, 断距0.7 m。断距由上向下变大, 在28~32 m深处, 断裂东盘较西盘下降2.7 m。西盘41.95 m深处地层的 ^{14}C 年代为 $(27\ 190 \pm 380)\text{ a}$, 东盘42.4 m深处地层的 ^{14}C 年代为 $(20\ 640 \pm 230)\text{ a}$ 。断层两侧地层年代相差7 ka左右, 且36~48 m深处断裂两侧的地层的岩性也有所不同, 这充分表明NE向断裂不仅存在, 而且是全新世活动断裂。断裂东倾, 其性质为正断层。通过断层气测量确定断裂位置, 然后进行工程钻探, 首次获得了断层活动的年代证据和位移量。断裂活动时代、性质和量值的确定, 对认识1937年菏泽地震发震构造有着重要意义。

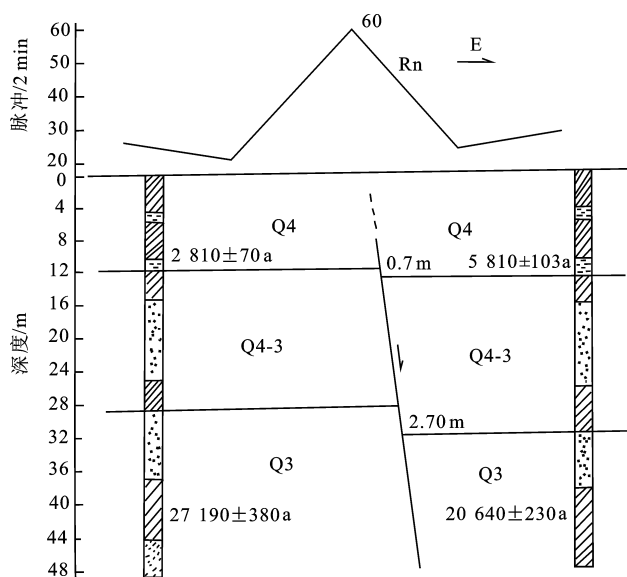


图9 1937 菏泽7级地震断裂断层逸出气
与钻孔联合剖面

Fig. 9 Joint profile of fault overflow gas measurment and borehole along Heze M7 earthquake fault in 1937

4 结论

本文对沂沭断裂带、海原8.5级地震断裂、鲜

水河断裂和山东平原地区活动断裂等的断层逸出气进行了对比研究, 获得以下主要结论与认识:

(1) 对沂沭断裂带和鲜水河断裂带断层逸出气测量资料与断裂活动和地震活动的分析、对比和研究成果表明, 断层逸出气 Rn , Hg 的含量和变化梯度可以作为评价断层活动性和贯通性的参考指标; 断裂活动性质和活动强度不同, 可以产生不同的构造组合和裂隙分布, 从而控制着跨越活动断层测线的地球化学测项测值分布特征; 在相同断裂活动段上, 正断层逸出气释放量大于逆断层逸出气释放量。

(2) 断层逸出气测量可以应用到断层几何学和运动学研究之中。通过对海原8.5级地震断裂和典型共轭交会断裂的断层逸出气研究发现, 走滑断裂枢纽部位和走滑运动伴生的拉分区、挤压区具有不同地球化学场特征。根据断层逸出气测量获得的地球化学场分布特点, 可以确定走滑断裂枢纽部位、拉分区和挤压区, 为断层几何学和运动学研究提供一种快捷方便的探测方法。

(3) 大量的跨越活动断裂的断层逸出气测量结果表明, 根据断层逸出气异常特征可以确定平原隐伏区断裂的具体位置, 断层逸出气测量是隐伏断层探测中非常有效的手段之一。本文通过断层逸出气测量和工程钻探剖面联合探测了山东平原地区的益都断裂和小宋—解元集断裂活动性, 确定了断裂位置、位移量、活动时代和活动性质, 具有良好的效果。

断层逸出气作为地壳应力集中和断裂活动的敏感组分, 在活动断裂研究中有着广泛的应用前景, 需要我们不懈的努力和探索。

参考文献:

- 蔡振业, 刘建永. 1991. 新构造断裂与氡污染及其治理对策[M]//汪成民等. 断层气测量在地震科学中的应用. 北京:地震出版社, 198-202.
- 蔡祖煌. 1986. 水文地球化学地震前兆观测与新灵敏组分的探索[J]. 地震研究, 7(6):736-744.
- 陈建民, 朱宏任, 汪成民, 等. 1991. 鲜水河断裂带断层气观测研究[M]//汪成民等. 断层气测量在地震科学中的应用. 北京:地震出版社, 63-66.
- 邓起东, 张维岐, 汪一鹏, 等. 1987. 海原断裂带和1920年海原地震断层的基本特征及其形成机制[M]//国家地震局地质研究所编. 现代地壳运动研究(3). 北京:地震出版社, 9-25.

- 付碧宏,王萍. 2009. 中国汶川“5·12”8.0 级大地震地震地质害图集[M]. 北京:地震出版社.
- 耿杰,付俊东,孔向阳,等. 2018. 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.
- 耿杰,张昭栋. 1997. 山东聊古一井水化学组分地震异常的场源兆特征及其机制讨论[J]. 西北地震学报,19(4):58-65.
- 郭增建,秦保燕. 1979. 震源物理[M]. 北京:地震出版社.
- 韩晓昆,李营,杜建国,等. 2013. 夏垫断裂中南段土壤气体地球化学特征[J]. 物探与化探,37(6):976-982.
- 韩竹军,任伏虎,小川雄二郎,等. 1996. 1995 年 1 月 17 日日本阪神 7.2 级地震的构造条件研究[J]. 地震学报,18(4):523-528.
- 姜大庸,阎贤臣. 1990. 海原活动断裂流体地球化学场初探[J]. 地震地质,12(1):63-68.
- 李晨桦,张慧,苏鹤军,等. 2016. 西秦岭北缘断裂带深部气体地球化学特征与断层形变空间分布相关性研究[J]. 地震工程学报,38(6):955-964.
- 李彤起,杨崇义,杨静修,等. 1990. 滇西实验场水化学前兆灵敏组分及灵敏穴位的初步探讨[J]. 西北地震学报,12(2):79-82.
- 李营,杜建国,王富宽,等. 2009. 延怀盆地土壤气体地球化学特征[J]. 地震学报,31(1):82-91.
- 刘力强,马瑾,马胜利. 1998. 雁列构造的几何及其应力场的数值模拟[J]. 地震地质,20(1):44-53.
- 刘耀炜,阎贤臣,张增,等. 1989. 土壤中微量气体汞含量与隐伏活动断层的关系[J]. 西北地震学报,11(1):79-81.
- 罗灼礼. 1980. 震源应力场、形变场和倾斜场[J]. 地震学报,2(2):169-185.
- 马弗良诺夫. 1981. 中亚若干地震活动带的水文地球化学特征[M]. 孙崇绍等译. 北京:地震出版社.
- 马瑾. 1987. 构造物理学概论[M]. 北京:地震出版社.
- 马胜利,马瑾. 2003. 我国实验岩石力学与构造物理学研究的若干新进展[J]. 地震学报,25(5):453-464.
- 孟广魁,何开明,班铁,等. 1997. 氦、汞测量用于断裂活动性和分段的研究[J]. 中国地震,13(1):43-51.
- 邵永新,杨绪连,李一兵. 2007. 海河隐伏活断层探测中土壤气氦和汞测量及其结果[J]. 地震地质,29(3):627-635.
- Schol C H. 1996. 地震与断层力学[M]. 胜利等译. 北京:地震出版社.
- 汪成民,李宣瑚,魏柏林. 1991b. 断层气测量在地震科学中的应用[M]. 北京:地震出版社.
- 汪成民,李宣瑚. 1991a. 我国断层气测量在地震科学研究中的应用现状[J]. 中国地震,7(2):19-30.
- 王华林,耿杰. 1991a. 断层气测量在平原地区活断层研究中的应用[M]//汪成民等. 断层气测量在地震科学中的应用. 北京:地震出版社,113-121.
- 王华林,李家灵,许坤福,等. 1991b. 平原地区活断层研究[J]. 地震研究,42(3):132-140.
- 王华林,郑建常,耿杰,等. 2017. 郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究[M]. 北京:地震出版社.
- 王瑞田,赵宪超,毕桂香. 1994. 1937 年菏泽地震地裂缝追踪研究[J]. 西北地震学报,16(4):70-75.
- 王彦斌,王永,李建成,等. 2000. 1999 年台湾集集大地震的地表断层破裂特征[J]. 地震地质,22(2):97-103.
- 张扬,戴波,周晓成. 2016. 郯庐断裂带江苏段土壤气体地球化学特征研究[J]. 西北地震学报,39(3):444-449.
- 张必敖,何跟巧,廖元模,等. 1987. 阿尔金断层东北段断层气体的初步研究[J]. 西北地震学报,9(2):26-32.
- 张慧,张新基,苏鹤军,等. 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.
- 张炜,阎立璋,申春生,等. 1987. 水文地球化学地震前兆观测与新灵敏组分的探索[J]. 地震,7(5):5.
- 张新基,张慧,苏鹤军,等. 2005. 刘家堡活动断层土壤气氦、汞地球化学特征[J]. 地震,25(4):87-92.
- 赵振桑,张慧,苏鹤军. 2011. 玛曲断裂带土壤气汞、氦地球化学特征[J]. 西北地震学报,33(4):376-379.
- 郑海刚,方震,周晓成,等. 2016. 郯庐断裂带安徽段土壤气体的地球化学特征[J]. 中国地震,32(4):642-651.
- 周晓成,郭文生,杜建国,等. 2007. 呼和浩特地区隐伏断层土壤气氦、汞地球化学特征[J]. 地震,27(1):70-74.
- 朱宏任,汪成民,陈建民,等. 1988. 鲜水河断裂带某些断层气组分的初步研究[J]. 地震,8(3):28-35.
- Giammanco S, Gurrieri S, Valenza M, *et al.* 1998. Anomalous soil CO₂ degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna (Sicily Italy) [J]. Bulletin of Volcanology, 60:252-259.
- King C, King B, Evans W C, *et al.* 1996. Spatial Radon anomalies on active faults in California [J]. Applied Geochemistry, 11(4):497-510.
- Wakita H, Naramura Y, Notsu K, *et al.* 1980. Radon anomaly: a possible precursor of the 1978 Izu-Oshima Kinkai earthquake [J]. Science, 207(4433):882-883.

Application of Measurements of Fault Overflow Gases in Active Fault Research

GENG Jie

(*Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, Shandong, China*)

Abstract

Starting from the technical thought, working principle and research method of fault overflow gas measurement applied to active fault research, in this paper, we have discussed the relationship between fault overflow gases and fault activity and continuity, the application of fault overflow gases in fault geometry research and active fault detection in plain area, based on the systematic analysis, comparison and study of the fault overflow gas of Yishu Fault Zone, Haiyuan $M8.5$ earthquake fault, Xianshuihe fault and Shandong plain active fault. The results show that the content and change gradient of Rn and Hg of fault overflow gas can be used as the reference index to evaluate fault activity and continuity, the fault overflow gas measurement provides a quick and convenient detection method for the study of fault geometry and kinematics, which is a very effective means to determine the specific location of hidden faults.

Keywords: fault overflow gases; active fault; fault activity; fault geometry; plain area