

海原活动断裂的地壳脱气作用

姜大庸, 陈文彬, 石雅留

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 根据实验结果讨论了 1920 年海原 8.5 级大震发震断裂的气体构造地球化学作用. 海原活动断裂带上的脱气以地壳脱气作用为主, 脱气作用产物主要来源于上中地壳, 脱气作用的强度与断层应力状态运动特点密切相关. 不同元素所反映的脱气深度范围及特征有所不同, 氦对浅部断层活动及拉张区脱气作用较为灵敏, 汞、氩能反映较深地壳内的脱气作用, 氢的异常则与断层的逆冲、推覆作用及断面上岩水作用密切相关.

主题词: 活断层; 地壳; 脱气作用; 海原断裂

中图分类号: P315.72⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2000)04-0447-05

0 前言

海原活动断裂是 1920 年海原 8.5 级地震的发震断裂. 有关这条断裂的构造学、地震地质学特征机理, 在《海原活动断裂》等专著中已作过详尽研究与论述. 笔者在前人研究的基础上, 根据实验结果, 讨论了活动断裂上的地壳脱气作用, 用地球化学方法研究了流体与构造运动和地震活动之间的关系.

1 海原断裂上的流体及脱气作用

海原断裂各段的活动都有流体的参与和作用, 流体作用不仅表现在浅部, 且可能表现在深达十余公里的高导层. 脱气作用是流体作用的重要组成部分, 且在各种深度都随时存在, 断层是地壳脱气的主要通道之一.

海原断裂由 11 条走滑断层以羽列方式组成, 自西向东呈 NWW—NNW 的弧形展布, 延伸长、切割深, 全长约 215 km. 自西端兴泉堡至东端硝口, 沿断层展布方向均有密集的泉点呈线状分布, 且除硝口水温 26℃外, 其余所有泉、井均为 12℃左右的冷水. 断层上密集的泉点意味着断层活动过程中伴随着较强的地下流体的作用. 据大地电磁测深, 地震波测深资料^[1]分析, 海原一带位于上中地壳的第一高导—低速层分布在十余公里深度范围内. 海原 8.5 级地震震源深度约 17~18 km, 区内大多数现今观测到的中、小震震源深度以 15~30 km 深度为主^[1]. 目前, 较为普遍地认为地壳内高导低速层为富含流体的岩层, 且根据计算推测这一深度的温压不足以形成岩浆^[1], 流体主要为临界状态以下的水和气. 断裂带上出露的地下水循环能否深

收稿日期: 2000-01-10

基金项目: 地震科学联合基金资助项目(9507433); 国家重点实验室——气体地球化学实验室资助项目(9501);

中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC 2000044

作者简介: 姜大庸(1948—), 男(汉族), 北京市人, 高级工程师. 主要从事地下流体与岩土工程研究.

达高导层的深度,目前尚缺乏充足的证据.而本区地温梯度($30.78\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$)远低于有热水分布的秦岭区($38.08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$),大地热流值($67.07\text{ mW}/\text{m}^2$)也低于后者($73.51\text{ mW}/\text{m}^2$).本区非地热异常区深循环水出露时水温较低也是正常的.

脱气作用在地球的多个层位都随时发生着,活断层则是大陆区内脱气作用发生的重要部位及主要通道.目前在活断层上所能观测到的脱出气体以地下水水溶气及断层气为主.在下文中将主要讨论本区内所能观测到的且与地震活动、构造运动密切相关的地壳脱气作用.大地震的发震断层在构造运动和孕震过程中常常是流体构造地球化学作用最为强烈突出的部位,且因断层裂隙发育和流体垂向运移通道相对较通畅而成为观测研究的最佳场所.即使大震后较长时间内,这种作用并不立即终止而仍在继续,断层气的空间异常分布就是这一作用的反映.通常这种作用可能比孕震过程中或地震发生时要微弱得多,并且是缓慢的、时强时弱又持续不断的,但与其它构造部位明显不同,而形成鲜明的异常.断层的不同区段,随断层上不同的应力状态(挤压和拉张)及地貌上的隆升与沉降,脱气作用差异较大.差异一方面表现在异常幅度的大小上,另一方面表现在异常的元素种类上.这些差异为研究脱气作用的机制、作用深度与物质来源提供了有力的证据.

2 海原断裂的气体同位素

同位素是当前地球化学中用来判别深部物质来源的重要示踪迹. CO_2 中 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-8\%\sim-4\%$,He的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值大于 1.1×10^{-5} 通常被认为是上地幔来源物质的重要标志.在所有采样点(包括水溶气、溢出气、断层气)中, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 均未达到上述指标.不仅如此,在青藏高原东北缘这一较大范围内,无论大型断裂(如西秦岭北缘断裂)、小型断裂(如兰州金城关断裂)、稳定地块(如鄂尔多斯地块),根据现有资料(包括天然气等气样),从 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 所反映的情况来看,都没有幔源物质特征显示.也就是说在本区所能观测到的脱气作用都发生在地壳以上范围内.表 1 为海原断裂上一些测点的同位素值.

一般来说,壳源氮 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 $10^{-7}\sim 10^{-8}$,大气氮 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 为 1.4×10^{-6} ;壳内有机质氧化形成的 CO_2 ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-20\%\sim-10\%$,有机质降解生成的 CO_2 ,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-25\%\sim-15\%$.表 1 中,海原断裂带上绝大多数断层气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值表现为大气型,少数水溶气、溢出气表现为地壳型. $\delta^{13}\text{C}$ 值则处于有机质氧化和解成因类型的特征值范围.断层气呈大气型,说明浅层封闭性差,处在大气成分占主导地位的不稳定平衡条件下,同时也不能因此而否认深部地壳来源气体的存在,只是其含量相对较少.

3 海原断裂上各气体组分在脱气过程中的特征

3.1 断层气中的氢

气态氢是强还原剂.断层气中,一般含氧 20%左右,属氧化环境.产生氢气的主要因素可

表 1 海原断裂带上气体的同位素

采样点	气体类型	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	R/R_a
硝口	水溶气	—	—	$(3.25\pm 0.15)\times 10^{-8}$	0.02
硝口	断层气	-21.2	-7.9	$(1.39\pm 0.04)\times 10^{-6}$	0.99
硝口	溢出气	-18.0	-6.9	$(2.70\pm 0.13)\times 10^{-8}$	0.02
邵家庄	断层气	-20.4	-11.3	$(1.38\pm 0.04)\times 10^{-6}$	0.99
小山	断层气	-19.0	-9.2	$(1.42\pm 0.04)\times 10^{-6}$	1.01
小山	水溶气	—	—	$(1.23\pm 0.03)\times 10^{-6}$	1.01
边沟	断层气	-14.5	-3.5	$(1.42\pm 0.04)\times 10^{-6}$	1.01
边沟	水溶气	—	—	$(1.37\pm 0.04)\times 10^{-6}$	0.98

注: R 为所测样品的氮同位素比值, R_a 为标准气样的氮同位素比值

能有两个: 一是浅层的生物作用, 二是深部的岩水作用. 图 1 为海原断裂上一些跨断层测线上的氢分布曲线.

无论断层气或水溶气, 在空间分布或时间变化上, 变化剧烈、无固定年变规律是氢的一个重要特征. 像 Rn 、 He 、 CO_2 、 Ar 等组分, 在跨断层测量中, 虽有变化或异常, 极少达到数量级的幅度; 在定点连续观测中数据稳定, 虽有变化也往往能形成一定的年变规律. 氢则不同, 其含量可在小于 $1 \times 10^{-5} \%$ (测不出) 到 $1 \times 10^{-2} \%$ 的范围内. 从图 1 可见, 在断裂的一些部位, 氢异常幅度很大, 如边沟、兴泉堡等测线. 氢在时空分布上的剧变性, 既与氢的性质 (分子量、比重小) 有关, 同时也反映了氢的来源和成因机制. 浅层的生物化学作用可能与季节的变化有关, 不能构成氢大起

大落变化的原因. 断层各段岩体应力应变的差异, 以及断层蠕滑的时大时小, 岩-水作用的时强时弱, 则可能是氢时空变化剧烈的重要原因. 海原断裂上 H_2 异常变化幅度最大的边沟正位于黄家洼山巨型推覆体上, 也是 1920 年海原大震时位移量最大的部位, 兴泉堡测线则是断裂端点. 以上典型的氢异常在一定程度上反映了氢的形成与断层活动部位的关系.

3.2 断层气中的氢

氢是目前地震前兆观测的主要项目. 由于其半衰期仅为 3. 825d, 通常被认为是浅层岩体射气产物. 射气性能取决于岩石的结构构造及裂隙孔隙的发育程度等多种因素. 我们在海原断裂上, 用国产 FD-3017 测氦仪进行了多条测线的现场测氦. 图 2 为部分测线上的氢变化曲线.

图 2 反映了断裂带各段氢的异常特征. 断层气含氢较低, 一般变化范围内在 $5 \sim 20 \text{ Bq/L}$, 最大不超过 25 Bq/L . 氢是惰性气体, 且分子量、比重较大, 其变化幅度远小于氢, 但在活断层上异常仍是明显的. 不仅异常幅度高于老断层, 而且在同一断层带的不同阶区也有差异. 在力学性质表现为拉张区且运动方式呈沉降的区段, 异常相对突出. 这显示了浅层岩石在拉张状态下, 氢射气性能增强的特点.

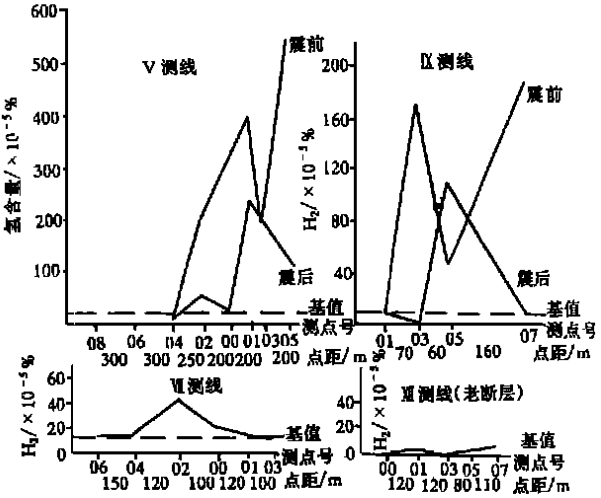


图 1 海原断裂带氢分布曲线

Fig. 1 The distribution curves of hydrogen on the Haiyuan active fault.

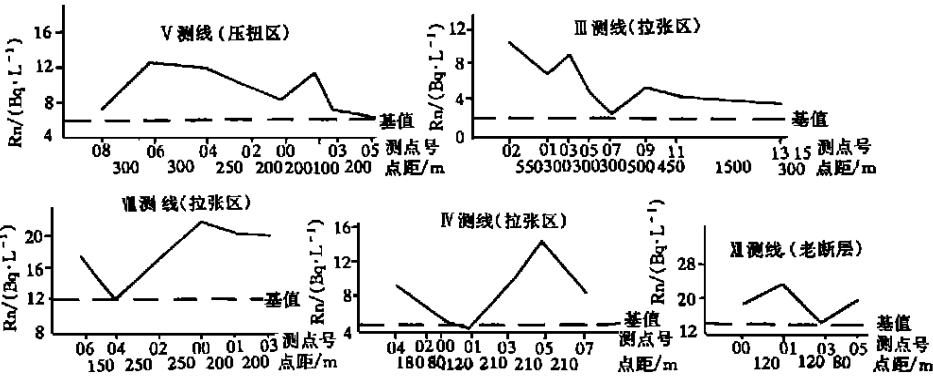


图 2 海原断裂的氡异常分布

Fig. 2 The abnormal distribution of radon on the Haiyuan active fault.

3.3 断层气中的氮和氦

氮的测定不同于测氢,是野外采样后,在室内用气相色谱仪或质谱仪来测定.两种仪器检测结果是吻合的.断层气中氮含量一般在 $1\times 10^{-4}\%$ ~ $5\times 10^{-4}\%$,与空气相近.水溶气、溢出气则与断层气相差很大.硝口(海原断裂东南端)水溶气 He 含量比断层气高 3 个数量级.与此同时,该点水溶气、溢出气氮的同位素³He/⁴He 值均为 10^{-8} 的低值.我们知道,地壳中 He 以放射成因为主.放射成因的 He 均为⁴He,因而壳源 He 的³He/⁴He 值呈 10^{-7} ~ 10^{-8} 的低值;幔源 He 中有较多的原生氮,³He/⁴He 值是 10^{-5} 的高值;大气氮是前两类氮长时间平衡的结果.高的 He 含量,低的³He/⁴He 比值说明海原断裂带深循环水所到达的深度以上具有很强的地壳脱气作用.相对而言,断层气由于处在大气影响下,脱气作用因被大气“冲淡”而显得十分微弱.然而,断层活动导致的 He 含量异常仍然是明显的,跨断层测线上 He 变幅一般达 10% ~ 30%,少数测线变化可达数倍以上.与 He 等元素相比,Ar 在跨断层上的变化可算是最小的,基本保持在 0.90% ~ 0.92%的水平上.空气中的 Ar 以⁴⁰Ar 为主,是⁴⁰K 衰变的产物.Ar 不衰变,不向大气中逃逸,也不与其它元素反应,因而只能随地质年龄的增长而缓慢积累,Ar 的地壳脱气作用是大气中缓慢积累增长的过程.

3.4 断层气中的汞

单质汞易挥发,有很高的蒸汽压,渗透性特别强,因而汞能以长时间、长距离从深部向上缓慢运移³¹.以往的地球化学研究认为气态汞可以从地幔运移到达地表.汞的来源、成因是多方面的,而汞矿床的形成大多数离不开热液与渗流水的作用.

海原断裂上断层气汞的变化范围为 30 ~ 200 ng/L.其变幅之大仅次于氢,也属于变化剧烈的元素之一.单据现有资料还不能认定断层气汞的来源深度,只能通过跨断层测线上的异常分布证明与断层的活动密切相关.海原断裂带上,无论拉张性的沉降盆地,或挤压性的隆起山脉,都普遍存在汞异常.在地震中形变、位移最大的巨大推覆体处,汞异常极为突出.图 3 为海原断裂上部分测线的汞异常分布.

图 3 中,Ⅷ、Ⅳ测线处在拉分盆地,Ⅴ测线处在挤压隆起的巨大推覆体上.值得注意的是:氢、汞两类随时间、空间变化剧烈的元素在地震错动最大的部位上都表现出较强的脱气作用.

3.5 断层气中的氧和氮

氧、氮是大气和地球表层气体.尤其是氧,在地下深部几乎不存在.当气体中氧、氮成分与大气组分比例相近时,可以认为其主要来源于大气.即使存在微弱的变化,也不能说与构造运动、断层活动有关.表 2 列出了用 MAT251 质谱仪测定的海原断裂带断层气、水溶气、溢出气的氧、氮等气体组分值.

表 2 中断层气 N₂、O₂ 与大气相近;而深循环热水的硝口点水溶气、溢出气含氧近于零,说明浅层水混入很少,脱气作用发生在较深地壳内.

3.6 断层气中的 CO₂

我国东部地区(东北、华北)地下水中

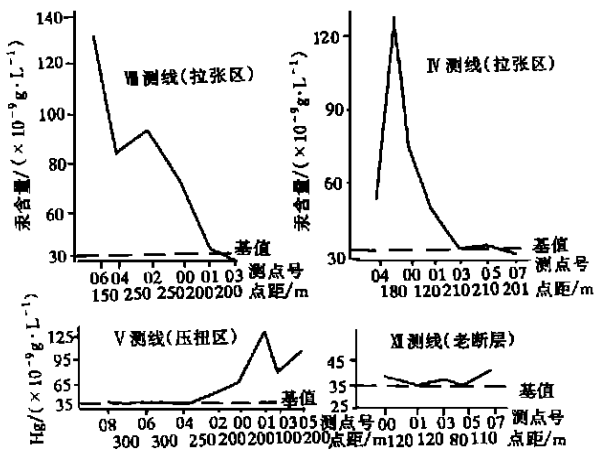


图 3 海原断裂的汞异常

Fig. 3 The abnormal distribution of mercury on the Haiyuan active fault.

CO₂ 一般随深度增加而增加^[4], 如北京汤山热水和黑龙江五大莲池冷泉 CO₂ 分别达 23%和 99%。本区范围(不仅包括海原断裂带, 还包括甘肃东部与宁夏南部的甘宁交界区)内, 热水等深循环水的 CO₂ 普遍很低, 如武山、天水、清水、通渭、硝口(海原断裂南端)等热水的 CO₂ 均低于 1%, 一些受浅层水混入影响的断层泉也都低于 5%, 相反的一些第四系潜水却含较高 CO₂, 如天水

表 2 海原断裂断层气、水溶气、溢出气组分含量

取样点	含量/ %						气体类型
	He	N ₂	O ₂	Ar	Ne	CO ₂	
硝口	0.000 4	78.20	20.560	0.92	0.001 4	0.29	断层气
硝口	0.030 0	96.91	0.081	1.93	0.000 5	0.65	水溶气
硝口	0.180 0	98.36	0.012	0.88	0.000 3	0.21	溢出气
小山	0.000 4	78.42	20.320	0.92	0.001 3	0.29	断层气
小山	0.000 2	68.37	28.490	1.60	0.000 6	1.46	水溶气
邵家庄 0	0.000 4	78.38	20.300	0.92	0.040 0	0.36	断层气
邵家庄 1	0.000 4	78.49	20.190	0.92	0.001 9	0.37	断层气
邵家庄 2	0.000 4	78.52	20.210	0.92	0.001 4	0.34	断层气
边沟	0.000 2	68.27	24.680	1.65	0.000 8	5.34	水溶气
边沟 0	0.000 4	78.39	20.390	0.92	0.001 8	0.26	断层气
边沟 1	0.000 3	78.49	20.280	0.92	0.001 5	0.27	断层气
边沟 2	0.000 4	78.55	20.120	0.92	0.001 4	0.37	断层气

官泉和华亭南泉中 CO₂ 分别达 27.13%和 34.37%(采样时间同为 11 月初)。CO₂ 的来源与成因是多方面的, 也是极为复杂的。它可以来源于地幔、地壳和大气。仅在地壳内, CO₂ 的成因可以是无机的也可以是有机。无机成因包括岩浆分异脱气或碳酸盐分解等多种类型; 有机成因又包括有机物氧化、裂解、微生物降解等类型。目前, 尚无确切区分 CO₂ 成因来源的有效方法。只能根据环境、构造等条件作一些宏观的笼统的分析, 但往往有较强的多解性。本区壳内低 CO₂ 的特征无疑与地壳的结构构造有关, 如: 本区碳酸盐地层欠发育, 无新生代火山, 第四系岩浆活动不明显, 热水为中低温型, 无岩浆类附加热源, 地壳厚度较大(45~52 km)等。

4 结论

(1) 海原活动断裂上脱气以地壳脱气作用为主, 脱气作用的强弱与断层部位、活动性、活动强度密切相关。

(2) 活动断裂上以 H₂、He、Rn、Hg 等元素的脱气作用较为显著, 可以作为断层活动性的示踪剂。Rn 能反映浅部断层的活动与作用, H₂、Hg 则能反映较深构造的作用与动态, 高 H₂ 往往与深部岩水作用有关。

(3) 根据断层气、水溶气、溢出气 3 种类型气体的组分与同位素特征, 断层气与第四系潜水水溶气受大气的影响最强, 深部地壳脱气作用的信息相对比较少, 只有氢、汞等个别元素能有一定程度的反映; 断裂带深循环水的水溶气、溢出气反映深部构造脱气作用的能力较强。

文中地下水、断层气中同位素均由国家重点实验室——气体地球化学实验室文啟彬、孙明良教授在 MAT251 质谱仪、VG5400 质谱仪上完成, 气体组分由李立午高级工程师在 MAT271 质谱仪上完成。

[参考文献]

[1] 中国地震局地质研究所, 宁夏地震局. 海原活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
[2] 林长佑, 等. 天水地区莫霍面附近的高导层及壳幔过渡带[J]. 地震学报, 1995, 17(2): 230—236.
[3] 刘英俊, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
[4] 国家地震局华北地球化学背景场课题组. 华北地震水文地球化学研究[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.

机场拖机道口旧跑道,从扩建工程区南段通过.未来百年内,该断层不至于发生 6.5 级以上地震,但不能排除 5.5 级左右中强随机地震发生的可能性,从而使中川机场扩建工程区场地遭到地震烈度 VII 度的影响.

秦王川盆地形成于第四纪.盆地基底为前寒武系、下古生界及下白垩统、上第三系,上覆上更新统及全新统,厚 30~60 m,为被东、西缘断裂控制的一断陷盆地.

[参考文献]

- [1] 甘肃省地质矿产局.甘肃区域地质志[M].北京:地质出版社,1989.
- [2] 陕西地矿局第二水文地质队.黄河中游区域工程地质[M].北京:地质出版社,1986.

SURVEYING OF SUBSURFACE ACTIVE FAULT IN THE SITE OF ZHONGCHUAN CIVIL AIRPORT EXTENSION OF LANZHOU

ZHANG Xiang-hong, YANG Bin, ZHOU Jun-xi, WANG Ai-guo
(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: By the comprehensive study of geology, geomorphology, physical probing, trenching and boring, a subsurface fault is found along the west edge of Qinqiangchuan basin, which stretches to the NNW and crosses the site of Zhongchuan airport extension. Some related issues of the fault, such as the dimension, segmentation and active time are investigated in detail and the effects of the fault to the site are scientifically evaluated.

Key words: Subsurface structure; Active fault; Zhongchuan airport

(上接 451 页)

THE CRUST DEGASIFICATION ALONG THE HAIYUAN ACTIVE FAULT

JIANG Dayong, CHEN Wen-bin, SHI Ya-liu
(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The structural aerogeochemistry process along the earthquake-generating fault of the Haiyuan ($M_s 8.5$ earthquake) in 1920 is discussed based on the experimental result. The degassing on the Haiyuan active fault is mainly crust degasification, in which the contents are mainly from middle-upper crust. The degassing intensity is closely correlated to the fault stress state as well movement characteristics. The different degassed elements reflect different depth and characteristics. Radon reflects shallow depth and tension, mercury and Helium reflect relative deep depth, and hydrogen reflects obduction or nappe or rock-water reaction on the fault surface.

Key words: Active fault; Crust; Degasification; Haiyuan fault