

doi: 10. 3969/j. issn. 0253 - 4967. 2011. 01. 012

海原断裂带东南段土壤气体 地球化学特征

周晓成^{1,2)} 王传远³⁾ 柴炽章⁴⁾ 司学芸⁴⁾ 雷启云⁴⁾
李营²⁾ 谢超²⁾ 刘胜昌⁵⁾

- 1) 中国科技大学地球和空间科学学院, 合肥 230026
- 2) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036
- 3) 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003
- 4) 宁夏回族自治区地震局, 银川 750001
- 5) 河北理工大学, 唐山 063009

摘要 在海原断裂带东南段4个地点跨断层测量了土壤气中 He、H₂、N₂、O₂、CH₄、C₂H₆、Rn 和 Hg 的浓度及 He、H₂、CH₄、Rn 和 Hg 的通量。测量结果表明, N₂/O₂、Hg 和 Rn 的背景值分别是 4.2、50.4 ng/m³ 和 5.8 kBq/m³; 土壤气中 He 和 CH₄ 在海原断裂带东南段端部有强烈异常, 并且脱气强烈, 通量分别达到 6.9 mg m⁻² d⁻¹ 和 390 mg m⁻² d⁻¹; 土壤气中 H₂ 和 Rn 是指示海原断裂东南段破裂位置非常有利的气体组分, 在靠断裂中部区域通量达到最高, 分别为 5.5 mg m⁻² d⁻¹ 和 828.6 mBqm⁻² s⁻¹; 土壤气中 Hg 在断裂带的异常可作为指示断裂破裂位置的参考信号, 其通量最高达到 211.2 ng m⁻² h⁻¹。

关键词 海原断裂带 土壤气 地球化学

中图分类号: P315.72⁺4

文献标识码: A

文章编号: 0253 - 4967(2011)01 - 0123 - 10

0 引言

大地震一般都能形成大规模的地表破裂带, 造成巨大的经济损失和人员伤亡(Ma *et al.*, 2006; 张培震等, 2009)。1920年海原地震形成长240km的地表破裂(邓起东等, 1987)。海原断裂带东南段位于南北地震带北段。汶川地震之后, 南北地震带北段成为研究热点。土壤气体的地球化学特征可反映地震活动断层的活动情况。在美国的圣安德烈斯断裂、日本的驹津川和牛首断层、意大利的Pernicana断裂与中国的福州隐伏断裂(King *et al.*, 1996; Giammanco *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2006b)上观测到了土壤气中Rn、Hg、CO₂、He、H₂和CH₄等组分的显著异常。海原断裂带为地下气体逃逸提供了良好的通道, 在该断裂带中西段的土壤气测量表明Rn、Hg和H₂在断层附近形成高值异常带(姜大庸等, 1990, 2000)。目前, 在海原断裂带东南段土壤气测量研究较少。因此, 本次研究区域选择了海原断裂带东南段。本文的主要目的是讨论海原断裂带东南段的气体地球化学特征及其与断层的关系。

(收稿日期) 2009 - 10 - 19 收稿, 2010 - 06 - 17 改回。

(基金项目) 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(0207690234)资助。

1 地震地质概况

海原断裂带西起甘肃景泰,经宁夏海原,东至固原,宽 1~3km,长 240km,由 11 条次级剪切断层组成。断裂走向在海原以西为 $280^{\circ} \sim 290^{\circ}$,海原以东为 320° (国家地震局地质研究所等,1990)。根据断裂几何形态、地貌和活动习性,可以将海原断裂带分为西、中、东 3 段(Zhang *et al.*,2003)。本次研究区域主要是硝口-蔡祥断层,它是海原走滑断裂东南段的一条最主要的次级剪切断层。硝口-蔡祥断层南起固原硝口,向北经响水沟、叶家河、上大寨、猫儿沟,北端终止于唐家山西北,控制了小南川盆地东北缘。硝口-蔡祥断层全长 55km 左右,走向为 $320^{\circ} \sim 330^{\circ}$,从整体来看,是一条主断层面倾向 SW 的逆走滑断层(图1)。硝口-蔡祥断层主要发育于下白垩系六盘山群与渐新统和中新统红层之间,主断面向 SW 倾斜,断层破碎带宽度达数十 m 至一二百 m,带内常发育次级断层,形成一条复杂的断裂带。地表沿断裂带可形成宽度为几 m 至几十 m 的槽形地带及小型地堑构造,有时也可见到小型正断层,尤其是 1920 年海原地震地表破裂带常表现为这种构造地貌组成的负地形带,并伴随明显的左旋走滑位移,错距为数 m。与这种表层构造相伴随,常见断层上盘六盘山群逆冲到断层下盘新近纪地层之上,在这种逆走滑断层带中还夹入了晚第四纪黄土和全新世地层,同一地段又使河流、冲沟发生如上所述的左

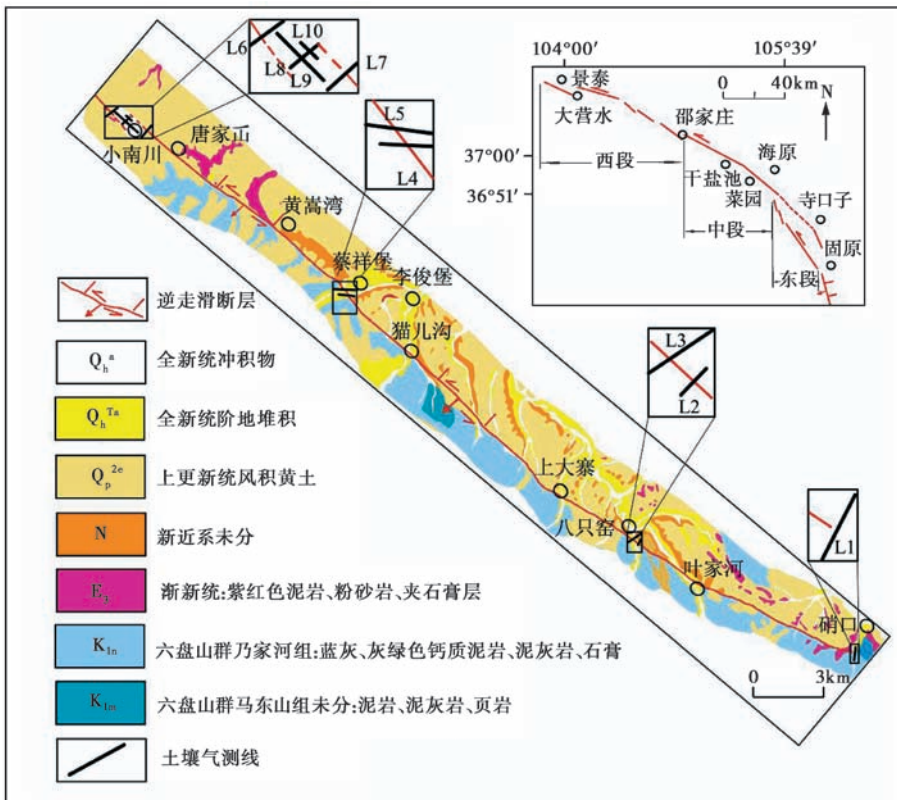


图1 海原断裂带东南段地质构造图以及土壤气测线分布图(据国家地震局地质研究所等,1990; Zhang *et al.*,2003)

Fig. 1 Geological and tectonic map of the southeastern part of Haiyuan Faults and distribution of soil gas samplings (after Institute of Geology, State Seismological Bureau *et al.*,1990; Zhang *et al.*,2003).

旋变位(国家地震局地质研究所等,1990)。

2 测量方法

在海原断裂东南段硝口、八只窑、蔡祥堡和小南川进行了土壤气测量,测量分2段时间完成,2007年10月20日至11月10日现场测量了土壤气中的 He、H₂、O₂、N₂、Hg、CH₄ 和 C₂H₆ 的浓度,测线是 L1~L10; 2008年4月25日至5月6日在原来测线的位置测量了土壤气中的 Rn 的浓度,测线是 L1~L9,测点间距为 10~30m(图1),测点主要位于河流阶地和河漫滩上。在断裂带气体异常区进行气体逸散通量测量,L1~L7 每个测线有 1 个通量测点,T8 测点位于小南川盆地中央。

土壤气体组分的浓度测量采样使用传统方法(周晓成等,2007;李营等,2009)。气汞采用 RA-915⁺ 型塞曼效应汞分析仪现场测量,检测限为 1ng/m³; He、H₂、N₂、O₂、CH₄ 和 C₂H₆ 采用 Agilent Macro 3000 便携式气相色谱仪测量,He 和 H₂ 的检测限为 10ppm,CH₄ 和 C₂H₆ 的检测限为 50ppm; 气氦采用 RAD7 测氦仪现场测量。土壤气体组分的浓度测值的误差都 <10%。

气体逸散通量观测采用静态暗箱法(Nakano *et al.*,2004;Lehmann *et al.*,2004;Wang *et al.*,2006a)。采样箱用 5mm 厚白色不透明的聚四氟乙烯制成半径为 20cm 的半球壳。He、H₂、CH₄ 的通量测量是用针管抽取气样现场测量,观测时间为 1h,每间隔 5min 抽取观测箱内气体 1 次,并记下取气样时的箱内温度以及观测前后的大气温度和气压。土壤气氦是测氦仪连续循环抽气 1h,5min 测得 1 个值。土壤气汞也是测汞仪连续循环抽气 20min,1s 测得 1 个值。

3 结果

3.1 海原断裂带东南段土壤气组分浓度分布特征

在海原断裂带东南段,土壤气中 He、H₂、N₂、O₂、CH₄、C₂H₆ 和 Hg 浓度测点共 268 个,土壤气 Rn 的浓度测点共 220 个。海原断裂带东南段土壤气中 Rn、Hg、He、H₂、N₂、O₂ 和 CH₄ 浓度的空间分布有很大差异。C₂H₆ 在所有测点的浓度都低于检测限。在断裂带东南端硝口,土壤气中 He、N₂/O₂ 和 CH₄ 浓度达到最高,分别是 65.3ppm、16.1(空气 N₂/O₂ = 3.7) 和 537.7ppm。在靠断裂带中部的蔡祥堡,土壤气中 H₂ 和 Rn 浓度达到最大,分别是 369.7ppm 和 38.3k Bq/m³; 在断裂带北端小南川,Hg 的最大值为 245ng/m³(图2~5,表1)。

3.2 土壤气组分浓度的背景值和异常界

通过对 N₂/O₂、Hg 和 Rn 数据进行 Kolmogorov-Smirnov 检验判断分布类型,结果为 3 个变量都 $p < 0.05$ 。因此,N₂/O₂、Hg 和 Rn 数据是非正态分布。最后,对数据进行对数转换来更好地进行正态拟合,计算几何平均值。N₂/O₂、Hg 和 Rn 的背景

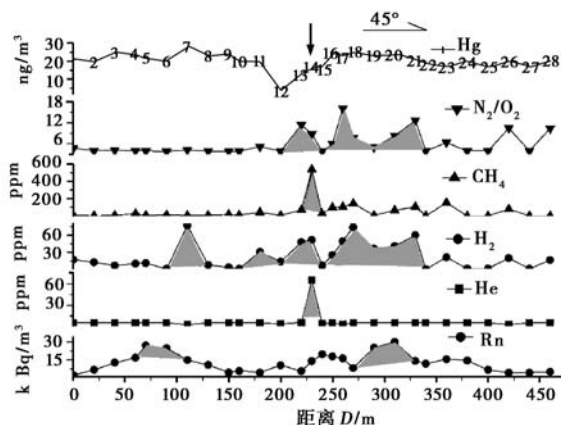


图2 硝口地区的土壤气测线(L1)浓度分布图

Fig. 2 Distribution of concentration of soil gas at Xiaokou. 阴影代表异常区,箭头代表断裂所在位置

表 1 海原断裂带东南段土壤气浓度分布范围和平均值

Table 1 Range and average values of soil gas in the southeastern part of Haiyuan Fault zone

组分(单位)	硝口		八只窑		蔡祥堡		小南川	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
He(ppm)	- ~ 65.3	-	~ 17	-	- ~ 49.8	-	- ~ 21.7	-
H ₂ (ppm)	- ~ 77.3	-	~ 99.1	-	- ~ 369.7	-	- ~ 35	-
CH ₄ (ppm)	- ~ 537.7	-	-	-	-	-	-	-
N ₂ /O ₂ (v/v)	3.8 ~ 16.1	5.5	3.8 ~ 4.6	4.0	3.9 ~ 7.7	4.4	3.3 ~ 4.3	3.9
Hg(ng/m ³)	4 ~ 28	19.4	3 ~ 107	32.7	5 ~ 215	87.1	3 ~ 245	60.5
Rn(kBq/m ³)	2.5 ~ 30.3	10.6	1 ~ 12.9	3.7	1.3 ~ 38.3	5.6	2.2 ~ 12.9	5.9

注 “-”代表低于检测限。

值分别是 4.2、50.4 ng/m³ 和 5.8 k Bq/m³。一般在非活动断裂地区土壤气中 He 的浓度接近空气浓度 5.2 ppm(Baubron *et al.*, 2002), H₂ 的浓度 < 1 ppm(Turhan *et al.*, 2007)。在本次测量中, 在非断裂区域 He 和 H₂ 的浓度都低于仪器的检测限是 10 ppm, 因此, 把 He 和 H₂ 的异常界定为 10 ppm。N₂/O₂、Hg 和 Rn 的异常界使用 QQ 图来定(Ciotoli *et al.*, 2007), 最后确定异常界为: N₂/O₂ 是 4.33, Hg 是 174 ng/m³, Rn 是 10.8 k Bq/m³。

3.3 土壤气中 He、H₂、CH₄、Hg 和 Rn 通量变化特征

海原断裂带东南段断层部位土壤气中 Rn、Hg、He、H₂、和 CH₄ 的 8 个通量测点空间分布也有很大的差异。在硝口 T1 测点, He 和 CH₄ 的通量达到最大值, 分别为 6.9 和 390 mg m⁻² d⁻¹, 其它点低于检测限。在八只窑 T3 和蔡祥堡 T4 测点, H₂ 通量分别是 5.5 和 4.6 mg m⁻² d⁻¹, 其它点低于检测限。在八只窑 T2 测点, 土壤气汞通量达到最高值, 为 211.2 ng m⁻² h⁻¹。在蔡祥堡 T5 测点, 土壤气氡通量最高值达到 828.6 m Bqm⁻² s⁻¹ (表2)。

4 讨论

4.1 土壤气中 He 和 CH₄ 在海原断裂带东南段端部有强烈异常

在海原断裂带东南段端部的测点主要分布在河漫滩上, 河流沉积物以粗砂为主, 含少量砾石。土壤气测量测线 L1 第 14 点位于海原断裂带上, 在这里有大量的冒气泡的泉眼出现。在 14 点及附近, CH₄ 异常值达到 537.7 ppm, He 异常值最高为 65.3 ppm (图2)。在八只窑、蔡祥堡和小南川土壤气中 He 异常幅度较小, 而 CH₄ 低于检测限。这些异常特征可能主要与断裂端部的应力和土壤气体 He、CH₄ 的来源有关。

海原左旋走滑断裂带东南端存在一个强烈的挤压应力区, 而六盘山地区位于它的南部, 在构造性质上属于海原活动断裂带的端部挤压调整区(国家地震局地质研究所等, 1990)。岩石、岩体中稀有气体 He 的发射能反映地质体中现存的应力状态, 在应力集中带 He 有明显的发射, 在量值上比空气高几十倍, 而且可以随应力集中带的迁移而迁移(Zhu *et al.*, 2003)。He 有高的活动性和在水中有低的溶解度的特性, 由于这些原因 He 有很高的扩散特性, 扩散系数比 N₂、O₂ 高 10 倍左右。在硝口, 泉水溢出气中 ³He/⁴He (R/Ra) 的值为 0.02 (³He/⁴He (R/Ra) < 1), 这说明 He 气主要来自壳源(姜大庸等, 2000)。硝口土壤气中 He 的通量远远高于大陆地表 He 的通

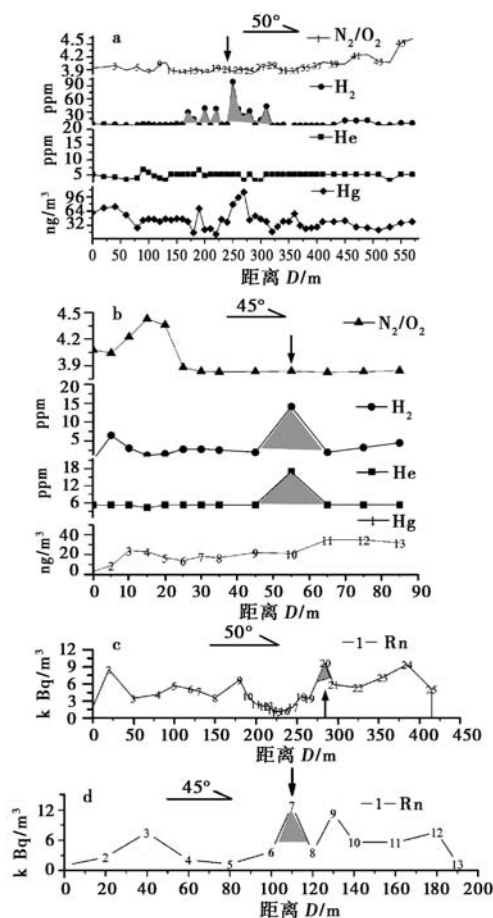


图3 八只窑地区的土壤气测线浓度分布图

Fig. 3 Distribution of concentration of soil gas at Bazhiyao.

a L2 测线, b L3 测线, c L2 测线, d L3 测线;
阴影代表异常区, 箭头代表断裂所在位置

量 $1.5 \times 10^{-5} \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Sano *et al.*, 1986)。海原左旋走滑断裂带东南端的应力集中可能是控制土壤气 He 浓度异常的主要因素。

海原断裂带东南段处于六盘山盆地的西南缘, 而六盘山盆地有极其丰富的油气显示, 在平面上也主要分布在盆地西南部的山前带, 在地表露头及浅井钻探中, 白垩系及新近系中均见到了油气显示(李昌鸿, 2009)。在硝口, 土壤气 CH_4 的通量与意大利 Siena Graben Arbia 断层土壤气中甲烷的通量 $80 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Etiope *et al.*, 2002) 相比, 是比较高的。因此, 在硝口测得的 CH_4 可能主要来自地下埋藏的天然气藏。

4.2 土壤气中 H_2 和 Rn 是指示海原断裂破裂位置非常有利的指标

在测线 L1 ~ L6 及 L8 与断裂带相交处, 土壤气中 H_2 的浓度都有明显的异常(图2 ~ 5)。在

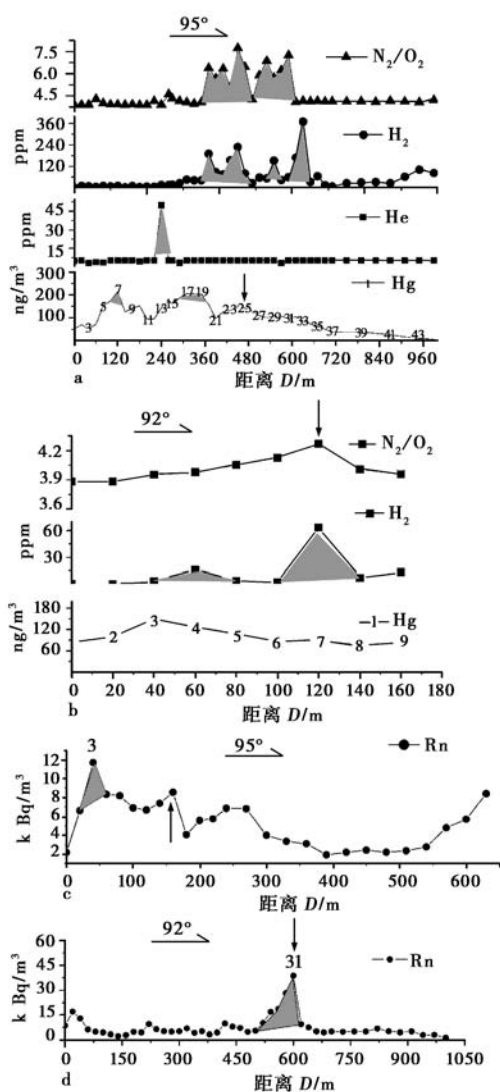


图4 蔡祥堡地区的土壤气测线浓度分布图

Fig. 4 Distribution of concentration of soil gas at Caixiangpu.

a L4 测线, b L5 测线, c L4 测线, d L5 测线;
阴影代表异常区, 箭头代表断裂所在位置

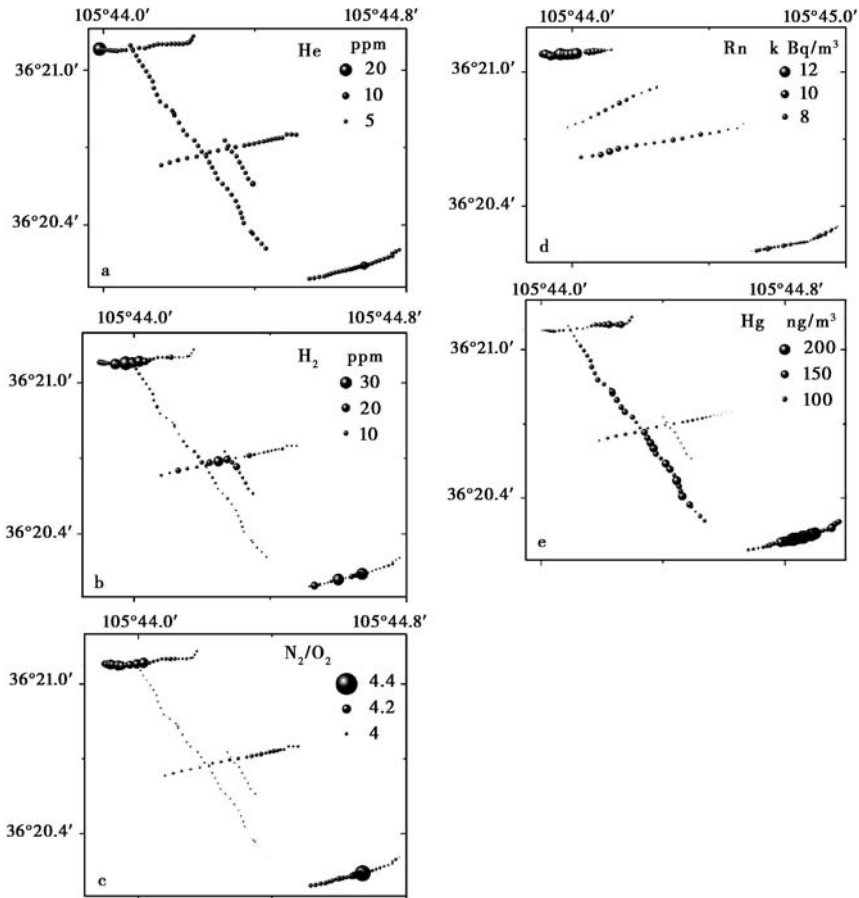


图5 小南川地区的土壤气测线浓度分布图

Fig. 5 Distribution of concentration of soil gas at Xiaonanchuan.
a He; b H₂; c N₂/O₂; d Rn; e Hg

表2 海原断裂带东南段 Rn 和 Hg 的逸散通量

Table 2 Flux of Rn and Hg in soil gas in the southeastern part of Haiyuan Fault zone

测项(单位)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
	硝口	八只窑	八只窑	蔡祥堡	蔡祥堡	小南川	小南川	小南川
Hg(ng m ⁻² h ⁻¹)	57.6	211.2	158.4	33.6	86.4	110.3	153.6	33.6
Rn(m Bqm ⁻² s ⁻¹)	297.3		226.4		828.6	32.0	337.3	5.2

硝口, L1 测线上土壤气中 H₂ 的浓度异常宽度 250m, 在八只窑测线 L3 上异常宽度 160m, 在蔡祥堡测线 L4 上异常宽度 300m。在测线 L1 ~ L6 上, 土壤气中 Rn 浓度在断裂带及附近都有明显的异常, 异常宽度 20 ~ 150m。土壤气中 H₂ 和 Rn 异常在断裂中部蔡祥堡达到最大值, 而在断裂两端异常幅度相对较小。

土壤气中 H₂ 和 Rn 异常特征与其来源以及断裂带内破裂有很大关系。断裂带内的 H₂ 主要来源于断裂带裂隙的新生表面和水发生反应生成的 H₂(Kameda *et al.*, 2003)。因此, 断裂带

的破裂强度越大,破裂新生裂隙越多,相应生成的 H_2 也越多。Wakita 等(1980)沿 Yamasaki 走滑断裂带测得土壤气中 H_2 浓度高达 3%。加拿大安大略省东南部康沃尔市江边沼泽地里的 2 个气体喷发点上 H_2 的通量是 $0.58 \mu\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Poissant *et al.*, 2007), 远小于八只窑 T3 测点的通量。海原断裂带东南段土壤气 Rn 主要来源于土壤中富含放射性铀、钍系列元素的岩石。海原断裂带白垩纪地层主要是六盘山群乃家河组,该组碳酸盐、砂岩和泥岩的铀和钍的平均含量分别是 6, 6, <5 和 10, 10, 10ppm, 高于中国东部碳酸盐平均铀和钍含量(白生明等, 2003)。同心-海原-固原盆地砂岩型铀矿主要物质来源是六盘山前白垩纪地层,其次为白垩系露头剥蚀区,而且寒武纪、二叠纪、石炭纪地层区域伽马底数均较高,并已发现众多铀矿化点及异常点带(吕森等, 2009)。新生破裂的产生使岩石的氡射气表面积增大,射气能力增加。土壤气氡在断裂带中部蔡祥堡 T5 测点的通量比有代表性的陆地表面土壤气氡通量 $15.5 \text{m Bqm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Wilkening *et al.*, 1972) 高出 53 倍。在意大利中部的 Fucino 山间盆地,土壤气氡通量在非断层地区一般是 $10 \text{m Bqm}^{-2} \text{s}^{-1}$, 在断层区一般在 $45 \text{m Bqm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上,最高可以达到 $120 \text{m Bqm}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Ciotoli *et al.*, 2007)。

在测线 L1、L2、L4、L6 和 L9 与断裂带相交处,土壤气中 N_2/O_2 都有明显的异常(图 2~5), 特别是在测线 L1、L4、L6 和 L9 上,土壤气中 N_2/O_2 在断裂带上和 H_2 的异常对应非常好。在硝口, N_2/O_2 异常值最高为 16.3, 异常宽度达到 142m。土壤气中的 O_2 和 N_2 主要来自空气,海原断裂带东南段土壤气中 O_2 与 N_2 和 H_2 的相关系数分别是 -0.4 和 -0.48, 土壤气中 O_2 浓度减少主要是植物的根系吸收,嗜氧细菌消耗引起(Hanslin *et al.*, 2005), 另外还有一部分可能是氢气与氧气发生反应而引起(Ota *et al.*, 2007)。

4.3 土壤气中 Hg 在断裂带的异常可作为指示断裂破裂的参考指标

土壤气 Hg 在海原断裂带异常较少,只在测线 L2 和 L9 与断裂带相交处,土壤气中 Hg 有明显的异常(图 4, 5)。并且,在 L1 测线上的 12 点,土壤气中 Hg 浓度很低,只有 4ng/m^3 。土壤气中 Hg 的分布特征表明在海原断裂带有几个主要因素控制 Hg 的浓度。从土壤气 Hg 浓度分布可以看出位于河流阶地的农田里的土壤气 Hg 的浓度要明显高于河漫滩上的测点,主要有 2 个原因,一是河漫滩沉积物空隙大,储气性差,二是阶地农田里施用肥料和农药,造成土壤中 Hg 的浓度增加(王荔娟等, 2007)。所以,在 4 个区域土壤气 Hg 的测量受人为因素干扰较大,其主要来源不仅有地壳深部而且有许多人为污染源。在硝口,偏低 Hg 值可能的原因是在 12 点附近发现了大量泉眼流出的硫磺,硫磺与汞易发生反应生成硫化汞沉淀,使 Hg 浓度偏低(图 4)。在美国内华达州背景区域测得土壤气汞通量 $4.2 \text{ng m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Gustin, 2003)。Wang 等(2006a)在重庆市农田土壤表面测得的土壤气汞通量是 $(85.8 \pm 32.4) \text{ng m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。海原断裂带土壤气汞通量与之相比,也是明显偏高。因此,土壤气中 Hg 在断裂带的异常,在指示断裂破裂的位置时可作为很好的参考指标。

5 结论

在海原断裂东南段进行了土壤气测量,结果表明: N_2/O_2 、Hg 和 Rn 的背景值分别是 4.2、 50.4ng/m^3 和 5.8kBq/m^3 ; 在海原断裂带东南段端部土壤气中 He 和 CH_4 有显著异常,并且脱气强烈; 土壤气中 H_2 和 Rn 是指示海原断裂东南段破裂位置非常有利的组分,在靠断裂中部通量最高; 土壤气中 Hg 在断裂带的异常可作为指示断裂破裂位置的参考指标。

参 考 文 献

- 白生明,李慧琴,毛自力.2003.中国六盘山地区白垩纪地层地球化学特征 [J].宁夏工程技术,2(2):105—110.
- BAI Sheng-ming,LI Hui-qin,MAO Zi-li.2003.The chemical features of Cretaceous earth layer in Liupan Mountains area in China [J].Ningxia Engineering Technology,2(2):105—110(in Chinese).
- 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 [A].见: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.
- DENG Qi-dong,ZHANG Wei-qi,WANG Yi-peng,et al.1987.Haiyuan Fault zone and formation mechanism and characteristics of surface rupture of the Haiyuan earthquake in 1920 [A].In: State Seismological Bureau,SSB(ed).Research on Recent Crustal Movement(3).Seismological Press,Beijing.9—25(in Chinese).
- 国家地震局地质研究所,宁夏回族自治区地震局.1990.海原活动断裂带 [M].北京:地震出版社.234—855.
- Institute of Geology,State Seismological Bureau,Seismological Bureau and Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region.1990.Haiyuan Active Fault Zone [M].Seismological Press,Beijing.234—855(in Chinese).
- 姜大庸,陈文彬,石雅留.2000.海原活动断裂的地壳脱气作用 [J].西北地震学报,22(4):447—464.
- JIANG Da-yong,CHEN Wen-bin,SHI Ya-liu.2000.The crust degasification along the Haiyuan active fault [J].Northwestern Seismological Journal,22(4):447—464(in Chinese).
- 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.
- JIANG Da-yong,YAN Xian-chen.1990.Preliminary study of fluid geochemical field on Haiyuan active fault [J].Seismology and Geology,12(1):63—68(in Chinese).
- 李昌鸿.2009.六盘山盆地西南缘构造与油气勘探潜力分析 [J].成都理工大学学报(自然科学版),36(3):243—248.
- LI Chang-hong.2009.Structure and hydrocarbon potential of the southwestern margin in the Liupanshan Basin of China [J].Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology Edition),36(3):243—248(in Chinese).
- 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,32(1):82—91.
- LI Ying,DU Jian-guo,WANG Fu-kuan,et al.2009.Geochemical characteristics of soil gas in Yanqing-Huailai Basin, North China [J].Acta Seismologica Sinica,31(1):82—91(in Chinese).
- 吕森,姚泽洪.2009.宁夏六盘山地区同海固盆地砂岩型铀矿成矿地质条件研究 [J].中国科技信息,7:16—17.
- LÜ Sen,YAO Ze-hong.2009.Metallogenic geological conditions of sandstone-type uranium deposit in Tonghaigu Basin, Liupanshan area,Ningxia [J].China Science and Technology Information,7:16—17(in Chinese).
- 王荔娟,胡恭任.2007.土壤/沉积物中汞污染地球化学及污染防治措施研究 [J].岩石矿物学杂志,26(5):453—461.
- WANG Li-juan,HU Gong-ren.2007.A study of pollution geochemistry and pollution prevention measures of mercury in soil/sediment [J].Acta Petrologica et Mineralogica,26(5):453—461(in Chinese).
- 张培震,闻学泽,徐锡伟,等.2009.2008年汶川8.0级特大地震孕育和发生的多单元组合模式 [J].科学通报,54(7):944—953.
- ZHANG Pei-zhen,WEN Xue-ze,XU Xi-wei,et al.2009.Tectonic model of the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008,Sichuan,China [J].Chinese Science Bulletin,54(7):944—953(in Chinese).
- 周晓成,郭文生,杜建国,等.2007.呼和浩特隐伏断层土壤气氡、汞地球化学特征 [J].地震,27(1):70—76.
- ZHOU Xiao-cheng,GUO Wen-sheng,DU Jian-guo,et al.2007.The geochemical characteristics of radon and mercury in the soil gas of buried faults in the Hohhot district [J].Earthquake,27(1):70—76(in Chinese).

- 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) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 69—81.
- Ciotoli G, Lombardi S, Annunziatellis A. 2007. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112: B05407. 1-B05407. 23.
- Etiopie G, Klusman R W. 2002. Geologic emissions of methane to the atmosphere [J]. *Chemosphere*, 49: 777—789.
- Giammanco S, Gurrieri S, Valenza M. 1998. Anomalous soil CO₂ degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna(Sicily, Italy) [J]. *Bulletin of Volcanology*, 60: 252—259.
- Gustin M S. 2003. Are mercury emissions from geologic sources significant?: A status report [J]. *The Science of the Total Environment*, 304: 153—167.
- Hanslin H M, Sæbø A, Bergersen O. 2005. Estimation of oxygen concentration in the soil gas phase beneath compost mulch by means of a simple method [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(1) : 37—40.
- Kameda J, Saruwatari K, Tanaka H. 2003. H₂ generation in wet grinding of granite and single-crystal powders and implications for H concentration on active faults [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(20) : 2063. doi: 10.1029/2003GL018252.
- 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.
- Lehmann B E, Ihly B, Salzmann S, *et al.* 2004. An automatic static chamber for continuous ²²⁰Rn and ²²²Rn flux measurements from soil [J]. *Radiation Measurements*, 38: 43—50.
- Ma K F, Tanaka H, Song S R, *et al.* 2006. Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project [J]. *Nature*, 444: 473—476.
- Nakano T, Sawamoto T, Morishita T, *et al.* 2004. A comparison of regression methods for estimating soil-atmosphere diffusion gas fluxes by a closed-chamber technique [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(1) : 107—113.
- Ota M, Yamazawa H, Moriizumi J, *et al.* 2007. Measurement and modeling of oxidation rate of hydrogen isotopic gases by soil [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 97(2—3) : 103—105.
- Poissant L, Constant P, Pilote M, *et al.* 2007. The ebullition of hydrogen, carbon monoxide, methane, carbon dioxide and total gaseous mercury from the Cornwall Area of Concern [J]. *Science of the Total Environment*, 381: 256—262.
- Sano Y, Wakita H, Huang C. 1986. Helium flux in a continental land area estimated from ³He/⁴He ratio in northern Taiwan [J]. *Nature*, 323: 55—57.
- Turhan D, Toshiya M, Fumiaki T, *et al.* 2007. Soil H₂ and CO₂ surveys at several active faults in Japan [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 164(12) : 2449—2463.
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, *et al.* 1980. Hydrogen release: New indicator of fault activity [J]. *Science*, 210: 188—190.
- Wang D, He L, Shi X, *et al.* 2006a. Release flux of mercury from different environmental surfaces in Chongqing, China [J]. *Chemosphere*, 64: 1845—1854.
- Wang G, Liu C, Wang J, *et al.* 2006b. The use of soil mercury and radon gas surveys to assist the detection of concealed faults in Fuzhou City, China [J]. *Environment Geology*, 51: 83—90.
- Wilkening M H, Clements W E, Stanley D. 1972. Radon - 222 flux measurements in widely separated regions [A]. In: Adams J A S *et al.* (eds). *The Natural Radiation Environment II* , (pp. 717—730) Oxford: Elsevier.
- Zhang P, Min W, Deng Q, *et al.* 2003. Paleoearthquake rupture behavior and recurrence of great earthquakes along the Haiyuan Fault, northwestern China [J]. *Science in China (Ser D)* , 33(8) : 705—713.
- Zhu M, Zhou R, Yin D, *et al.* 2003. Stress emission of helium and argon in coal seams [J]. *Science in China(Ser D)* , 46(6) : 547—560.

THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SOIL GAS IN THE SOUTHEASTERN PART OF HAIYUAN FAULT

ZHOU Xiao-cheng^{1,2)} WANG Chuan-yuan³⁾ CHAI Chi-zhang⁴⁾ SI Xue-yun⁴⁾
LEI Qi-yun⁴⁾ LI Ying²⁾ XIE Chao²⁾ LIU Sheng-chang⁵⁾

1) School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3) Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

4) Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

5) Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China

Abstract

The concentration of soil gas He, H₂, N₂, O₂, CH₄, C₂H₆, Rn, Hg and flux of soil gas He, H₂, CH₄, Rn, Hg were surveyed at four sites (Xiaokou, Bazhiyao, Caixiangpu and Xiaonanchuan) in the southeastern part of Haiyuan Fault. Soil-gas concentrations of more than 200 samples were obtained. The results show that the background values of N₂/O₂, Hg, Rn were 4.2, 50.4 ng/m³ and 5.8 k Bq/m³, respectively. The maximum concentrations of He and CH₄ were 65.3 and 537.7 ppm, respectively, at the end of the southeastern part of Haiyuan Fault. Furthermore, soil gas He and CH₄ were intensively degassed. The maximum flux of He and CH₄ in soil gas was 6.9 and 390 mg m⁻² d⁻¹, respectively. These may be caused by stress concentration at the end of the southeastern part of Haiyuan Fault. H₂ and Rn in soil gas were powerful components as indicators of location of the southeastern part of Haiyuan Fault. The maximum concentrations of H₂ and Rn in soil gas were 369.7 ppm and 38.3 k Bq/m³ near the middle of the southeastern part of Haiyuan Fault. The maximum fluxes of H₂ and Rn in soil gas were 5.5 mg m⁻² d⁻¹ and 828.6 m Bqm⁻² s⁻¹, respectively. These may be related with the intensive rupture of the middle of the southeastern part of Haiyuan Fault. The anomalies of Hg in soil gas at the fault were good reference indicators. The maximum flux of Hg in soil gas was 211.2 ng m⁻² h⁻¹.

Key words Haiyuan Fault zone, soil gas, geochemistry

(作者简介) 周晓成,男,1978年生,2005年在中国地震局地震预测研究所获构造地质专业硕士学位,现为
中国科技大学在读博士生,助理研究员,主要从事构造地球化学、流体地球化学方面的研究,电话:
010-88015473, E-mail: zhouxiaocheng 188@163.com。