

刘洁,李莹,陈志,等. 2022. 陇县—宝鸡断裂带 CO<sub>2</sub> 气体地球化学特征及成因[J]. 地震研究, 45(2): 217–228, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0020.

Liu J, Li Y, Chen Z, et al. 2022. Geochemical characteristics and genesis of soil gas CO<sub>2</sub> in the Longxian – Baoji Fault Zone[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 217–228, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0020.

# 陇县—宝鸡断裂带 CO<sub>2</sub> 气体地球化学特征及成因\*

刘洁<sup>1</sup>, 李莹<sup>2\*</sup>, 陈志<sup>2</sup>, 王新<sup>1</sup>, 赵小茂<sup>1</sup>, 冯希杰<sup>1</sup>, 王景丽<sup>1</sup>

(1. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068; 2. 中国地震局地震预测研究所 中国地震局地震预测重点实验室, 北京 100036)

**摘要:** 陇县—宝鸡断裂带位于青藏块体东北缘, 属于鄂尔多斯块体西南缘弧形断裂束的最南段。为对比分析该断裂带的分段活动性强弱特征, 利用断裂带逸出气 CO<sub>2</sub> 的地球化学特征进行反演。布设 6 条跨断层土壤气 CO<sub>2</sub> 测线, 进行 2 期测量, 共计获取 150 个土壤气 CO<sub>2</sub> 组分浓度, 计算了气体的相对活动强度; 收集了 60 件 CO<sub>2</sub> 气体样品, 测试了其碳同位素组成。结果表明: 岐山—马召断裂的气体活动强度 (1.56~2.70) 比固关—虢镇断裂的气体活动强度 (1.73~1.75) 大, 且岐山—马召断裂上的 CO<sub>2</sub> 碳同位素组成比固关—虢镇断裂上的 CO<sub>2</sub> 更靠近深部物质端元。位于南段的岐山—马召断裂的地下构造连通性较好, 断裂闭锁程度较低, 而位于北段的固关—虢镇断裂气体活动性较弱, 闭锁程度较高, 未来发生地震的危险性较高。

**关键词:** 土壤气 CO<sub>2</sub>; 气体活动强度; 碳稳定同位素; 断层活动性

**中图分类号:** P315.724

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2022)02-0217-12

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0020

## 0 引言

断裂带是地壳深部气体释放的主要通道, 大量的研究表明, 活动断裂带上的土壤气浓度往往要高于其它地区 (Walia *et al*, 2009; Seminsky, Demberel, 2013; Li *et al*, 2013; Wang *et al*, 2014; Chen *et al*, 2020; 孙小龙等, 2020)。当断裂带处于构造活动活跃期时, 地壳介质中水-岩之间原有的平衡被打破, 地下水中的气体组分会出现异常变化, 例如 King 等 (1996)、Giammanco 等 (1998)、Wang 等 (2006) 在美国圣安德烈斯断裂、日本迹津川和牛首断层、中国福州隐伏断裂观测到土壤气中 CO<sub>2</sub>、Rn、Hg、He、H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 等组分的显著异常。空间上, 对横跨

断裂的土壤气体地球化学研究表明, 在断层破碎带上测点的气体含量普遍高于断裂两侧, 极震区地下气体逸出量明显高于极震区以外的地区, 如 2018 年汶川 M<sub>s</sub>8.0 地震断裂剖面上土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度背景值高于无断裂出露的地区, 且距震中越近, 断裂剖面上土壤气 CO<sub>2</sub> 的浓度则越高 (周晓成等, 2017)。时间上, 土壤气异常的持续时间与临震的震级可能也具有相关性, 如 2013 年中国台湾瑞穗 M<sub>L</sub>6.4 地震前 2 个月土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度明显升高, 而 2014 年花莲 M<sub>L</sub>5.9 地震前 3 周也出现了土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度异常 (Fu *et al*, 2017), 且异常幅度越大、异常持续时间越长, 对应的地震震级就越大。所以土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度值及其变化特征不仅可以用于断裂位置的判定, 还可以反映断层活动强弱状态。

\* 收稿日期: 2021-11-23.

基金项目: 中国地震局地震预测开放基金 (2021EFOF03)、陕西省自然科学基金 (2022JQ-254) 和中国地震局震情跟踪定向工作任务 (2022010502、2021010309) 联合资助。

第一作者简介: 刘洁 (1989-), 助理研究员, 主要从事地下流体地球化学研究工作。

E-mail: muzixiulj\_89@163.com.

✉ 通讯作者简介: 李莹 (1978-), 研究员, 主要从事活动构造带流体地球化学特征及地球深部流体成因研究工作。

E-mail: subduction6@hotmail.com.

随着地球化学分析仪器和测试手段的快速发展,气体同位素地球化学示踪方法被广泛应用于地震研究领域,成为研究深部构造以及活动性的一个重要手段(杜建国,刘从强,2003)。已有研究表明,地下气体( $\text{He}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ )及其同位素组成( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ )的变化是壳源流体与幔源流体的混合、迁移所造成的,并且当岩石受到震前地壳形变和同震破裂过程两种效应的影响时,岩石的渗流参数就会发生改变,从而导致地壳流体的释放(Weise *et al.*, 2001; Bräuer *et al.*, 2007; 王云等, 2015; Zhou *et al.*, 2020, 2021)。不同来源的气体同位素组成有所不同,这是土壤气同位素组成用来示踪深部来源物质的原理。Martino 等(2016)结合土壤气  $\text{CO}_2$  浓度和碳同位素组成,建立三端元混合模型,用来计算各端元所占比例。这一方法将断裂带气体溯源分析由定性研究推向了半定量研究,通过识别土壤气  $\text{CO}_2$  的来源,区分浅源和深源信息,可以更好地反演其成因演化机制,并推导出该区域断裂的地下构造连通性特征。

陇县—宝鸡断裂带属于鄂尔多斯块体西南缘弧形断裂束的最南段,主体呈现为走滑兼正断性质,属于晚第四纪活动断裂。李强(2013)、叶茂盛等(2018)、Su 等(2019)利用 GNSS 速度场资料研究鄂尔多斯西南缘的六盘山—陇县—宝鸡断裂带的闭锁特征,得到陇县—宝鸡断裂的北部闭锁程度较强,但由于 GNSS 观测基站较少等原因,

对于该断裂带南部闭锁程度的相关研究比较少。Yang 等(2021)通过土壤气  $\text{CO}_2$  的气体活动性强度和断层闭锁程度对比分析发现,当断层处于闭锁状态时,断裂活动状态相对较弱,土壤气  $\text{CO}_2$  的活动性也较弱。因此,针对陇县—宝鸡断裂带不同断裂的活动性和启闭性特征的研究,本文将利用该活动断裂上的 2 条跨断层土壤气测线的  $\text{CO}_2$  气体活动强度特征进行反演,并利用  $\text{CO}_2$  碳同位素组成来区分深浅物质来源特征,获取断裂带地下连通性特征,为研究区的地震趋势研判提供更精细的气体地球化学依据。

## 1 研究区地质背景资料

陇县—宝鸡断裂带地处南北地震带中段与北段的交接区、青藏块体东北缘、鄂尔多斯西南缘弧形断裂束的最南段(图 1),也是我国大陆 EW 向和 NS 向巨型构造带(南北构造带和阿尔金—祁连—秦岭—大别构造带)的交接地带,地质结构特征极具代表性。陇县—宝鸡断裂带主要由岐山—马召断裂、千阳—彪角断裂、固关—虢镇断裂和桃园—龟川寺断裂组成(Wang *et al.*, 2021),整体呈 NW 走向,其北部狭窄,向东南方向延伸逐渐散开,抵渭河盆地西部,并止于秦岭北麓附近,地貌上形成“一隆二拗”的构造格局(图 1)。研究区主体被第四系沉积物覆盖,断裂带北部大量出露白垩系砂岩、南部出露印支期花岗岩。

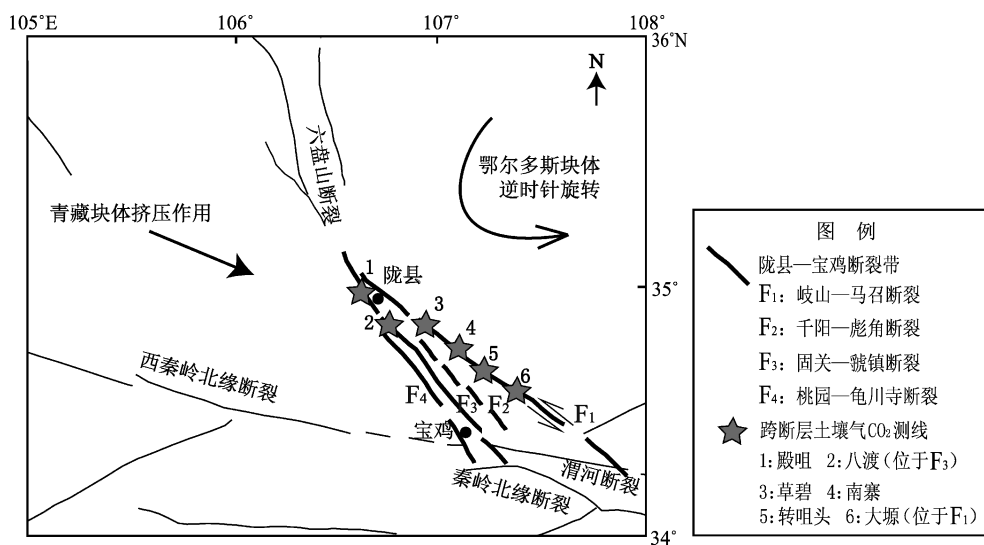


图 1 6 条跨断层土壤气  $\text{CO}_2$  测线分布

Fig. 1 Distribution of 6 survey profiles for surveying the soil gas  $\text{CO}_2$  in the Longxian - Baoji Fault Zone

受到青藏高原向东南方向的挤压作用, 岐山—马召断裂呈现左旋走滑运动的特征; 与此同时, 鄂尔多斯块体逆时针旋转产生了右旋走滑分量也叠加在该断裂上, 导致该区域受力作用十分复杂 (李新男, 2017)。张新科等 (2017) 对陇县—宝鸡断裂带的研究结果显示, 岐山—马召断裂及固关—虢镇断裂的地震活动比较活跃。岐山—马召断裂是整个断裂带内规模最大、活动性最强的断裂, 全长约 180 km, 整体呈 NW 走向 ( $300^{\circ} \sim 320^{\circ}$ ), 属晚第四纪活动断裂, 断裂以左旋走滑运动性质为主, 伴有一定的正断分量, 第四纪左旋走滑速率约为  $0.5 \sim 1.2 \text{ mm/a}$  (李新男, 2017)。固关—虢镇断裂总体走向  $325^{\circ} \sim 335^{\circ}$ , 长 130 km, 该断裂早期具有挤压逆冲性质, 但第四纪以来主要以正断层运动为主, 中更新世以来北段具有明显的走滑分量, 平均水平运动速率约为  $0.1 \text{ mm/a}$  (薛峰, 2014)。本文选取岐山—马召断裂上的草壁、南寨、转咀头、大源场地, 以及固关—虢镇断裂上的殿咀、八渡场地进行野外土壤气测量, 收集土壤气 CO<sub>2</sub>, 并进行碳稳定同位素分析。

## 2 分析测试方法

### 2.1 土壤气测量仪器及气体样品收集方法

每一条跨断层测线上的 15 个测点设置如图 2a 所示, 以断层中心为起点, 分别向两侧延伸 (李营等, 2009)。最开始 2 个测点间距为 10 m, 后 4 个测点间距 20 m, 测线总长度为 240 m。2018—2019 年完成了 2 期测量, 获取了 150 个 CO<sub>2</sub> 浓度数据。土壤气测量原理如图 2b 所示, 测量土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度使用杭州超距科技有限公司的便携式 ATG-C60 型二氧化碳分析仪, 检出限为 10 ppm。测量步骤为: ①开启仪器电源, 预热; ②接通进气和出气管, 测试空气值, 检查测值是否在合理范围内, 达标后方可使用; ③利用打孔钢钎在测点打孔, 孔深约 80 cm (王小娟等, 2016; Zhou *et al*, 2020; 刘兆飞, 2020), 拔出钢钎后将麻花钻气体取样器旋扭钻入采样孔中, 麻花钻顶部用土壤密封压实, 以防止空气混染; ④连接气路, 待 CO<sub>2</sub> 浓度达到峰值后, 开始记录测量值。

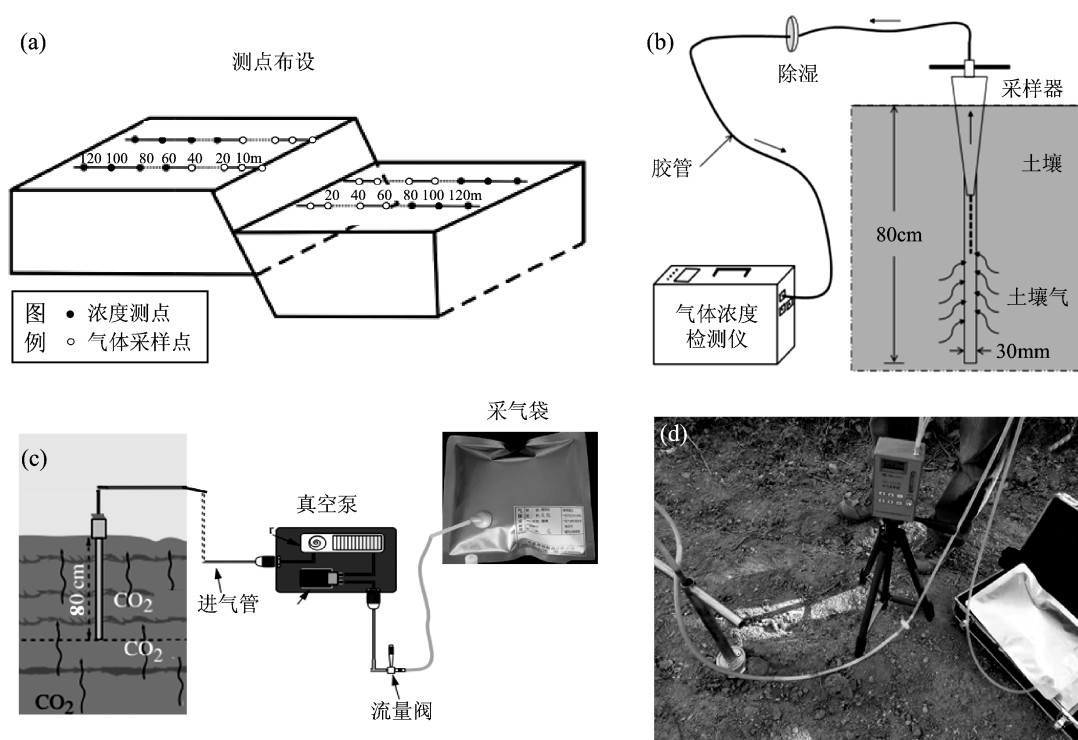


图2 土壤气测点布设 (a)、测量原理 (b)、气体收集原理 (c) 和野外操作示意 (d)  
Fig. 2 Deployment of measuring points for soil gas across the fault (a), schematic diagram of measurement (b), soil gas collection (c), and field observation (d)

土壤气  $\text{CO}_2$  收集原理和实地测量如图 2c、d 所示,在完成  $\text{CO}_2$  浓度测试后,将真空泵取样器连接到麻花钻上。收集气体样品步骤为:①将采样袋用该测点的土壤气润洗 3 次;②将真空泵取样器的流速设置为 1 L/min,采集 1 L 气体样品。如  $\text{CO}_2$  浓度低于 0.08%,加大采样量到 2 L。每条测线采集 10 个气体样品,总共收集 60 个样品。土壤气  $\text{CO}_2$  碳稳定同位素组成分析测试是在中国科学院地球环境研究所进行的,所使用的仪器为美国 Thermo Finnigan 公司的 Mass Spectrometer MAT-251 同位素质谱仪。由于野外采集的气体样品里面通常含有较高含量的  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$  等其它杂质气体,所以需要先对样品进行纯化:将装有样品的玻璃瓶通过玻璃磨口接入前处理系统,用液氮将样品中的  $\text{CO}_2$  和水冻住,之后稍微打开与气泵连接的活塞,将样品中的  $\text{O}_2$ 、 $\text{N}_2$  等杂气缓慢抽走,接着将气泵活塞关住,用酒精液氮冻住水,释放出来的纯  $\text{CO}_2$  用液氮在样品收集管收集后,再送入质谱仪进行检测。同时使用了实验室内部标准和 V-PDB 标准进行对比,获取高精度

和高准确度的碳同位素组成,分析测试误差为 0.1‰。

## 2.2 土壤气分析方法

### 2.2.1 土壤气 $\text{CO}_2$ 浓度特征分析方法

根据前人常用的断层活动性判定方法,分别计算了 6 条测线土壤气  $\text{CO}_2$  浓度的平均值 ( $\bar{M}$ )、中值 ( $M_{\text{med}}$ )、最大值 ( $M_{\text{max}}$ )、最小值 ( $M_{\text{min}}$ ) 和相对活动浓度 ( $H$ )。以每条测线各测点浓度的平均值作为背景值 ( $B$ ),对背景平均值各加、减 0.5 倍标准差作为土壤气  $\text{CO}_2$  浓度的异常上限 ( $A_u$ )、下限 ( $A_l$ ) (刘兆飞, 2020; Yang *et al.*, 2021)。将高于异常上限的测值视为与断层有关的异常值,并将异常区内的最大测值与背景值的比值定义为相对活动强度  $H = M_{\text{max}}/\bar{M}$  (邵永新, 2012),用以对比断层的相对活动性特征,结果见表 1。

### 2.2.2 土壤气 $\text{CO}_2$ 碳稳定同位素组成分析方法

不同来源的  $\text{CO}_2$  气体的碳同位素组成各不相同,土壤气  $\text{CO}_2$  的主要来源有深部无机物质来源和生物有机物质来源,它们与空气混合构成了三

表 1 2018—2019 年陇县—宝鸡断裂带 6 条测线 2 期土壤气  $\text{CO}_2$  测试结果

Tab. 1 Observed results of the soil gas  $\text{CO}_2$  in the 6 survey profiles in the Longxian-Baoji Fault Zone from 2018 to 2019

跨断层测线	测量日期	测点数	$\bar{M}$ (%)	$M_{\text{med}}$ (%)	$std$	$M_{\text{max}}$ (%)	$M_{\text{min}}$ (%)	$A_u$ (%)	$A_l$ (%)	$B$ (%)	$H$
殿咀	2018-06	15	1.02	1.00	0.35	1.73	0.48	1.19	0.84	1.02	1.70
	2019-07	10	1.10	0.93	0.52	1.93	0.55	1.36	0.84	1.10	1.75
	平均值	—	1.06	0.97	0.43	1.83	0.51	1.27	0.84	1.06	1.73
八渡	2018-06	15	0.93	0.83	0.30	1.60	0.63	1.09	0.78	0.93	1.71
	2019-07	10	1.00	0.84	0.55	1.78	0.37	1.27	0.72	1.00	1.78
	平均值	—	0.97	0.83	0.43	1.69	0.50	1.18	0.75	0.97	1.75
草碧	2018-06	15	1.01	0.72	0.60	2.36	0.54	1.31	0.70	1.01	2.35
	2019-07	10	1.32	1.32	0.39	2.03	0.85	1.51	1.12	1.32	1.54
	平均值	—	1.16	1.02	0.50	2.20	0.70	1.41	0.91	1.16	1.95
南寨	2018-06	15	1.00	0.74	0.57	2.64	0.43	1.28	0.71	1.00	2.65
	2019-07	10	1.11	1.15	0.25	1.53	0.66	1.24	0.98	1.11	1.38
	平均值	—	1.05	0.95	0.41	2.08	0.54	1.26	0.85	1.05	2.01
转咀头	2018-06	15	1.68	1.33	1.38	5.62	0.59	2.37	0.98	1.68	3.35
	2019-07	10	0.61	0.49	0.31	1.26	0.23	0.77	0.46	0.61	2.05
	平均值	—	1.14	0.91	0.85	3.44	0.41	1.57	0.72	1.14	2.70
大塬	2018-06	15	0.54	0.52	0.19	1.00	0.33	0.64	0.44	0.54	1.85
	2019-07	10	0.70	0.68	0.12	0.89	0.50	0.76	0.64	0.70	1.27
	平均值	—	0.62	0.60	0.16	0.95	0.42	0.70	0.54	0.62	1.56

端元混合模型 (Martino *et al.*, 2016)。其中, 生物端元的 CO<sub>2</sub> 浓度选取研究区  $\delta^{13}\text{C}$  测值最轻 ( $-23.89\text{‰}$ ) 的气体样品所对应的 CO<sub>2</sub> 浓度 (1.26%) ; 空气端元的 CO<sub>2</sub> 浓度和碳同位素分别选取研究区空气样品的测量值 (0.039% 和  $-9.66\text{‰}$ ) ; 深部来源端元的 CO<sub>2</sub> 浓度和碳同位素分别为 100% 和  $-2.5\text{‰}$  (Martino *et al.*, 2016)。利用同位素质量平衡原理 (约亨, 2012), 可以半定量地计算出各端元所占比例。

定义 3 个端元所占的比例分别为  $f_A$  (空气),  $f_B$  (深源) 和  $f_C$  (生物), 获取的 CO<sub>2</sub> 气体样品的浓度为  $V_{\text{sample}}$  (%), 碳同位素组成为  $\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}}$  (‰); 空气、深源和生物的气体浓度分别为  $V_A$  (%),  $V_B$  (%) 和  $V_C$  (%); 碳同位素组成分别为  $\delta^{13}\text{C}_A$  (‰)、 $\delta^{13}\text{C}_B$  (‰) 和  $\delta^{13}\text{C}_C$  (‰), 则它们需同时满足以下条件:

$$f_A + f_B + f_C = 100\% \quad (1)$$

式 (1) 表示 3 个混合端元所占百分比例总和为 100%。

$$V_A \times f_A + V_B \times f_B + V_C \times f_C = V_{\text{sample}} \quad (2)$$

式 (2) 表示 3 个混合端元分别提供的 CO<sub>2</sub> 浓度之和为气体样品浓度观测值。

$$(\delta^{13}\text{C}_A \times f_A \times V_A + \delta^{13}\text{C}_B \times f_B \times V_B + \delta^{13}\text{C}_C \times f_C \times V_C) / V_{\text{sample}} = \delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} \quad (3)$$

式 (3) 表示加上体积浓度权重, 3 个端元混合前后 CO<sub>2</sub> 气体轻重碳同位素质量守恒。联立上述公式则可获取 3 个端元所占比例, 结果见表 2。

### 3 观测结果分析

#### 3.1 土壤气 CO<sub>2</sub> 的异常分布特征

2018—2019 年固关—虢镇断裂上的 2 条测线 (殿咀、八渡) 和岐山—马召断裂上的 4 条测线 (草碧、南寨、转咀头、大塬) 2 期测试结果如图 3 所示, 灰色矩形框表示异常值分布区域。图中 6 条测线中, 只有八渡测线主断裂 (实线) 处未出现高值, 而是在断裂两盘存在高值区域 (灰色矩

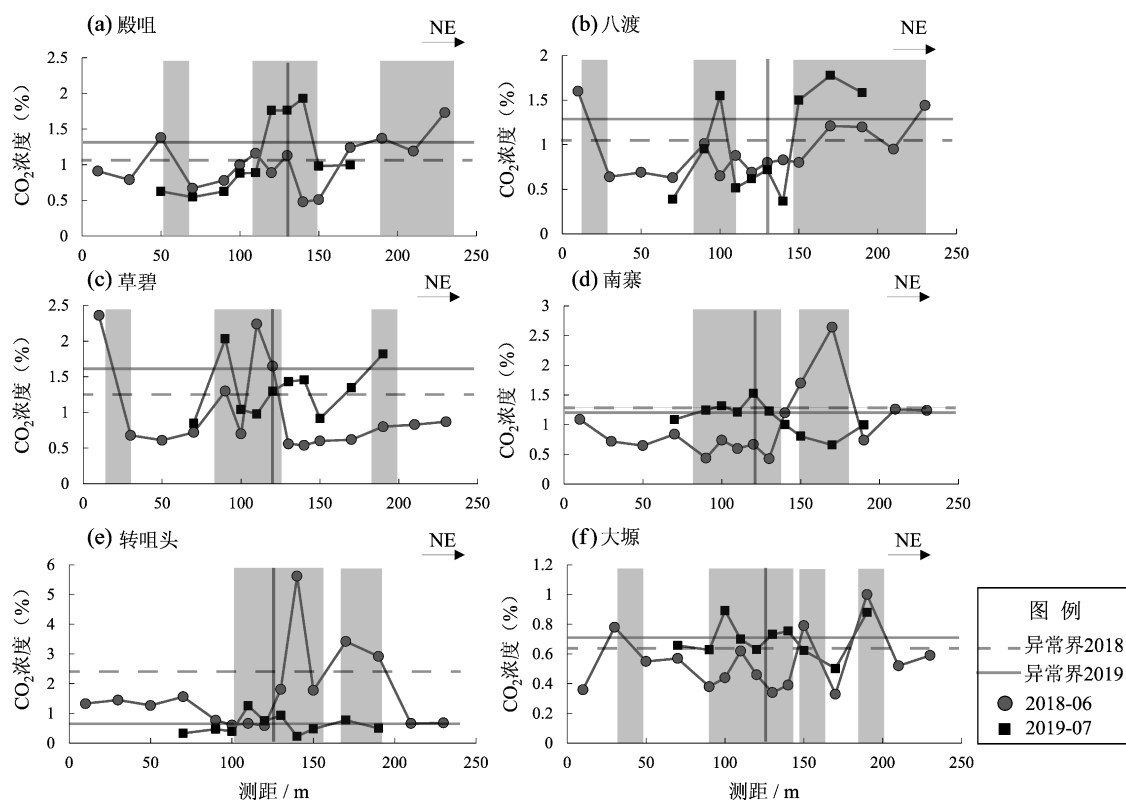


图 3 2018—2019 年陇县—宝鸡断裂带 6 条测线 2 期土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度测值

Fig. 3 Component concentrations of CO<sub>2</sub> in the 6 survey profiles in the Longxian - Baoji Fault Zone from 2018 to 2019

形框), 呈现为双峰型, 这正好对应了八渡测线主断裂类型为正断层的特征 (Annunziatellis *et al.*, 2008; Bond *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2018), 即正断层轴部破碎程度较高, 导致气体快速逃逸, 并且容易受到空气的稀释混染导致测值较低。其余 5 条测线的断层轴部均存在  $\text{CO}_2$  高值, 整体表现为多峰型, 较为符合走滑断裂的特征 (Annunziatellis *et al.*, 2008; Bond *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2018)。其中比较特殊的测线为 2018 年测量的南寨和转咀头测线, 其高值异常区主要集中于断层的东北盘, 表明其东北盘的气体活动强度要强于西南盘, 体现出走滑兼正断层的特征 (Bond *et al.*, 2017; Sun *et al.*, 2018)。

### 3.2 土壤气 $\text{CO}_2$ 的活动性强弱特征

基于 6 条测线的 2 期  $\text{CO}_2$  浓度测值, 本文分别统计了各条测线的均值、中值、标准差、最大值、最小值、异常上限、异常下限、背景值和相对活动强度 (表 1)。由于均值可能受到气象因素、断裂类型 (Annunziatellis *et al.*, 2008)、断裂破裂程度 (Bond *et al.*, 2017)、覆盖层和地层岩性等干扰因素的影响 (韩晓昆, 2014), 所以本文联合相对活动强度值来作为判定气体活动强弱的依据。此外, 本文还计算了 2 期测量结果的平均值, 对比分析气体活动强弱关系, 最终得出各断层的分段活动性特征。

6 条测线的土壤气  $\text{CO}_2$  浓度均值排序如图 4a 所示, 岐山—马召断裂上的草碧、转咀头测线平均  $\text{CO}_2$  浓度相对较高, 固关—虢镇断裂的殿咀测线和岐山—马召断裂的南寨测线平均  $\text{CO}_2$  浓度相近, 八渡、大塬测线的值最低。6 条测线的土壤气  $\text{CO}_2$  相对活动强度的 2 期平均排序如图 4b 所示, 岐山—马召断裂的转咀砂、南寨、草碧测线的平均  $\text{CO}_2$  相对活动强度排序靠前, 固关—虢镇断裂的八渡和殿咀测线排序靠后, 大塬测线的值最低。综合 2018—2019 年  $\text{CO}_2$  浓度均值和相对活动强度的 2 期平均结果来看, 岐山—马召断裂的咀砂、南寨、草碧测线气体活动最为活跃, 其次是固关—虢镇断裂的八渡、殿咀测线, 活动强度最弱的是岐山—马召断裂的大塬测线。

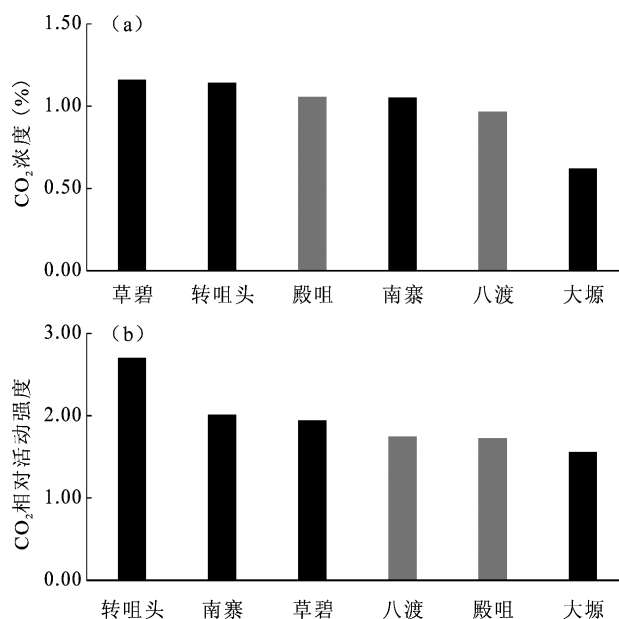


图 4 2018—2019 年陇县—宝鸡断裂带 6 条测线  $\text{CO}_2$  浓度平均值 (a) 和  $\text{CO}_2$  相对活动强度 (b)

Fig. 4 The average concentration of  $\text{CO}_2$  in the 6 survey profiles in the Longxian – Baoji Fault Zone from 2018 to 2019 (a) and the two – year average of the relative intensity of  $\text{CO}_2$  activity (b)

### 3.3 土壤气 $\text{CO}_2$ 碳稳定同位素组成溯源分析

6 条测线上的 60 个土壤气样品的  $\text{CO}_2$  浓度和碳同位素组成见表 2,  $\text{CO}_2$  浓度均值和相对活动强度结果存在一定的差异, 如图 5 所示, 并且 2019 年 7 月的测值与 2018 年 6 月的测值也存在一定差异。产生这种差异可能是由于不同月份的气候条件以及不同年度气体来源存在一定差异。

为了更好地对比分析这 6 条测线的气体来源及活动性特征, 本文利用三端元混合模型计算各端元  $\text{CO}_2$  占比 (表 2), 其中深部来源占比均值如图 5c 所示。结果表明, 6 条测线的  $\text{CO}_2$  气体主要来源于生物源, 岐山—马召断裂上  $\text{CO}_2$  气体样品深部来源 (0.04% ~ 0.42%) 比固关—虢镇断裂上  $\text{CO}_2$  气体样品深部来源 (0.06% ~ 0.08%) 的占比略高。

将岐山—马召断裂和固关—虢镇断裂上的气体样品分为两类进行对比分析 (图 6), 能更直观地发现岐山—马召断裂上的样品更接近于深部来源端元这一特征, 表明岐山—马召断裂上的深

表2 陇县—宝鸡断裂带土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度、碳同位素组成, 各端元百分比及其体积浓度

Tab. 2  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  values of soil gas CO<sub>2</sub> in the Longxian – Baoji Fault Zone, percentage of each end member and their volume concentrations

样品编号	CO <sub>2</sub> 浓度 (%)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (‰)	$f_A$ (%)	$f_B$ (%)	$f_C$ (%)	$f_A \times V_A$ (%)	$f_B \times V_B$ (%)	$f_C \times V_C$ (%)
殿咀-1	0.63	-21.10	57.27	0.07	42.65	0.02	0.07	0.54
殿咀-2	0.55	-21.16	62.76	0.06	37.18	0.02	0.06	0.47
殿咀-3	0.63	-20.63	58.35	0.08	41.57	0.02	0.08	0.52
殿咀-4	0.88	-20.06	43.04	0.15	56.81	0.02	0.15	0.72
殿咀-5	0.89	-18.96	46.06	0.19	53.75	0.02	0.19	0.68
殿咀-6	1.76	-22.71	9.62	0.01	90.37	0.00	0.01	1.74
殿咀-7	1.76	-21.79	13.51	0.09	86.40	0.01	0.09	1.67
殿咀-8	1.93	-22.89	0.05	0.00	99.95	0.00	0.00	1.93
殿咀-9	0.98	-21.44	29.76	0.08	70.16	0.01	0.08	0.88
殿咀-10	1.00	-22.24	27.22	0.07	72.71	0.01	0.07	0.92
平均值	1.10	-21.30	34.77	0.08	65.15	0.01	0.08	1.01
相对活动强度	1.75	—	—	—	—	—	—	—
八渡-1	0.39	-21.15	73.88	0.03	26.08	0.03	0.03	0.33
八渡-2	0.95	-22.15	30.73	0.07	69.20	0.01	0.07	0.87
八渡-3	1.55	-20.65	28.55	0.16	71.29	0.01	0.16	1.38
八渡-4	0.52	-20.73	65.81	0.06	34.13	0.03	0.06	0.43
八渡-5	0.62	-20.25	59.93	0.09	39.97	0.02	0.09	0.50
八渡-6	0.72	-20.69	51.98	0.10	47.92	0.02	0.10	0.60
八渡-7	0.37	-22.59	73.50	0.01	26.49	0.03	0.01	0.33
八渡-8	1.50	-22.50	23.87	0.02	76.11	0.01	0.02	1.47
八渡-9	1.78	-22.71	8.77	0.02	91.21	0.00	0.02	1.76
八渡-10	1.59	—	—	—	—	—	—	—
平均值	1.00	-21.49	46.34	0.06	53.60	0.02	0.06	0.85
相对活动强度	1.78	—	—	—	—	—	—	—
草碧-1	0.85	-15.12	60.42	0.33	39.25	0.02	0.33	0.49
草碧-2	2.03	-16.09	29.30	0.67	70.04	0.01	0.67	1.35
草碧-3	1.04	-16.74	45.03	0.33	54.64	0.02	0.33	0.69
草碧-4	0.98	-13.68	59.61	0.45	39.94	0.02	0.45	0.50
草碧-5	1.30	-16.85	30.84	0.42	68.74	0.01	0.42	0.87
草碧-6	1.43	-19.61	8.88	0.28	90.84	0.00	0.28	1.14
草碧-7	1.46	-17.32	19.72	0.45	79.83	0.01	0.45	1.01
草碧-8	0.92	-20.16	34.00	0.08	65.92	0.01	0.08	0.83
草碧-9	1.35	-20.99	7.67	0.19	92.15	0.00	0.19	1.16
草碧-10	1.82	-20.66	58.46	1.02	40.52	0.02	1.02	0.78
平均值	1.32	-17.72	35.39	0.42	64.19	0.01	0.42	0.88
相对活动强度	1.54	—	—	—	—	—	—	—

续表 2

样品编号	CO <sub>2</sub> 浓度(%)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (‰)	$f_{\text{A}}$ (%)	$f_{\text{B}}$ (%)	$f_{\text{C}}$ (%)	$f_{\text{A}} \times V_{\text{A}}$ (%)	$f_{\text{B}} \times V_{\text{B}}$ (%)	$f_{\text{C}} \times V_{\text{C}}$ (%)
南寨-1	1.09	-21.31	24.26	0.13	75.61	0.01	0.13	0.95
南寨-2	1.25	-19.72	20.25	0.24	79.51	0.01	0.24	1.00
南寨-3	1.32	-19.82	15.23	0.25	84.52	0.01	0.25	1.06
南寨-4	1.22	-20.15	20.48	0.21	79.31	0.01	0.21	1.00
南寨-5	1.53	-21.15	27.64	0.13	72.23	0.01	0.13	1.39
南寨-6	1.23	-20.06	20.08	0.22	79.70	0.01	0.22	1.00
南寨-7	1.00	-18.42	40.92	0.24	58.83	0.02	0.24	0.74
南寨-8	0.81	-18.29	53.02	0.20	46.78	0.02	0.20	0.59
南寨-9	0.66	-20.54	56.41	0.09	43.50	0.02	0.09	0.55
南寨-10	1.00	-19.46	37.33	0.20	62.47	0.01	0.20	0.79
平均值	1.11	-19.89	31.56	0.19	68.25	0.01	0.19	0.91
相对活动强度	1.38	—	—	—	—	—	—	—
转咀头-1	0.33	-19.92	79.50	0.04	20.46	0.03	0.04	0.26
转咀头-2	0.47	-22.13	66.18	0.02	33.81	0.03	0.02	0.43
转咀头-3	0.40	-21.57	72.75	0.03	27.23	0.03	0.03	0.34
转咀头-4	1.26	-23.89	0.44	0.01	99.55	0.00	0.01	1.25
转咀头-5	0.75	-21.82	46.90	0.06	53.04	0.02	0.06	0.67
转咀头-6	0.93	-22.42	31.61	0.06	68.34	0.01	0.06	0.86
转咀头-7	0.23	-19.95	85.90	0.02	14.08	0.03	0.02	0.18
转咀头-8	0.48	-20.84	68.07	0.05	31.88	0.03	0.05	0.40
转咀头-9	0.78	-21.77	45.03	0.07	54.90	0.02	0.07	0.69
转咀头-10	0.50	-21.14	66.13	0.05	33.82	0.03	0.05	0.43
平均值	0.61	-21.55	56.25	0.04	43.71	0.02	0.04	0.55
相对活动强度	2.05	—	—	—	—	—	—	—
大塬-1	0.66	-17.99	62.74	0.17	37.09	0.02	0.17	0.47
大塬-2	0.63	-20.15	59.42	0.10	40.48	0.02	0.10	0.51
大塬-3	0.89	-19.04	45.61	0.19	54.20	0.02	0.19	0.68
大塬-4	0.70	-18.94	57.82	0.15	42.04	0.02	0.15	0.53
大塬-5	0.63	-19.79	60.09	0.11	39.81	0.02	0.11	0.50
大塬-6	0.73	-19.44	54.47	0.14	45.39	0.02	0.14	0.57
大塬-7	0.75	-21.28	47.82	0.07	52.10	0.02	0.07	0.66
大塬-8	0.62	-17.63	65.45	0.16	34.39	0.03	0.16	0.43
大塬-9	0.50	-20.53	67.05	0.06	32.89	0.03	0.06	0.41
大塬-10	0.88	-21.03	39.86	0.11	60.03	0.02	0.11	0.76
平均值	0.70	-19.58	56.03	0.12	43.84	0.02	0.12	0.55
相对活动强度	1.27	—	—	—	—	—	—	—



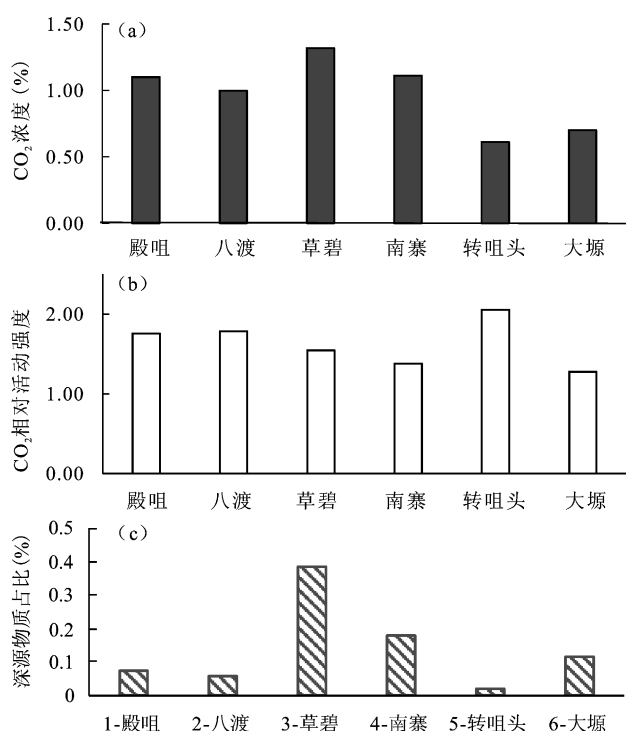


图5 2019年7月CO<sub>2</sub>浓度(a)、相对活动强度(b)和深源物质百分占比对比分析(c)

Fig. 5 Volume concentrations of CO<sub>2</sub> in July 2019 (a), relative intensity of CO<sub>2</sub> activity (b), and the percentage of deep-sourced materials (c)

部来源气体更容易沿断裂逸出,从而可以推断出,岐山—马召断裂的地下构造连通性较好,断裂破裂程度较高、闭锁程度较低,为深部流体向上运移与扩散创造了有利条件。此外,宝鸡地区温泉水中的CO<sub>2</sub>气体碳同位素组成位于土壤气和深源物质的过渡端元(Ma *et al.*, 2010; 马致远等, 2018),表明深源物质更容易快速地被断裂带内的温泉水运移出来,再被释放到地表。泉水和围岩发生的水-岩作用也会产生一定的气体,并被运移出到地表(Chen *et al.*, 2020)。

## 4 讨论

前人对鄂尔多斯西南缘和西秦岭北缘的各条断裂带进行了跨断层土壤气CO<sub>2</sub>浓度测量分析,如刘兆飞(2020)得出海原断裂带土壤气CO<sub>2</sub>浓度平均值在0.09%~0.22%;Zhou等(2020)得出六盘山地区土壤气CO<sub>2</sub>浓度平均值在0.73%~1.44%;高曙德等(2021)测量得出西秦岭北缘

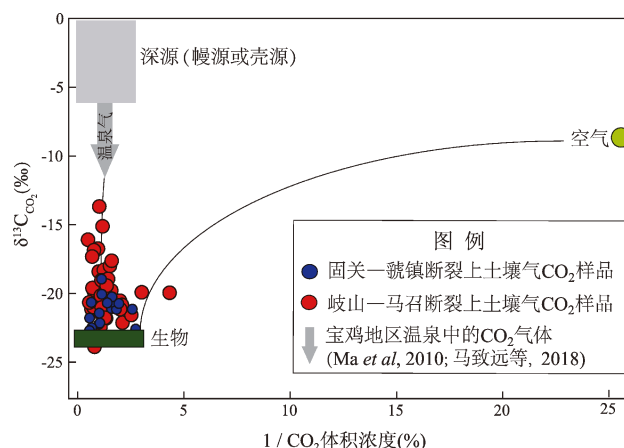


图6 固关—虢镇断裂和岐山—马召断裂土壤气1/CO<sub>2</sub>和碳同位素组成分析

Fig. 6 CO<sub>2</sub> concentrations and δ<sup>13</sup>C<sub>CO<sub>2</sub></sub> in the Guguang - Guozhen Fault and the Qishan - Mazhao Fault

断裂土壤气CO<sub>2</sub>浓度范围为0.36%~1.12%。

本文获取的陇县—宝鸡断裂带土壤气CO<sub>2</sub>体积浓度平均值在0.62%~1.16%。对比研究区周缘各断裂带CO<sub>2</sub>气体浓度平均值可知,更靠近鄂尔多斯盆地西南缘的六盘山—陇县—宝鸡断裂带比外围的海原断裂带更利于CO<sub>2</sub>沿断裂向外逸出。相对而言,陇县—宝鸡断裂带的气体活动性比六盘山断裂的气体活动性略弱。这主要是由于受到青藏高原挤压推挤作用,地壳物质沿六盘山—陇县—宝鸡断裂向东南方向逃逸,导致陇县—宝鸡断裂带产生左旋走滑运动;同时,受华北块体顺时针运动作用,鄂尔多斯盆地发生逆时针旋转,产生部分右旋走滑分量作用于陇县—宝鸡断裂带上,从而抵消掉该断裂的部分左旋走滑位移。这些复杂的地质作用过程使得陇县—宝鸡断裂的北部处于相对闭锁的状态,而南部的闭锁程度较低。与之相对应,杜方等(2018)利用地震活动性资料反演得出陇县—宝鸡断裂带北部属于地震空区,而南部属于7级地震破裂区。在本文测量的6条测线中,固关—虢镇断裂上的测线位于陇县—宝鸡断裂带的北段的结论,而岐山—马召断裂上的测线位于该断裂带的南段。

岐山—马召断裂和固关—虢镇断裂在晚第四纪以来的活动性存在一定的差异:首先,岐山—马召断裂晚第四纪以来整体呈现为左旋走滑兼正

断特征,速率约为  $0.5 \sim 1.2 \text{ mm/a}$  (Li *et al.*, 2019),而固关—虢镇断裂晚第四纪以来活动特征稍显复杂,整体呈正断兼走滑特征,水平走滑速率约为  $0.1 \text{ mm/a}$  (薛峰, 2014)。因此,岐山—马召断裂的活动性整体强于固关—虢镇断裂。其次,2 条断裂均呈现为分段活动性各不相同的特征,其中关于岐山—马召断裂的分段活动性的资料比较丰富,最强的为该断裂的北段,滑动速率约为  $0.8 \sim 1.2 \text{ mm/a}$ ,而关于固关—虢镇断裂的分段活动性的研究较少,该断裂北段为晚更新世活动断裂,中段为全新世活动断裂(速率不超过  $0.12 \text{ mm/a}$ ),南段为早中更新世活动断裂。由于各条断裂的活动性和破碎程度不同,导致它们的不同分段具有各向异性,使得断裂带不同地点的渗透性各不相同,进而影响土壤气的浓度和活动强度。

综合陇县—宝鸡断裂带 6 条跨断层测线的土壤气  $\text{CO}_2$  浓度、相对活动强度、碳稳定同位素组成等气体地球化学特征分析,可知岐山—马召断裂的 4 条测线均位于该断裂活动性最强的北段,  $\text{CO}_2$  气体相对活动性最强的为北端的草碧、南寨和转咀头测线,而南端的大塬测线气体相对活动性最弱,表明该断裂北段的活动性由北向南呈现为减弱的特征。固关—虢镇断裂的殿咀测线位于该断裂的北段,八渡测线位于该断裂的中段,八渡测线的气体相对活动性强于殿咀测线,这一特征印证了中段为全新世活动断裂,其活动性要强于北段。岐山—马召断裂  $\text{CO}_2$  气体样品比固关—虢镇断裂具有稍多的深部物质来源,表明岐山—马召断裂地表浅部与地壳深部的连通性较好、断裂带闭锁程度较低,为深部流体向上扩散与运移创造了有利条件。殿咀、八渡测线位于整个陇县—宝鸡断裂的北部(挤压闭锁区),南寨、转咀头、大塬测线位于南部(弱闭锁区),总体而言,断裂闭锁程度较低、破裂程度较高的地区  $\text{CO}_2$  气体活动性较强,反之,则  $\text{CO}_2$  气体活动性较弱。综合上述资料可知,陇县—宝鸡断裂带北段同时具有气体活动性弱、闭锁程度较高、位于地震空区等特征,因此,北段未来发生地震的危险性比南段高。

## 5 结论

本文通过对陇县—宝鸡断裂带上 6 条跨断层测

线的土壤气  $\text{CO}_2$  浓度、相对活动强度和碳同位素组成特征进行分析,得到以下结论:

(1) 2018—2019 年 2 期土壤气  $\text{CO}_2$  观测结果显示,八渡的  $\text{CO}_2$  浓度分布呈现为双峰式,符合正断层气体扩散模式特征;殿咀、草碧和大塬的  $\text{CO}_2$  浓度分布呈现为多峰型,符合走滑断层气体扩散模式特征;南寨和转咀头地区断裂东北盘的  $\text{CO}_2$  浓度高于西南盘,符合走滑兼正断层气体扩散模式特征。这一特征可为判定断裂性质提供气体地球化学方法的佐证。

(2) 由于断裂带土壤气  $\text{CO}_2$  属于混合来源,所以需要同时结合体积浓度、相对活动强度以及碳同位素组成来对气体活动性特征进行综合判定。岐山—马召断裂的土壤气  $\text{CO}_2$  浓度和相对活动强度整体上强于固关—虢镇断裂;相对应地,岐山—马召断裂上的气体深部来源占比( $0.02\% \sim 0.31\%$ )稍微高于固关—虢镇断裂上的气体深部来源( $0.05\% \sim 0.06\%$ ),表明位于南段的岐山—马召断裂气体渗透性较高、地下构造连通性较好,而位于北段的固关—虢镇断裂气体活动性较弱、断层闭锁程度较高,未来发生地震的危险性较高。

感谢中国地震局第二监测中心季灵运研究员对文章提出中肯的建议,感谢中国地震局地震预测研究所刘兆飞对数据处理方法提出的建议,感谢评审专家给予宝贵的修改建议。

## 参考文献:

- 杜方,闻学泽,冯建刚,等. 2018. 六盘山断裂带的地震构造特征与强震危险背景[J]. 地球物理学报, 61(2): 545–559.
- 杜建国,刘从强. 2003. 同位素地球化学在地震研究方面的作用[J]. 地震, 23(2): 99–107.
- 高曙德,赵洁,王爱国,等. 2021. 西秦岭北缘断裂带土壤气定点监测与初步结果分析[J]. 地震工程学报, 43(5): 1001–1007.
- 韩晓昆. 2014. 首都圈地震重点监测区土壤气体地球化学[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 李强. 2013. 汶川地震后青藏高原东北缘 GPS 地壳形变场特征研究[D]. 北京:中国地震局地震预测研究所.
- 李新男. 2017. 鄂尔多斯西南缘活动构造几何图像,运动特征及构造变形模式[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 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.
- 刘兆飞. 2020. 鄂尔多斯盆地西缘断裂带气体地球化学特征[D]. 北

- 京:中国地震局地震预测研究所.
- 马致远, 吴敏, 郑会菊, 等. 2018. 对关中盆地腹部深层地下水  $\delta^{18}\text{O}$  富集[J]. 地质通报, 37(2): 487–495.
- 邵永新. 2012. 土壤氦方法用于断层活动性研究的讨论[J]. 中国地震, 28(1): 51–60.
- 孙小龙, 刘耀伟, 付虹, 等. 2020. 我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾[J]. 地震研究, 43(2): 216–232.
- 王小娟, 韩晓昆, 陈志, 等. 2016. 六盘山东麓断裂带逸出气氮浓度特征分析[J]. 地震工程学报, 38(增刊2): 276–281.
- 王云, 赵慈平, 冉华, 等. 2015. 地壳流体 CO<sub>2</sub> 的释放与地震关系: 回顾与展望[J]. 地震研究, 38(1): 119–130.
- 薛峰. 2014. 六盘山地区现今三维地壳运动与变形特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- 叶茂盛, 孟国杰, 苏小宁, 等. 2018. 青藏高原东北缘主要断裂闭锁特征和滑动亏损研究[J]. 地震, 38(3): 1–12.
- 约享·霍夫斯. 2012. 稳定同位素地球化学[M]. 吴石头, 王洋洋, 肖益林, 译. 北京: 地质出版社.
- 张新科, 邵辉成, 冯亮亮, 等. 2017. 陇县—宝鸡断裂带地震活动分析[J]. 高原地震, 29(1): 19–25.
- 张杨, 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]. 地震研究, 39(3): 444–450.
- 周晓成, 孙凤霞, 陈志, 等. 2017. 汶川  $M_s 8.0$  地震破裂带 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、Rn 和 Hg 脱气强度[J]. 岩石学报, 33(1): 291–303.
- Annunziatellis A, Beaubien S E, Bigi S, *et al.* 2008. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Lateral caldera (central Italy): Implications for CO<sub>2</sub> geological storage[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2(3): 353–372.
- Bond C E, Kremer Y, Johnson G, *et al.* 2017. The physical characteristics of a CO<sub>2</sub> seeping fault: The implications of fracture permeability for carbon capture and storage integrity[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 61: 49–60.
- Bräuer K, Kämpf H, Koch U, *et al.* 2007. Seismically induced changes of the fluid signature detected by a multi-isotope approach (He, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>) at the Wettingen, Bad Brambach (central Europe) [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112(B4): 1–15.
- Chen Z, Li Y, Martinelli G, *et al.* 2020. Spatial and temporal variations of CO<sub>2</sub> emissions from the active fault zones in the capital area of China [J]. Applied Geochemistry, 112: 104489.
- Fu C C, Yang T, Chen C H, *et al.* 2017. Exploring the relationship between soil degassing and seismic activity by continuous radon monitoring in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan [J]. Chemical Geology, 469: 163–175.
- Giammanco S, Gurrieri S, Valenza M. 1998. Anomalous soil CO<sub>2</sub> degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna (Sicily, Italy) [J]. Bulletin of Volcanology, 60(4): 252–259.
- King C Y, King B S, Evans W C, *et al.* 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California [J]. Applied Geochemistry, 11(4): 497–510.
- Li X N, Feng X J, Li G Y, *et al.* 2019. Geological and geomorphological evidence for active faulting of the southern Liupanshan fault zone, NE Tibetan Plateau [J]. Geomorphology, 345(15): 106849.
- Li Y, Du J G, Wang X, *et al.* 2013. Spatial variations of soil gas geochemistry in the Tangshan Area of Northern China [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 24(3): 323–332.
- Ma Z Y, Yu J, Yan S, *et al.* 2010.  $\delta^{18}\text{O}$  shifts of geothermal waters in the central of Weihe Basin, NW China [J]. Environmental Earth Science, 59(5): 995–1008.
- Martino R, Capasso G, Camarda M. 2016. Spatial domain analysis of carbon dioxide from soils on Vulcano Island: Implications for CO<sub>2</sub> output evaluation [J]. Chemical Geology, 444: 59–70.
- Seminsky K Z, Demberel S. 2013. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia [J]. Radiation Measurements, 49(1): 19–34.
- Su X N, Yao Y B, Wu W W, *et al.* 2019. Crustal deformation on the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau from continuous GPS Observations [J]. Remote Sensing, 11(1): 34: 1–21.
- Sun X L, Yang P T, Yang X, *et al.* 2018. Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments [J]. Geosciences Journal, 22: 227–239.
- Walia V, Yang T F, Hong W L, *et al.* 2009. Geochemical variation of soil-gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsincheng fault in NW Taiwan [J]. Applied Radiation & Isotopes, 67(10): 1855–1863.
- Wang G, Liu C, Wang J, *et al.* 2006. The use of soil mercury and radon gas surveys to assist the detection of concealed faults in Fuzhou City, China Environmental Geology, 51(1): 83–90.
- Wang S D, Shi Y Q, Feng X J, *et al.* 2021. Late Quaternary sinistral strike-slip of the Liupanshan–Baoji fault zone: Implications for the growth of the northeastern Tibetan Plateau [J]. Geomorphology, 380(8): 107628.
- Wang X, Li Y, Du J G, *et al.* 2014. Correlations between radon in soil gas and the activity of seismogenic faults in the Tangshan area, North China [J]. Radiation Measurements, 60: 8–14.
- Weise S M, Bräuer K, Kämpf H, *et al.* 2001. Transport of mantle volatiles through the crust traced by seismically released fluids: a natural experiment in the earthquakeswarm area Vogtland/NW Bohemia Central Europe [J]. Tectonophysics, 336(1–4): 137–150.
- Yang Y, Li Y, Li Y G, *et al.* 2021. Present-day activity of the Anninghe Fault and Zemuhe Fault, Southeastern Tibetan Plateau, derived from soil gas CO<sub>2</sub> emissions and locking degree [J]. Earth and Space Science, 10. 1029/2020EA001607.
- Zhou H, Su H, Zhang H, *et al.* 2020. Geochemical characteristics of soil gas and strong seismic hazard potential in the Liupanshan Fault Zone (LPSFZ) [J]. Geofluids, (7): 1–14.
- Zhou Z H, Tian L, Zhao J, *et al.* 2020. Stress-related pre-seismic water radon concentration variations in the Panjin observation well, China (1994–2020) [J]. Frontiers in Earth Science, 8: 596283.
- Zhou Z H, Zhong J, Zhao J, *et al.* 2021. Two mechanisms of earthquake-induced hydrochemical variations in an observation well [J]. Water, 13: 2385.

## Geochemical Characteristics and Genesis of Soil Gas CO<sub>2</sub> in the Longxian – Baoji Fault Zone

LIU Jie<sup>1</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, CHEN Zhi<sup>2</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, ZHAO Xiaomao<sup>1</sup>, FENG Xijie<sup>1</sup>, WANG Jingli<sup>1</sup>

(1. *Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shaanxi, China*)

(2. *Institute of Earthquake Forecasting and Key Laboratory of Earthquake Prediction,  
China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

### Abstract

The Longxian – Baoji Fault Zone is located in the northeast edge of the Qinghai – Tibet Block and belongs to the southernmost segment of the arc fault belt in the southwest edge of the Ordos Block. To compare the activity of the Qishan – Mazhao Fault in the south of the Longxian – Baoji Fault Zone with the activity of the Guguan – Guozhen Fault in the north, we study the geochemical features of the soil gas CO<sub>2</sub> in the faults. Six survey profiles for surveying CO<sub>2</sub> are deployed across the two faults and two periods of observation are carried out. We obtain 150 observed values of CO<sub>2</sub> component concentrations. In addition, we collect 60 CO<sub>2</sub> samples for stable carbon isotopic composition measurements. We find that the intensity (1.56 – 2.70) of CO<sub>2</sub> activity in the Qishan – Mazhao Fault is greater than that (1.73 – 1.75) in the Guguan – Guozhen Fault. And the source of the CO<sub>2</sub> in the Qishan – Mazhao Fault is closer to the end member of the deep materials. This suggests that the connectivity of the underground structures of the Qishan – Mazhao Fault is better and the fault's locking degree is lower. Meanwhile, the gas activity in the Guguan – Guozhen Fault is weaker and the fault's locking degree is higher. Thus, the earthquake risk in this fault zone is higher.

**Keywords:** soil gas CO<sub>2</sub>; intensity of gas activity; stable carbon isotope; fault activity