

刘兆飞, 李营, 陈志, 崔月菊, 路畅, 杨江, 赵元鑫. 2019. 吉兰泰断陷盆地周缘断裂带气体释放及其对断层活动性的指示意义. 地震学报, 41(5): 613–632. doi: 10.11939/jass.20190025.
Liu Z F, Li Y, Chen Z, Cui Y J, Lu C, Yang J, Zhao Y X. 2019. Gas emission from active fault zones around the Jilantai faulted depression basin and its implications for fault activities. Acta Seismologica Sinica, 41(5): 613–632. doi: 10.11939/jass.20190025.

吉兰泰断陷盆地周缘断裂带气体释放及其对断层活动性的指示意义*

刘兆飞 李 营^{*} 陈 志 崔月菊
路 畅 杨 江 赵元鑫

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测重点实验室

摘要 为了研究吉兰泰断陷盆地周缘断裂带气体排放及其对断层活动性的指示意义, 在盆地周缘 4 条活动断裂上布设了 5 条土壤气测量剖面 and 1 条电磁测量剖面, 观测了土壤气中 Rn, Hg 和 CO₂ 的浓度、释放通量和地电阻率, 对各测量剖面进行了土壤化学组分分析, 计算得到了断层活动性相对指数 K_Q . 研究结果显示: 土壤气体 CO₂ 和 Rn 受渗透性较低的粉砂土阻挡, 主要沿结构破碎的断层上盘逃逸, 并形成浓度高峰; 吉兰泰盆地南缘土壤气 Rn, Hg 和 CO₂ 的浓度和释放通量最高, 可能与盆地西南缘花岗岩中 U 和 Ra 的运移以及盆地南缘碳酸盐岩的分解有一定的关系. 各测量剖面的断层活动性相对指数 K_Q 值的变化特征表明, 正断层和逆断层的 K_Q 值大于走滑断层, 且巴彦乌拉山山前断裂上的 K_Q 值最高, 揭示其活动性最强, 有可能是地震发生的潜在危险区.

关键词 吉兰泰断陷盆地 断裂带 土壤气 地球化学 释放通量 断层活动性
doi: 10.11939/jass.20190025 中图分类号: P315.72⁺8 文献标识码: A

Gas emission from active fault zones around the Jilantai faulted depression basin and its implications for fault activities

Liu Zhaoifei Li Ying[†] Chen Zhi Cui Yueju
Lu Chang Yang Jiang Zhao Yuanxin

1) Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) Key Laboratory of Earthquake Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract: Soil gases from fault zones are good indicators of tectonic and seismic activities, to which many seismologists and geochemists have been paid much attention. Five measuring sections for soil gas and one for earth resistivity were designed on the four active faults around the Jilantai basin, northwestern China. The data of earth resistivity, concentration and flux of soil gases Rn, Hg and CO₂ were attained, and the chemical compositions of soil were analyzed in

* 基金项目 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2016IES0101, 2016IES0102)和国家重点研发项目(2018YFC1503602)共同资助.
收稿日期 2019-02-15 收到初稿, 2019-06-14 决定采用修改稿.
[†] 通信作者 e-mail: subduction6@hotmail.com



all sections and the relative index K_Q of fault activity was calculated. All the results showed that soil gases CO_2 and Rn were blocked by sandy soil layers with low permeability and escaped along the hanging wall of the faults with broken structures, easily forming concentration peaks. High concentrations and fluxes of Rn, Hg and CO_2 were distributed in the southern margin of the Jilantai basin, which might be related to the migration of U and Ra in granites in southwestern margin of the basin and the decomposition of local carbonate rocks in south margin of the basin. The variation characteristics of relative index K_Q of fault activity in each section indicated normal and reverse faults with higher K_Q values than strike-slip faults. The maximum K_Q value was observed in the piedmont fault of Bayanwula mountains, probably indicating that this fault is of the strongest activity and is also a potential area of high seismic hazards.

Key words: Jilantai faulted depression basin; fault zone; soil gases; geochemistry; flux; fault activity

引言

断裂带是地球深部脱气的重要部位,经由断裂带释放的地下气体因携带地球内部物质组成与能量交换的大量信息而成为探索地球内部物质演化和动力学过程的重要信息来源(Baubron *et al.*, 2002; Becken *et al.*, 2008). 众多观测结果显示,断裂带土壤气体地球化学特征和释放强度与区域构造演化及地震活动密切相关(Woodruff *et al.*, 2009; 马向贤等, 2012; 郭正府等, 2017; 王喜龙等, 2017), 构造演化和地震孕育过程中地球内部物质迁移、能量释放和应力变化等可能是导致断裂带天然气异常的重要原因(King *et al.*, 1996; Italiano *et al.*, 2009). 近年来,随着观测技术和基础研究的不断发展,断裂带土壤气体地球化学方法已经在区域构造演化和地震趋势研判中发挥着举足轻重的作用(Zhou *et al.*, 2016; 杜建国等, 2018), 例如: 唐山地区土壤气 Rn, Hg, CO_2 , H_2 和 He 高浓度区与活动断裂展布区的高度吻合,表明活动断裂带是地球深部气体集中释放的通道(Li *et al.*, 2013), 断裂活动速率越大,深部脱气强度越高(Chen *et al.*, 2019), 而且断裂带断层泥中的 CO_2 , H_2 和 Ar 等吸附气体的浓度对断层活动性也有很好的指示意义(Ma *et al.*, 2015); Yang 等(2018)基于土壤气 Rn 浓度和断层活动性指数 K_Q 的对比研究表明,安宁河断裂南段的活动性明显高于则木河断裂北段. 汶川 $M_S 8.0$ 地震后,随着余震的衰减,龙门山断裂带土壤气体 He 和 H_2 的浓度也随之降低(Zhou *et al.*, 2010). 首都圈地区主要活动断裂带土壤气 Rn 的调查研究显示,土壤气 Rn 的浓度和通量的最大值出现在唐山 $M_S 7.8$ 地震震中区,可能与唐山地震及其余震的震后效应有关(Chen *et al.*, 2018).

近年来的一些研究结果表明,地球物理勘查方法与气体地球化学探测技术的有机结合,可以更加深入地剖析活动断裂带气体地球化学特征与断裂带结构及活动性之间的关系(Revil *et al.*, 2004; Finizola *et al.*, 2009). Zarroca 等(2012)结合电法勘探技术和土壤气体地球化学方法对西班牙阿梅尔(Amer)断层的深入研究结果表明,对于土壤气来源较深的断裂带,土壤气体地球化学方法能够更有效地判定断裂带的地震活动特征. 这些方法在我国也有少量应用研究,如赵建明等(2018)的综合研究显示蔚县—广灵断裂的土壤气浓度和释放通量均比口泉断裂高,指示蔚县—广灵断裂的活动性较强.

吉兰泰断陷盆地位于鄂尔多斯地块西北边缘,地处宁夏—内蒙交界处,区内构造活动强

烈, 地震活动较频繁, 盆地周缘发育一系列大型活动断裂带, 这些活动断裂带的活动控制了吉兰泰断陷盆地内部及周缘的地震活动(曹刚, 2001). 为了深入研究该盆地周缘断裂带气体排放及其对断层活动性的指示意义, 本文拟进行土壤气 Rn, Hg 和 CO₂ 的浓度和释放通量野外流动测量, 计算断层活动性相对指数 K_Q , 并结合电法勘探结果, 探讨吉兰泰断陷盆地周缘不同性质断裂带的气体排放特征和断层活动性, 为吉兰泰断陷盆地及其周缘未来地震趋势研判等提供气体地球化学科学依据.

1 地震地质背景

吉兰泰断陷盆地(105°E—108°E, 38.4°N—41.5°N)位于鄂尔多斯地块西北边缘、阿拉善地块东缘(图 1a), 其长轴沿 NE 向延伸. 吉兰泰盆地海拔为 1 023—1 100 m, 西陡东缓, 第四纪地层的最大厚度为 400 m(图 1b). 盆地基底为前寒武纪花岗片麻岩, 其上被中生代下白垩统不整合覆盖; 盆地内部构造复杂, 有一系列被 NE, EW 及 NW 向次级断裂分割的凸起和凹陷, NNE 走向的桌子山西缘断裂、磴口—一本井断裂、黄河断裂带、巴彦乌拉山山前断裂和狼

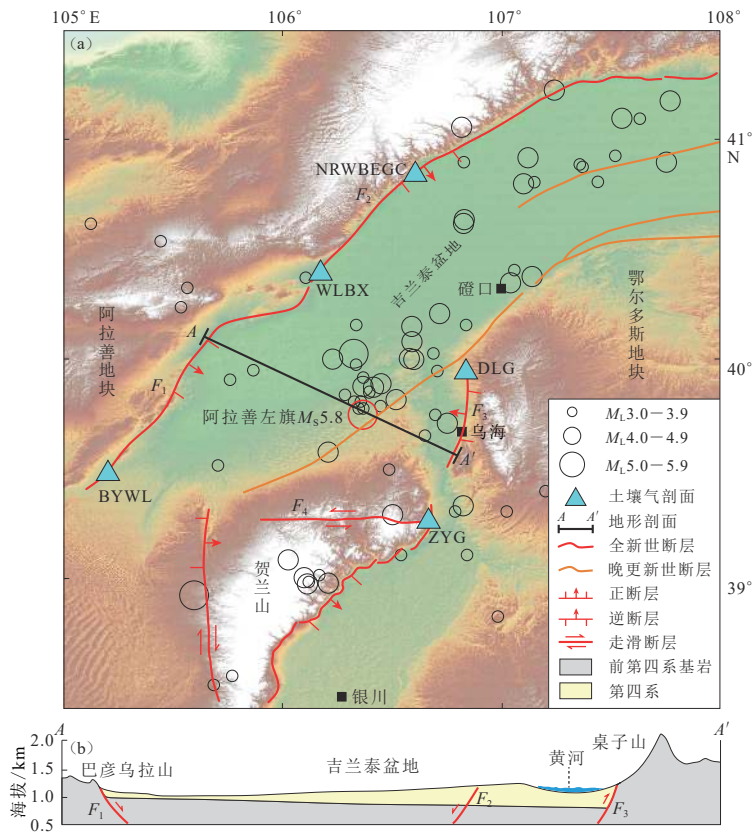


图 1 研究区构造简图和 1970 年 7 月 19 日至 2018 年 6 月 10 日的地震分布(a)以及垂向剖面 AA' 简图(b)

F_1 : 巴彦乌拉山山前断裂; F_2 : 狼山山前断裂; F_3 : 桌子山西缘断裂; F_4 : 正谊关断裂

Fig. 1 The tectonic settings and distribution of earthquakes from 19 July 1970 to 10 June 2018 in the studied area (a) and the vertical profile AA' (b)

F_1 : Bayanwula mountain Piedmont fault; F_2 : Langshan mountain Piedmont fault; F_3 : Zhuozi mountain Western margin fault of; F_4 : Zhengyiguan fault

山山前断裂等共同控制着盆地的发育和演化(曹刚, 2001).

研究区内构造活动性强, 1970 年 7 月 19 日至 2018 年 6 月 10 日期间发生了 74 次 $M_L3.0$ 以上地震, 其中 $M_L3.0-3.9$ 地震 42 次, $M_L4.0-4.9$ 地震 29 次, $M_L5.0$ 以上地震 3 次(图 1), 震源深度为 4.9—39.1 km, 2015 年 4 月 15 日研究区内发生内蒙古阿拉善左旗 $M_S5.8$ 地震, 震中位于(39.8°N, 105.3°E), 震源深度为 10 km.

1920 年海原 $M_S8.5$ 地震之前, 鄂尔多斯地块的中强地震主要发生于东缘、西缘和南缘, 历史上发生过 6 次 $M_S8.0-8.9$ 地震, 地块北缘仅于公元 849 年发生过 $M_S7.0$ 地震. 1920 年海原 $M_S8.5$ 地震之后, 鄂尔多斯地块周缘发生的 6 次 $M_S6.0$ 以上中强地震全部发生在西北缘, 西北缘地区是近 50 年来鄂尔多斯周缘中强地震最为活跃的地段(徐伟进等, 2008; 高立新等, 2012, 2017). 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_S8.0$ 地震后, 鄂尔多斯地块的西北缘发生中等地震. 已有研究(高立新等, 2010, 2012)表明, 该区域具备发生 $M_S7.0$ 以上强震的构造背景, 处于强震空区的内蒙古临河至蒙宁交界地区(包含研究区)是强震危险区域.

2 测量方法

2.1 土壤气测量

2017 年 7—8 月在巴彦乌拉山山前断裂(F_1)、狼山山前断裂(F_2)、桌子山西缘断裂(F_3)和正谊关断裂(F_4)上布设了 5 条土壤气剖面(图 1, 表 1), 共 9 条测线, 完成了土壤气 Rn, Hg 和 CO_2 浓度和通量的现场测量, 共计浓度测量点 140 个, 通量测量点 20 个.

表 1 土壤气 Rn, Hg 和 CO_2 测量剖面基本信息

Table 1 Basic information about the measurement sections for soil gases Rn, Hg and CO_2						
剖面	剖面编号	断裂	断裂编号	断裂性质	北纬/°	东经/°
巴彦乌拉	BYWL	巴彦乌拉山山前断裂	F_1	正断层	39.5	105.2
乌兰巴兴	WLBX	狼山山前断裂	F_2	正断层	40.4	106.2
那仁乌布尔嘎查	NRWBEGC	狼山山前断裂	F_2	正断层	40.9	106.6
大路盖	DLG	桌子山西缘断裂	F_3	逆断层	40.0	106.8
正义关	ZYG	正谊关断裂	F_4	左旋走滑	39.3	106.7

注: 土壤气剖面的经纬度是测线中央(剖面与断层相交处)的经纬度.

垂直断层走向布设 1—2 条平行测线, 线距 10 m, 测线中央位于断层上. 每条测线布设 14—16 个测量点, 断裂附近(≤ 30 m)点距设为 10 m, 远离断裂 30 m 后, 点距设为 20—40 m. 在断层上下盘各布设 2 个通量测量点, 点距为 30 m(图 2). 野外定点采用 GPS 定位, 测线长度使用米尺测量. 为了研究土壤化学组成与测量结果的关系, 采集各剖面断层处(测线 0 m)

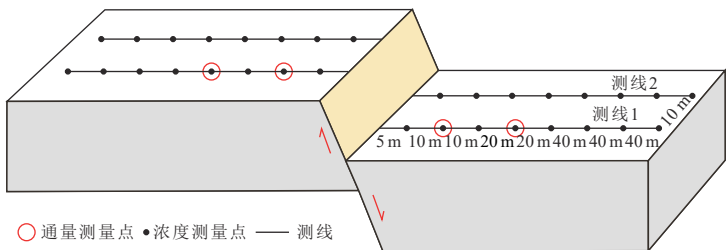


图 2 土壤气浓度和通量布点示意图

Fig. 2 Measuring sites for the concentration and flux of soil gases

地下 20 cm 深的土样。为降低岩土类型和土壤层厚度对测量结果的影响, 测线布设时尽可能保持测线所切过的松散沉积物厚度和岩性大体一致。为避免气象条件变化产生的影响, 每条测线均在同一天内完成测量工作。

土壤气 Rn, Hg 和 CO₂ 浓度测量方法参见周晓成等(2007)和李营等(2009), 在测量点处先用钢钉打深约 80 cm 的孔洞, 再将空心采样杆放置于孔内, 密封后连接仪器进行测量。为了保证测量结果的准确性, 对测值异常点至少进行两次复测。土壤气 Hg 浓度使用 RA-915+ 型塞曼效应测汞仪进行测量, 标定误差为 3%, 检测限为 1 ng/m³; CO₂ 浓度使用华云 GXH-3010E 型红外 CO₂ 分析仪测量, 标定误差为 ±2%, 检测限为 0.001%; Rn 浓度使用 RTM2200 型测氡仪测量, 标定误差 < 10%, 检测限为 67 Bq/m³。

土壤气 Rn, Hg 和 CO₂ 释放通量测量采用静态暗箱法(Lehmann *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006)。将半球型通量箱(半径 0.2 m)埋入通量测量点地下 20 cm 处, 分别将仪器的进、出口与通量箱的出、进气口相连, 测量通量箱内气体各组分的浓度随时间的变化, 并记录箱内温度和气压。Hg 和 CO₂ 通量测量使用的仪器与浓度测量所使用的相同, Rn 通量测量使用 RAD7 测氡仪, 标定误差为 ±2%, 检测限为 4 Bq/m³。释放通量 F 的计算公式为

$$F = \frac{T_{\text{std}}}{P_{\text{std}}} \cdot \frac{V_c P_c}{T_c A_c} \cdot \frac{dQ}{dt}, \quad (1)$$

式中: P_{std} 为标准大气压(101.325 kPa); T_{std} 为标准温度 0 °C(273.15 K); V_c 为通量箱的体积, 单位为 m³; P_c 为通量箱内的气压, 单位为 Pa; T_c 为通量箱内的温度, 单位为 K; A_c 为通量箱覆盖的土壤面积, 单位为 m²; Q 为气体浓度; dQ/dt 为通量箱里气体各组分浓度的增加速率。

2.2 可控源音频大地电磁测量方法

可控源音频大地电磁(controlled source audio-frequency magnetotellurics, 缩写为 CSAMT)测量方法具有工作效率高、抗干扰能力强、勘探深度大、分辨率高等优点, 已被广泛应用于隐伏断裂探测(谭儒蛟等, 2007; 李帝铨等, 2008)和矿产勘查(于昌明, 1998; 石昆法等, 2001)。CSAMT 法是一种频率域电磁测深方法, 该方法基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组, 给出了电场 E_x , 磁场 H_y 与视电阻率 ρ_s 的关系式(何继善, 1990; 石昆法等, 2001):

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \cdot \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}, \quad (2)$$

式中 f 为频率。由式(2)可知, 由地面上观测的两个正交的水平电磁场 E_x 和 H_y , 可得到地下的视电阻率 ρ_s 。根据电磁波的趋肤效应理论, 导出趋肤深度公式为

$$H \approx 356 \sqrt{\frac{\rho_s}{f}}, \quad (3)$$

式中 H 为探测深度。从式(3)可见: 当电阻率固定时, 电磁波的探测深度与频率成反比, 即: 高频时, 探测深度浅; 低频时, 探测深度深。因此可以通过人工激发交变电磁场源, 接收不同频率的电磁波信号, 以达到测深的目的。

为了探明狼山山前断裂的地下展布形态、产状、延伸情况及地下岩性变化特征与土壤气地球化学特征的关系, 在 WLBX 剖面布设了一对供电电极 A 和 B , 供电电极距为 1 km(图 3)。在 AB 中垂线向两边张角各 30° 的扇形区域内沿平行于 AB 的方向布置一条测深线(NE130°),

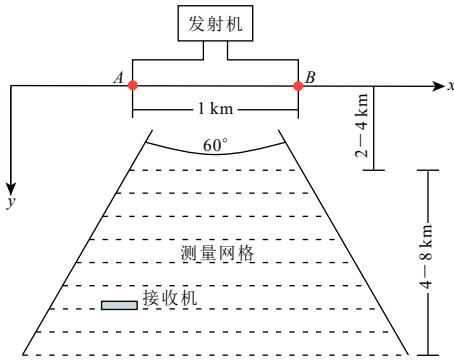


图3 可控源音频大地电磁(CSAMT)工作布置图

Fig. 3 CSAMT work layout map

收发距为 7 km, 测深线与土壤气测量线位置相同, 断层上下盘各选取 3 个测深点, 点距为 60 m, 测量深度不小于 1 km. 使用加拿大凤凰公司 V8 多功能电法仪进行测量, 工作频率范围为 1—7 680 Hz. 电场测量所使用的电极极差 < 2 mV, 电极埋入深度 > 30 cm, 每个极坑注水, 保持其与土壤良好接触, 水平磁棒(H_y)的布设角度为 40° . 利用加拿大凤凰地球物理有限公司开发的 CMT.PRO 软件和中国地质大学(武汉)电法勘探研究组开发的 CSAMT-SW 软件, 对测量数据进行解释.

3 测量结果

3.1 土壤气浓度

根据前人研究经验, 以每条测线各测点浓度的平均值 Q_{mean} 作为背景值, 平均值加减 0.5 倍标准偏差 ($Q_{\text{mean}} \pm \sigma/2$) 作为浓度异常的上下界限(表 2), 将浓度高于背景值 ($Q > Q_{\text{mean}}$) 的测值视为受人为活动、断层破碎程度、气象条件等因素影响的测值, 将高于异常上限的测值 ($Q > Q_{\text{mean}} + \sigma/2$) 视为与断层有关的异常值(Yang *et al.*, 2018; Seminsky, Bobrov, 2009). 由于断裂带内部裂隙发育程度不同, 浓度异常的区域时常不连续, 若两个连续异常 ($Q > Q_{\text{mean}}$) 区域之间存在面积较小的非异常区域, 可将该区域考虑在异常区域之内(Seminsky, Bobrov, 2009; Seminsky, Demberel, 2013, Seminsky *et al.*, 2014). Q_{max} 为异常区域内浓度的最大值, Q_{min} 为断层异常区域外紧邻异常区浓度的最小值.

图 4—8 给出了 BYWL, WLBX, NRWEGC, DLG 和 ZYG 这 5 条剖面的土壤气浓度变化曲线图. 从图 4 可以观察到, 巴彦乌拉山山前断裂 BYWL 剖面上, 测线 1 的 CO_2 浓度异常区(灰色阴影区, 即与断层有关的异常区域)出现在断层上盘, 测线 2 的异常区出现在断层附近和上盘; 两条测线上的 Hg 浓度异常区出现在断层附近和下盘, Rn 浓度异常区出现在断层附近. 狼山山前断裂 WLBX 剖面上(图 5), 两条测线的 CO_2 浓度异常区出现在断层上盘, Hg 浓度异常区主要位于断层附近, Rn 浓度异常区出现在断层两盘, 且呈双峰特征. 由于狼山山前断裂 NRWEGC 剖面(图 6)地形较陡起伏大, 仅布设了一条测线, CO_2 和 Hg 浓度异常区在断层两盘呈双峰出现, Rn 浓度异常区出现在断层附近和上盘, 且由断层下盘到上盘呈上升趋势. 桌子山西缘逆冲断裂 DLG 剖面上(图 7), 两条测线的 CO_2 和 Hg 浓度异常区出现在断层两盘, Rn 浓度异常区出现在断层附近. 正谊关走滑断裂 ZYG 剖面上(图 8), 两条测线的 CO_2 和 Hg 浓度异常区出现在断层附近, 测线 1 的 Rn 浓度异常区出现在断层两盘, 测线 2 只在断层一盘出现异常区.

3.2 CSAMT 测量结果

WLBX 剖面地处狼山西段余脉, 构造特征显著, 地表可见明显陡坎和断层出露线. 区内主要出露第四系地层, 视电阻率处于 $10\text{—}50 \Omega \cdot \text{m}$ 之间. 由于应力作用, 断裂构造破坏了原岩(地层)的连续性, 破碎后形成很多空隙, 通常反映为较原岩明显增高的高阻异常特征. 标高约 1 000 m 以上的部分, 水平距离 $25\text{—}75$ m 之间存在明显的“U”型高阻异常(图 9), 推断为

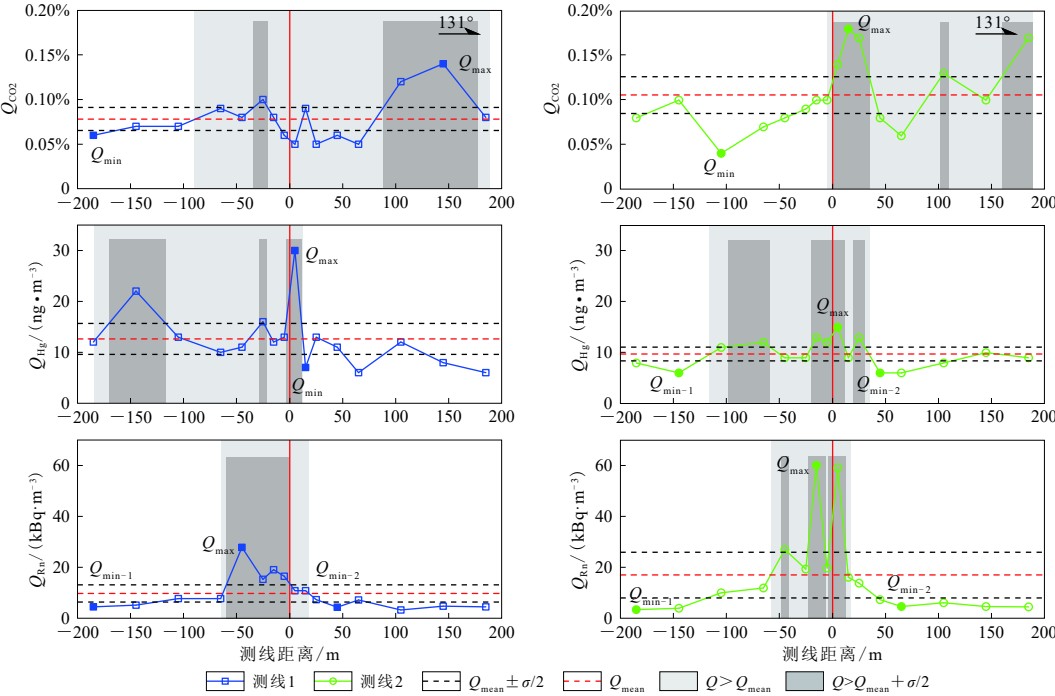


图4 BYWL剖面测线1(左)和2(右)上的土壤气浓度 Q 变化曲线

Fig. 4 Soil gas concentration Q curves of measuring lines 1 (left panels) and 2 (right panels) on the section BYWL

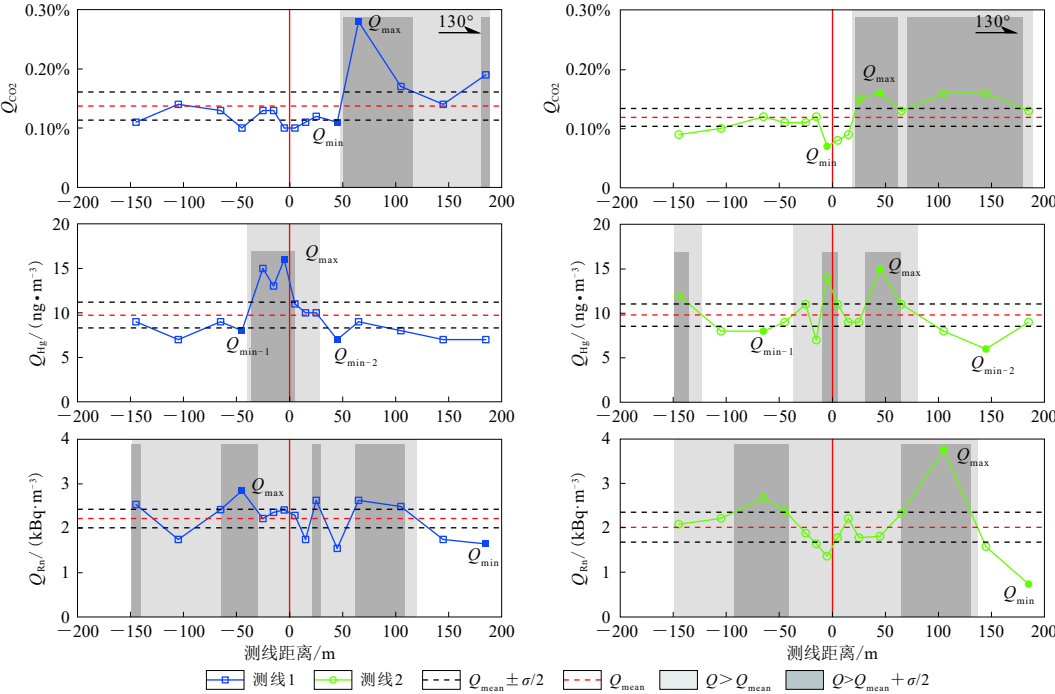


图5 WLBX剖面测线1(左)和2(右)上的土壤气浓度变化曲线

Fig. 5 Soil gas concentration curves of measuring lines 1 (left panels) and 2 (right panels) on the section WLBX

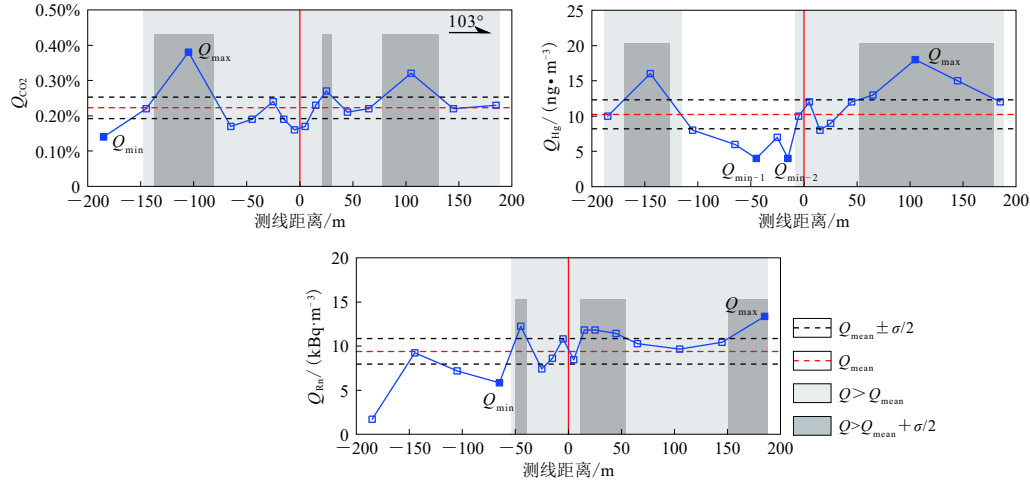


图 6 NRWEGC 剖面测线上的土壤气浓度变化曲线

Fig. 6 Soil gas concentration curves of measuring line on the section NRWEGC

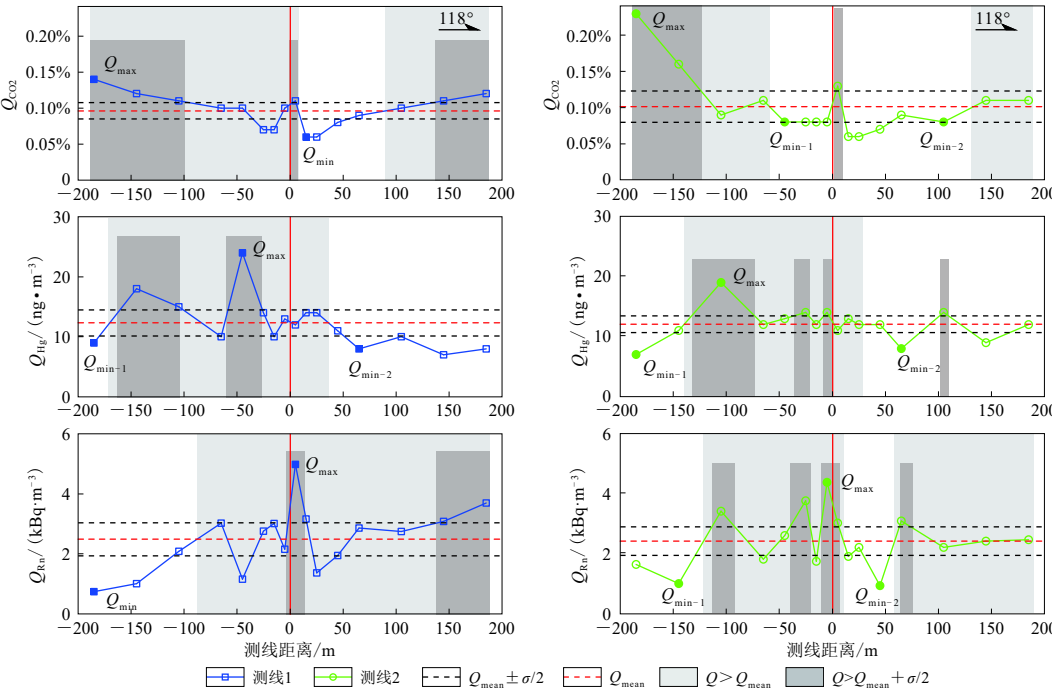


图 7 DLG 剖面测线 1 (左) 和 2 (右) 上的土壤气浓度变化曲线

Fig. 7 Soil gas concentration curves of measuring lines 1 (left panels) and 2 (right panels) on the section DLG

断裂破碎带, 走向约 NE30°, 倾向 SE, 倾角约 50°; 标高处于 900—1 000 m 之间的, 受狼山山前断裂的影响, 地层发生错断, 电阻率等值线呈“双仁”状; 标高 900 m 以下的, 电阻率 $\rho < 17 \Omega \cdot \text{m}$, 电阻率等值线基本呈水平状, 电阻率变化平缓, 无明显的断裂构造. 结合研究区的地质情况(张复, 2015), 本文推测测线部约 25 m 以内为第四系砂土、风成细沙和砂砾, 标高 900—1 000 m 之间为含砾砂岩, 标高 900 m 以下为新近系的泥岩、砂质泥岩及砂质泥岩互层.

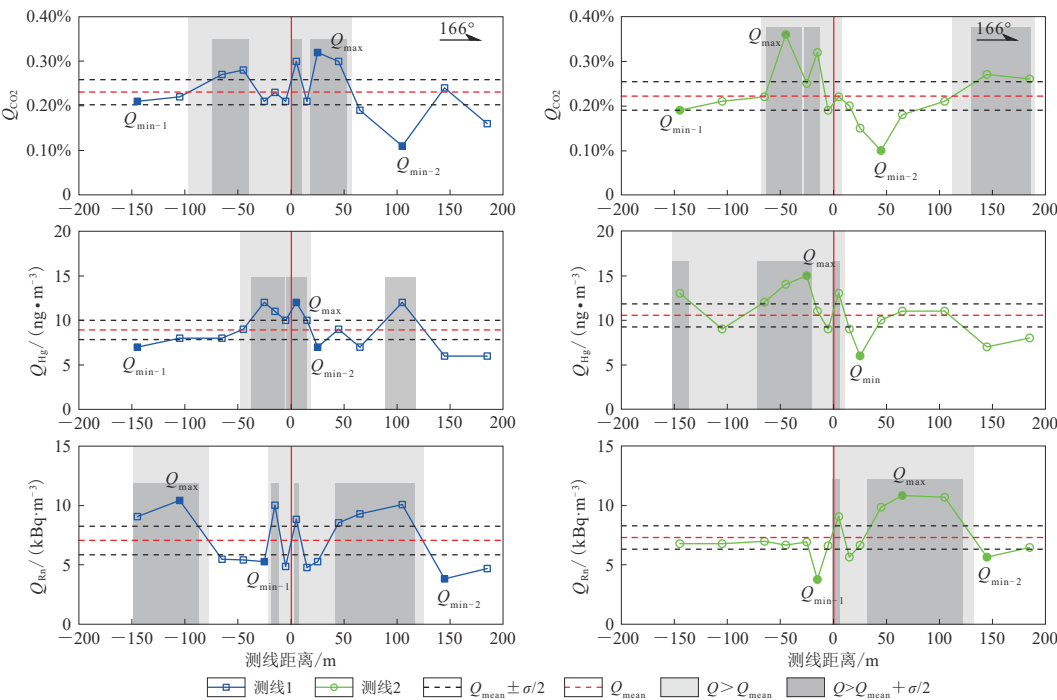


图 8 ZYG 剖面测线 1 (左) 和 2 (右) 上的土壤气浓度变化曲线

Fig. 8 Soil gas concentration curves of measuring lines 1 (left panels) and 2 (right panels) on the section ZYG

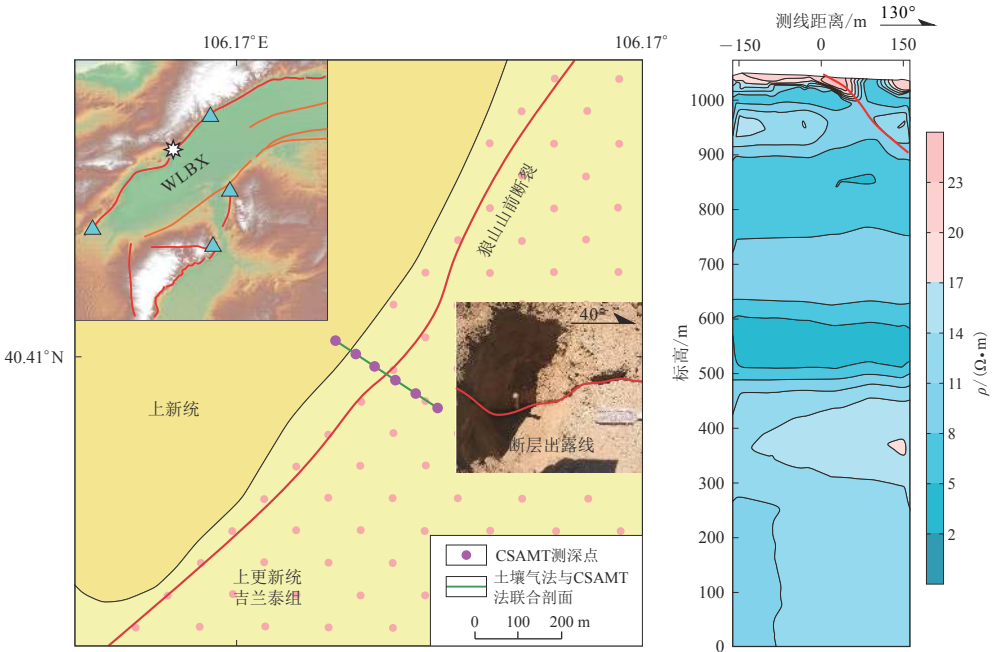


图 9 WLBX 剖面物探布线(左)和电阻率层析成像图(右)

Fig. 9 Layout map of geophysical prospecting line (left) and the electric resistivity tomography for the section WLBX (right)

表 2 土壤气 Rn, Hg 和 CO₂ 浓度的测量结果

Table 2 Measurement results of the concentrations of soil gases Rn, Hg and CO ₂								
测线编号	测项	Q_{mean}	σ	$Q_{\text{mean}} + \sigma/2$	$Q_{\text{mean}} - \sigma/2$	Q_{max}	Q_{min}	K_Q
BYWL-1	CO ₂	0.08%	0.03	0.09%	0.07%	0.14%	0.06%	2.33
BYWL-2		0.11%	0.04	0.13%	0.09%	0.18%	0.04%	4.50
DLG-1		0.10%	0.02	0.11%	0.08%	0.14%	0.06%	2.33
DLG-2		0.10%	0.04	0.12%	0.08%	0.23%	0.07%	3.29
NRWBEGC-1		0.22%	0.06	0.25%	0.19%	0.38%	0.14%	2.71
WLBX-1		0.14%	0.05	0.16%	0.11%	0.28%	0.11%	2.55
WLBX-2		0.12%	0.03	0.13%	0.10%	0.16%	0.07%	2.29
ZYG-1		0.23%	0.06	0.26%	0.20%	0.32%	0.16%	2.00
ZYG-2		0.22%	0.06	0.25%	0.19%	0.36%	0.15%	2.48
BYWL-1	Hg	13	6	16	10	30	6	5.00
BYWL-2		10	3	11	8	15	6	2.50
DLG-1		12	4	14	10	24	8	3.00
DLG-2		12	3	13	11	19	8	2.38
NRWBEGC-1		10	4	12	8	18	4	4.50
WLBX-1		10	3	11	8	16	8	2.13
WLBX-2		10	3	11	9	15	7	2.14
ZYG-1		9	2	10	8	12	7	1.85
ZYG-2		11	3	12	9	15	7	2.14
BYWL-1	Rn	9.784	6.768	13.168	6.400	27.827	4.403	6.32
BYWL-2		16.966	18.015	25.973	7.958	60.091	3.974	15.12
DLG-1		2.486	1.099	3.036	1.937	4.975	0.739	6.73
DLG-2		2.417	0.947	2.891	1.944	4.381	1.008	4.35
NRWBEGC-1		9.394	2.899	10.843	7.944	13.376	5.818	2.30
WLBX-1		2.215	0.417	2.423	2.007	2.842	1.643	1.73
WLBX-2		2.018	0.674	2.355	1.681	3.764	0.739	5.09
ZYG-1		7.058	2.409	8.263	5.854	10.420	3.833	2.72
ZYG-2		7.289	1.970	8.274	6.304	10.822	4.706	2.30

注: Rn和Hg的浓度 Q 的单位分别为 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$; Q_{mean} , σ , $Q_{\text{mean}} + \sigma/2$, $Q_{\text{mean}} - \sigma/2$, Q_{max} 和 Q_{min} 分别为每条测线上浓度的平均值、标准偏差、异常上限、异常下限、最大值和最小值; K_Q 为断层活动性指数。

4 讨论

4.1 跨断层浓度特征和成因

活动断裂带地层常具有高的渗透率和孔隙度,是深部气体向上运输的重要通道,在活动断裂带地表经常观测到明显的气体地球化学异常现象(Irwin, Barnes, 1980; King, 1986; Ghosh *et al*, 2009). 吉兰泰断陷盆地及其周缘不同性质活动断裂的土壤气体 Rn, Hg 和 CO₂ 浓度剖面表现出不同的空间分布形态. 正断层巴彦乌拉山山前断裂上的 BYWL 剖面、正谊关走滑断裂上的 ZYG 剖面在断层主断面附近出现明显的 CO₂ 和 Hg 浓度峰值,而正断层狼山山前断裂上的 WLBX 剖面(Rn, CO₂)、NRWBEGC 剖面和桌子山西缘逆冲断裂上的 DLG 剖面(Hg, CO₂)则在断层主断面上出现浓度低值,在远离断层面处却出现一个或两个浓度峰值(图 4—8). 深部气体沿断裂带的运移主要受断裂带内裂隙发育程度的控制(Toutain, Baubron, 1999; Fu *et al*, 2017). 若断裂带内部发育高密度的共轭张性节理,则将增加断面处岩层的渗透率和孔隙度,为深部高浓度气体的集中逸散提供优选通道,故在断层主断面附近常出现明显的土

壤气体浓度单峰(Annunziatellis *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2018). 断层核部上的岩石经过错动—破碎—研磨而形成的细粒物质与断裂带内水岩相互作用形成的一些黏土矿物等相结合生成断层泥(付碧宏等, 2008; Zheng *et al.*, 2008; 王华林等, 2017), 断层泥及其它破碎产物常充填到断裂带的裂隙中, 导致渗透性降低, 土壤气的运移受到阻隔, 而从远离核部的两侧破碎带中的裂隙逸出, 表现为双峰形态(Faulkner *et al.*, 2003; Annunziatellis *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2018).

断层上气体的地球化学特征的空间变化主要由断层性质、地下物质结构和岩性所决定. 为了切实把握断层结构等, 采用CSAMT法在WLBX气体测量剖面上同时进行了大地电磁测量, 用以探索断层地下结构和岩石性质对气体释放的影响, 结果如图10所示. 可以看出, 在电阻率层析成像剖面(图10a)中, 断层上盘距剖面中心水平距离50—125 m之间存在低阻区($<17\ \Omega\cdot\text{m}$), 该区域也是土壤气 CO_2 和Rn浓度峰值出现的区域(图10b). 野外考察显示, 该低阻区为破碎较强的含砾砂岩裸露区, 而测量剖面的其它区域均为粉砂土(高阻)覆盖区域, 在周边区域渗透性较低的粉砂土的阻挡下, 断层上盘的低阻区成为周边土壤气体的集中逃逸区域, 因而在其上方观测到明显的 CO_2 和Rn浓度峰值(Schütze *et al.*, 2012)(图11). 但是, CO_2 和Rn浓度在断层上较低, 这可能是由于空气沿断层裂隙混入对土壤气造成稀释所致

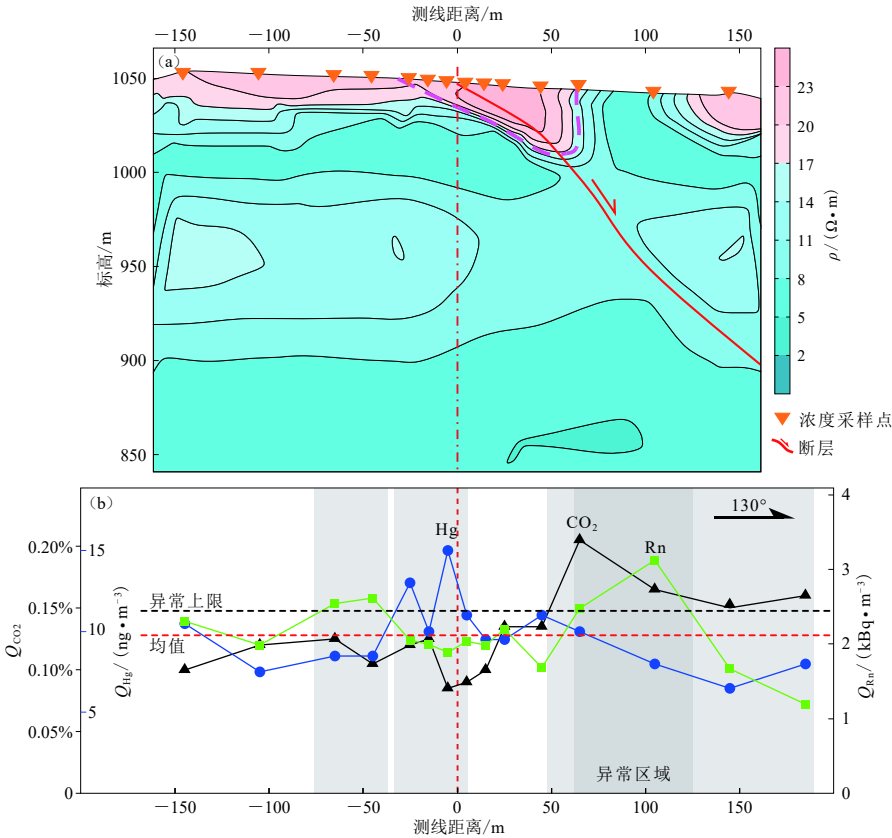


图 10 电阻率层析成像剖面图(a)与 WLBX 剖面的气体浓度曲线图(b)

图中 Rn, Hg 和 CO_2 浓度为两条测线上浓度的平均值

Fig. 10 The electric resistivity tomography (a) and the concentration curves (b) for the section WLBX
The concentrations of Rn, Hg and CO_2 are the average concentrations on the two measuring lines

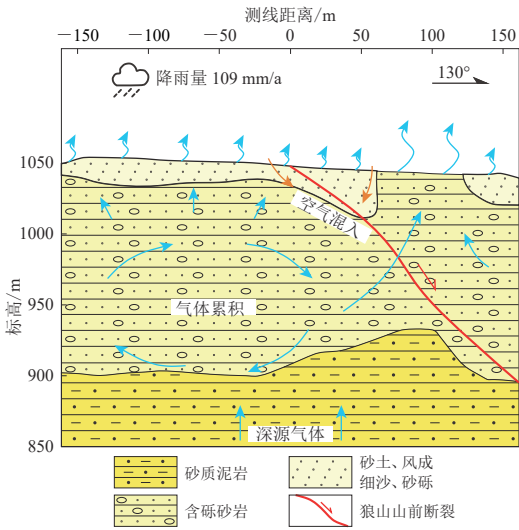


图 11 狼山山前断裂土壤气排放模式图
Fig. 11 Mode of soil gas emission
of Langshan piedmont fault

(Giammanco *et al.*, 2009; Zarroca *et al.*, 2012). Hg 在断层上出现浓度高峰, 可能是由于 Hg 相对 CO₂ 和 Rn 具有更强的挥发性和穿透能力(杨江, 2018), 不易受上覆粉砂土的阻挡(图 10b).

4.2 浓度与释放通量的空间分布特征

将各剖面的 Rn, Hg 和 CO₂ 的浓度和释放通量分别除以其平均值(表 3), 获得测值的相对大小, 结果如图 12 所示. 可见: Rn 浓度在 BYWL 剖面上最高, CO₂ 浓度在 ZYG 和 NRWEGC 剖面上最高, 而 Hg 浓度结果差异较小; Rn 和 Hg 通量在 BYWL 剖面最高, CO₂ 通量在 ZYG 剖面最高. 上述结果表明, 吉兰泰断陷盆地南缘断裂带土壤气具有高浓度和高释放通量的特征.

在非火山区, 除断裂因素外, 土壤气体排放还会受到气象条件(Winkler *et al.*, 2001)、

深部基岩组成(Papp *et al.*, 2008)、浅部土壤次生黏土矿物和土壤化学组成及植被(Lehmann *et al.*, 2000; Han *et al.*, 2014)的影响. 本文研究区属温带大陆性干旱气候, 大部分为戈壁和荒漠区, 年降雨量较少(109 mm/a)(杨丽萍, 2008), 且我们观测工作集中在 7—8 月完成, 整个测量期间未出现降雨天气. 因此, 气象和地表植被因素对断裂带气体观测结果的影响可以忽略不计. 另外, 野外测量过程中, 对各土壤气现场测量剖面均进行了土壤样品采集, 分析了各土壤样品中放射性物质(U, Th, Ra 和 K)含量、总碳(TC)和总汞(Hg), 结果列于表 4.

表 3 土壤气剖面的平均浓度 Q 和释放通量 F

Table 3 The average values of concentration Q and flux F at each soil gas section						
剖面	$F_{CO_2}/(g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	$F_{Rn}/(mBq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$	$F_{Hg}/(ng \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	Q_{CO_2}	$Q_{Rn}/(kBq \cdot m^{-3})$	$Q_{Hg}/(ng \cdot m^{-3})$
BYWL	11.76	39.07	7.46	0.09%	13.375	11
ZYG	15.17	12.71	0	0.23%	7.174	10
DLG	10.52	22.82	0	0.10%	2.452	12
NRWBEGC	9.38	17.25	3.69	0.22%	9.394	10
WLBX	6.54	5.17	0.62	0.13%	2.117	10
平均值	10.67	19.40	2.35	0.15%	6.902	11

²²²Rn 是惰性气体, 为铀系中 ²²⁶Ra 衰变的产物, 半衰期为 3.825 天, 其迁移速度低, 易被活性炭、黏土等吸附. 通常, Rn 在花岗岩中的含量最高, 其次是页岩、石灰岩和砂岩(Baixeras *et al.*, 2001). 钻孔资料显示研究区内地下有多个黏土层, 黏土矿物以伊利石(约 86%)和高岭石(约 11%)为主(牟雪松等, 2018). 另外, 研究区西南缘巴彦乌拉山和狼山出露的基岩主要为花岗岩、片麻岩、砾岩等(韩清, 1982). 一方面, 来自地壳的以游离态或吸附态存在的 Rn 将 CO₂, CH₄ 和 N₂ 等作为载气向地表运移(Etioppe, Martinelli, 2002); 另一方面, 在风化作用和地下水运移作用下, 富含 U 和 Ra 的基岩碎块、溶解铀(U⁶⁺)和 Rn 从盆地边缘

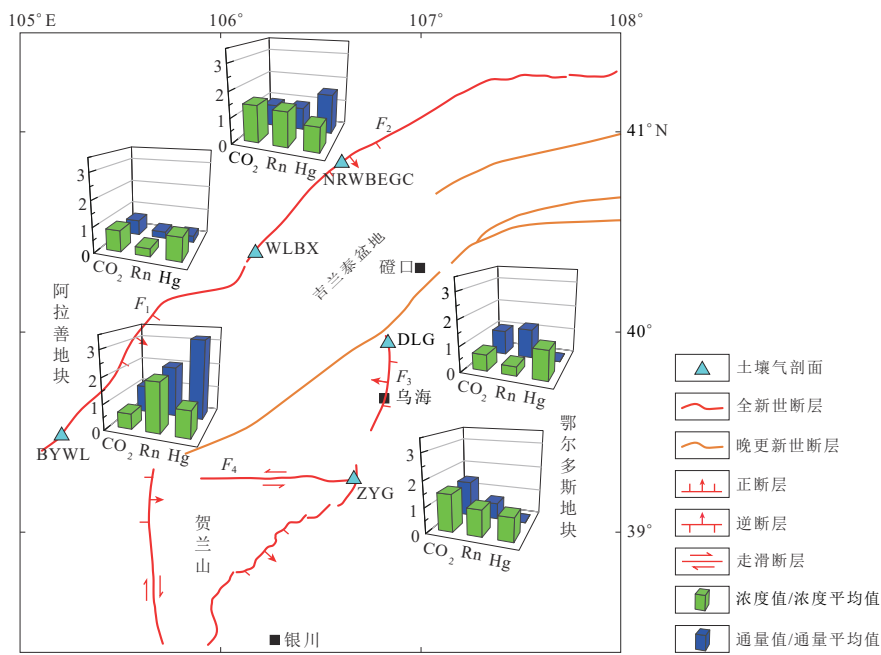


图 12 各测点断层气浓度 Q 和释放通量 F 的空间分布示意图

Fig. 12 Spatial distribution map of concentration Q and flux F of fault gases at all the measuring sites

向盆地内运移,并在砂岩储层中聚集,然后通过断层向地表运移(刘菁华, 2006; Chen *et al.*, 2018)(图 13). 因此,充足的物源、有利的砂岩储层及多层的黏土吸附层,共同造成了研究区西南缘 BYWL 剖面(巴彦乌拉山)和 NRWEGC 剖面(狼山)较高的 Rn 浓度和释放通量,同时也造成了这两个剖面土壤中相对较高的 U, Th 和 Ra 含量(表 4).

自然界中的 CO_2 主要有无机和有机两种成因,而碳酸盐岩的分解是无机成因 CO_2 的重要来源之一(王云等, 2015). 研究区南缘的贺兰山北部山体主要为碳酸盐岩、灰岩、白云岩和石英岩(曹刚, 2001). 除土壤有机成因 CO_2 外,地下深部发生碳酸盐岩热分解,以及碳酸盐岩与地下水发生的水岩相互作用,均会产生大量的 CO_2 (魏国孝, 2011; 王云等, 2015),这可能是导致研究区南缘的 ZYG 剖面(贺兰山北缘)具有较高的 CO_2 浓度和释放通量的重要原因之一(图 13). 碳酸盐岩的存在也造成 ZYG 剖面土壤中 TC 含量远高于其它剖面(表 4).

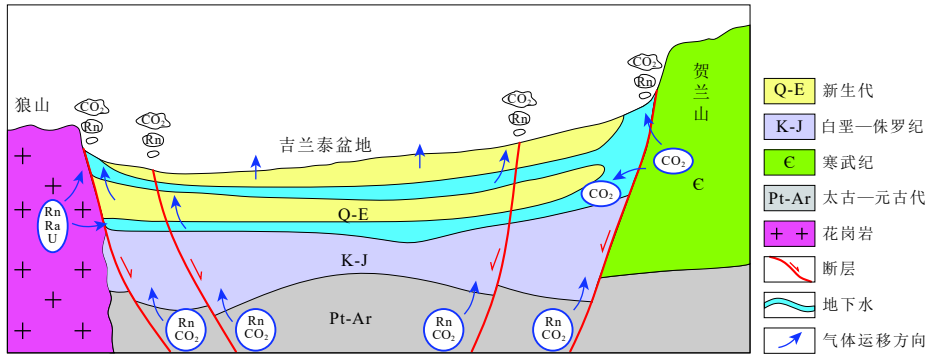


图 13 研究区气体排放模型图

Fig. 13 Schematic diagram for gas degassing model of the studied area

表 4 土样化学组分分析测试结果

Table 4 The test results of chemical composition analysis of soil samples

剖面	$C_U/(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$	$C_{Th}/(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$	$C_{Ra}/(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$	$C_K/(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$	TC含量	$C_{Hg}/(\text{ng}\cdot\text{g}^{-1})$
BYWL	39.8	46.2	28.7	616	0.972%	1.54
DLG	24.2	36.8	23.7	546	0.762%	13.30
NRWBEGC	40.2	52.7	30.6	944	0.163%	5.67
WLBX	17.6	17.6	13.0	553	0.577%	5.85
ZYG	8.1	44.5	27.2	559	2.420%	28.90

注：所采土样于2017年8月由核工业地质研究所进行检测；C为质量活度。

Hg 主要来源于地球深部和某些含汞的硫化物矿床成矿后汞蒸气的挥发(程鉴基, 1997)。研究区 5 个剖面的 Hg 浓度结果差异较小(10—12 ng/m³)，通量差异较大(0—7.46 ng·m⁻²/h)，其中，BYWL 剖面上 Hg 通量远大于其它剖面，而其土壤中 Hg 含量却小于其它剖面(表 4)。另外，已有地质调查资料表明，区域内不存在大范围的硫化物矿床，也未发现含硫化物的岩石出露(韩清, 1982)。因此，研究区域内各观测点 Hg 通量的空间分布差异，可能与研究区域内的断裂活动性差异有关。

断裂带土壤气的地球化学特征与构造及地震活动密切相关(Woodruff *et al*, 2009; Zhou *et al*, 2016)，与中国其它地区的土壤气体 Rn，Hg，CO₂ 浓度和释放通量(图 14)进行比较可知，研究区 Rn 和 Hg 的浓度和通量值较高，均高于唐山地区、山西地震带北段、延怀盆地和怀安盆地，略低于汶川地震破裂带，而 CO₂ 的浓度和通量值与山西地震带北段、延怀盆地和怀安盆地测量结果接近，略低于唐山断裂带，明显低于汶川地震破裂带。汶川地震破裂带炭

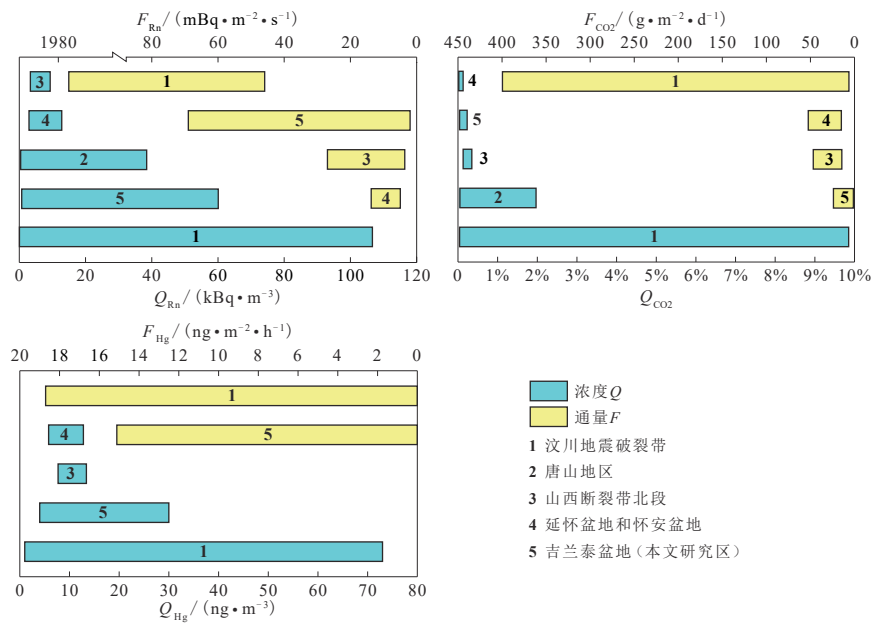


图 14 中国不同地区土壤气浓度和释放通量对比图

数据引自 Li 等(2013), Zhou 等(2016)和 杨江(2018)

Fig. 14 Contrast map of concentrations and fluxes of soil gases from different places in China

Data is after Li *et al* (2013), Zhou *et al* (2016) and Yang (2018)

质泥岩和煤层发育(王萍等, 2009), 且地下含有丰富的天然气藏(Zheng *et al.*, 2013), 汶川 $M_s8.0$ 地震的发生加剧了龙门山断裂带下覆 CO_2 气体沿破裂带的逸散(Chen *et al.*, 2015; 周晓成等, 2017), 这可能是导致汶川地震破裂区 CO_2 浓度和释放通量远高于吉兰泰断陷盆地周缘断裂带的主要原因之一. 综上所述, 吉兰泰断陷盆地周缘断裂带存在较高的土壤气 Rn, Hg, CO_2 浓度和释放通量, 可能是中国大陆未来地震发生的潜在危险区之一, 需要重点关注.

4.3 断层活动性

由于不同断层所处区域地质的地理背景不同, 其土壤气体背景值往往存在较大差异, 仅依各断裂带测值的相对大小来研判不同断裂的活动性, 必然会存在一定的不确定性(邵永新, 2012).

土壤气体断层活动性分析相对指数 K_Q 是近年来建立的断层活动性研判的指标之一. 已有研究表明, 该指标可以有效地降低区域背景因素对断裂带活动性综合研判所造成的影响, 能够更有效地体现断层的活动性(Seminsky, Bobrov, 2009; Seminsky, Demberel, 2013; Seminsky, *et al.*, 2014). 计算 K_Q 指数的前提是每条剖面的测量均是在气象条件、岩土类型等背景因素一致的情况下进行, 且研究的断层均为活动断层. 通常, 具有较高 K_Q 值的断层, 其活动性相对较强(Yang *et al.*, 2018).

研究区 9 条测线上 Rn, Hg 和 CO_2 的 K_Q 值变化范围为 1.73—15.12. 根据 K_Q 平均值变化, 将其划分为 3 个区域(图 15): $K_Q > 5.0$ 为高活动性区, $2.5 < K_Q < 5.0$ 为中活动性区和 $K_Q < 2.5$ 为低活动性区. 由图 15 可见: BYWL-2 测线的 K_Q 平均值位于高活动性区, ZYG 两条测线和 WLBX-1 测线的 K_Q 平均值则位于低活动性区, 其它均位于中等活动性区. 除 BYWL-2 和 NRWEGC-1 测线外, Rn 和 Hg 的 K_Q 曲线变化趋势相近, CO_2 的 K_Q 曲线趋势虽有一定变化, 但变化幅值较小. 研究区 5 个剖面的 K_Q 平均值从大到小分别为 BYWL (正断层), DLG (逆断层), WLBX (正断层), NRWEGC (正断层), ZYG (走滑断层). 结果表明, 正断层和逆断层的 K_Q 平均值大于走滑断层, 且 BYWL 剖面的 K_Q 平均值最高, 这说明巴彦乌拉山山前断裂具有相对较强的活动性, 其发震危险性较高, 应该予以重点关注.

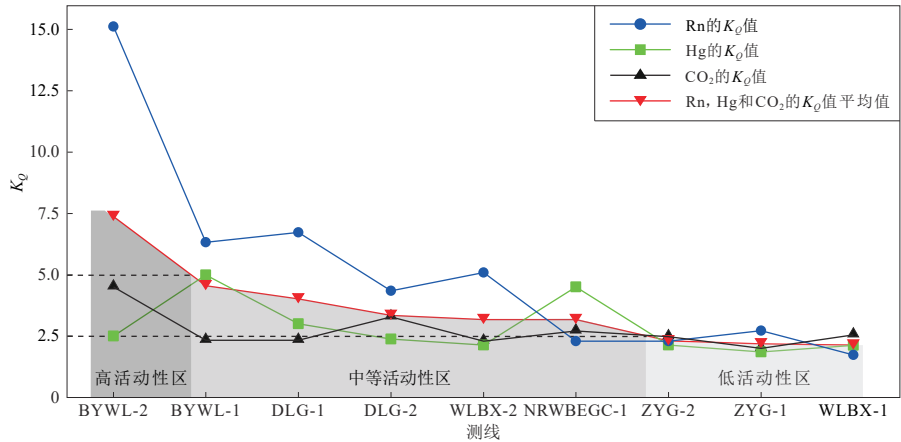


图 15 9 条测线的 K_Q 值递减序列图

Fig. 15 The decrement sequence for K_Q of the nine sections

5 讨论与结论

本文通过吉兰泰断陷盆地周缘断裂带土壤气 Rn, Hg 和 CO_2 的浓度和通量测量, 结合前

人研究资料及电法勘探结果,对该地区的土壤气体排放特征和断层活动性进行分析,得到以下结论:

结合土壤气地球化学方法和可控源音频大地电磁法对狼山山前断裂的研究表明,跨断层土壤气浓度变化受断层地下结构控制,气体受渗透性较低的粉砂土(高阻)阻挡,沿断层上盘破碎较强的含砾砂岩(低阻)集中逃逸,形成 CO_2 和 Rn 浓度峰值. 由于空气沿断层裂隙混入对土壤气造成稀释,导致 CO_2 和 Rn 在断层附近的浓度较低. Hg 具有较强的挥发性和穿透能力,不易受上覆粉砂土的阻挡,故在断层附近出现浓度峰值.

吉兰泰断陷盆地南缘的断裂带土壤气 Rn, Hg 和 CO_2 具有高浓度和高释放通量的特点. 狼山和巴彦乌拉山地区的花岗岩中 U 和 Ra 的运移导致盆地西南缘 Rn 的浓度和通量较高. 贺兰山北部碳酸盐岩的热分解及其与地下水之间的水岩相互作用,导致盆地南缘 CO_2 的浓度和通量较高. Hg 通量的空间分布差异可能与研究区域内的断裂活动性差异有关.

应用断裂带土壤气评估断层活动性的方法有很多,既有使用相对活动强度(最高值与背景值的比值)(刘菁华, 2006)和异常衬度(邵永新, 2012)的方法,也有使用异常最高值(张慧等, 2005)来分析断层活动性的. Seminsky 等通过地球物理方法计算了蒙古中部、贝加尔湖西部和安加拉南部地区共 41 条断层的断层滑移速率,并结合土壤气地球化学结果,提出了断层活动性指数 K_Q (Seminsky, Bobrov, 2009; Seminsky, Demberel, 2013; Seminsky et al, 2014). 该方法可以排除区域背景因素的影响,有效地对断层活动性进行分析,说明了该方法的合理性.

本次研究的土壤气 Rn, Hg 和 CO_2 的 K_Q 值变化范围为 1.73—15.12. Rn 和 Hg 的 K_Q 曲线变化幅度明显,曲线趋势相近, CO_2 的 K_Q 曲线变化不明显,说明土壤气 Rn 和 Hg 的指示性优于 CO_2 . 但 Rn 和 Hg 的指示性哪个更强,还需进一步研究. 研究区内正断层和逆断层的 K_Q 值要大于走滑断层. BYWL 剖面的 K_Q 值最高,说明巴彦乌拉山山前断裂活动性最强,可能是地震发生的潜在危险地区.

本研究对运用断裂带土壤气评估断层活动性及未来地震潜在危险区的研判具有参考意义,但本文仅对吉兰泰断陷盆地进行了一期测量,下一步应对巴彦乌拉山山前断裂进行长期连续观测,监测该断裂的活动性变化,同时进一步开展气体组分来源与贡献研究,对地震危险区进一步研判.

宁夏回族自治区地震局杜鹏副研究员、王晓涛博士等在野外数据采集中给予帮助并提供了相关地质构造资料,内蒙古第二地质矿产勘查开发有限责任公司对 CSAMT 法勘探结果予以解释并绘制图件,审稿专家对本文进行细致审阅并提出了宝贵意见,作者在此一并表示衷心的感谢.

参 考 文 献

- 曹刚. 2001. 内蒙古地震研究 [M]. 北京: 地震出版社: 1-174.
- Cao G. 2001. *Earthquake Research in Inner Mongolia* [M]. Beijing: Seismological Press: 1-174 (in Chinese).
- 程鉴基. 1997. 永断层气异常与活断层关系浅析 [J]. 地壳形变与地震, 17(2): 97-100.
- Cheng J J. 1997. Elementary analysis of relationship between mercury anomaly of fault product gas and active fault [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 17(2): 97-100 (in Chinese).
- 杜建国, 李营, 崔月菊, 孙凤霞. 2018. 地震流体地球化学 [M]. 北京: 地震出版社: 1-272.
- Du J G, Li Y, Cui Y J, Sun F X. 2018. *Seismic Fluid Geochemistry* [M]. Beijing: Seismological Press: 1-272 (in Chinese).

- 付碧宏, 王萍, 孔屏, 郑国东, 王刚, 时丕龙. 2008. 四川汶川 5·12 大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义[J]. 岩石学报, **24**(10): 2237–2243.
- Fu B H, Wang P, Kong P, Zheng G D, Wang G, Shi P L. 2008. Preliminary study of coseismic fault gouge occurred in the slip zone of the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake and its tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **24**(10): 2237–2243 (in Chinese).
- 高立新, 孙加林, 张晖. 2010. 中强地震平静是汶川 8.0 级地震前最显著的地震活动异常[J]. 地震, **30**(1): 90–97.
- Gao L X, Sun J L, Zhang H. 2010. Moderate-to-strong earthquake quiescence is the most significant seismic anomaly before the Wenchuan 8.0 earthquake[J]. *Earthquake*, **30**(1): 90–97 (in Chinese).
- 高立新, 戴勇, 贾宁. 2012. 鄂尔多斯块体周缘地震活动特征分析[J]. 防灾科技学院学报, **14**(4): 70–79.
- Gao L X, Dai Y, Jia N. 2012. Study on seismic activity characteristics in Ordos block and seismic risk analysis of northern edge[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, **14**(4): 70–79 (in Chinese).
- 高立新, 韩晓明, 戴勇, 李娟, 杨红缨. 2017. 鄂尔多斯地块的运动特性与现今地震活动性[J]. 大地测量与地球动力学, **37**(4): 349–354.
- Gao L X, Han X M, Dai Y, Li J, Yang H Y. 2017. Movement characteristics and the present seismic behavior of the Ordos block[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **37**(4): 349–354 (in Chinese).
- 郭正府, 郑国东, 孙玉涛, 张茂亮, 张丽红, 成智慧. 2017. 中国大陆地质源温室气体释放[J]. 矿物岩石地球化学通报, **36**(2): 204–212.
- Guo Z F, Zheng G D, Sun Y T, Zhang M L, Zhang L H, Cheng Z H. 2017. Greenhouse gases emitted from geological sources in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, **36**(2): 204–212 (in Chinese).
- 韩清. 1982. 乌兰布和沙漠的土壤地球化学特征[J]. 中国沙漠, **2**(3): 24–31.
- Han Q. 1982. The geochemical characteristics of the soils in the Ulanbuh desert[J]. *Journal of Desert Research*, **2**(3): 24–31 (in Chinese).
- 何继善. 1990. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社: 1–169.
- He J S. 1990. *Control Source Audio-Frequency Magnetotelluric*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press: 1–169 (in Chinese).
- 李帝铨, 底青云, 王光杰, 李英贤, 石昆法, 岳安平, 白大为. 2008. CSAMT 探测断层在北京新区规划中的应用[J]. 地球物理学进展, **23**(6): 1963–1969.
- Li D Q, Di Q Y, Wang G J, Li Y X, Shi K F, Yu A P, Bai D W. 2008. Fault detection by CSAMT and its application to new district planning in Beijing[J]. *Progress in Geophysics*, **23**(6): 1963–1969 (in Chinese).
- 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[J]. 地震学报, **31**(1): 82–91.
- Li Y, Du J G, Wang F K, Zhou X C, Pan X D, Wei R Q. 2009. Geochemical characteristics of soil gas in Yanqing-Huailai basin, North China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(1): 82–91 (in Chinese).
- 刘菁华. 2006. 活断层上覆盖层中氡迁移的数值模拟及反演拟合[D]. 吉林: 吉林大学: 23–27.
- Liu J H. 2006. *Numerical Simulation, Inversion Fitting of Radon Migration in the Overburden Above Active Fault*[D]. Jilin: Jilin University: 23–27 (in Chinese).
- 马向贤, 郑国东, 梁收运, 樊成意, 王自翔, 梁明亮. 2012. 地质甲烷对大气甲烷源与汇的贡献[J]. 矿物岩石地球化学通报, **31**(2): 139–145.
- Ma X X, Zheng G D, Liang S Y, Fan C Y, Wang Z X, Liang M L. 2012. Contributions of geologic methane to atmospheric methane sources and sinks[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, **31**(2): 139–145 (in Chinese).
- 牟雪松, 马俊, 王永达, 范育新. 2018. 粒度分布的端元建模分析及检验: 以“吉兰泰—河套”盆地西部 DK-12 钻孔晚第四纪沉积物为例[J]. 古地理学报, **20**(3): 489–500.
- Mou X S, Ma J, Wang Y D, Fan Y X. 2018. End-member modeling analysis and test of grain-size distribution: A case from the Late Quaternary sediments of borehole DK-12 in the western Jilantai-Hetao basin[J]. *Journal of Paleogeography*, **20**(3): 489–500 (in Chinese).
- 邵永新. 2012. 土壤氡方法用于断层活动性研究的讨论[J]. 中国地震, **28**(1): 51–60.
- Shao Y X. 2012. A discussion of fault activity research using the measurement results of soil radon[J]. *Earthquake Research in*

- China, **28**(1): 51–60 (in Chinese).
- 石昆法, 张庚利, 李英贤, 于昌明. 2001. CSAMT 法在山东蓬家乔地区层间滑动角砾型金矿成矿预测中的应用[J]. *地质与勘探*, **37**(1): 86–90.
- Shi K F, Zhang G L, Li Y X, Yu C M. 2001. Application of CSAMT method in predicting interlayer sliding breccia type gold deposits in Pengjiakuang region, Shandong Province[J]. *Geology and Prospecting*, **37**(1): 86–90 (in Chinese).
- 谭儒蛟, 胡瑞林, 徐文杰, 梁辉, 曾如意, 龚飞. 2007. 金沙江龙蟠变形体隐伏构造 CSAMT 探测与解译[J]. *地球物理学进展*, **22**(1): 283–288.
- Tan R J, Hu R L, Xu W J, Liang H, Zeng R Y, Gong F. 2007. CSAMT exploration and geological interpretation of perdue tectonic structures of Longpan deformation slope in Jinsha River[J]. *Progress in Geophysics*, **22**(1): 283–288 (in Chinese).
- 王华林, 郑国东, 王纪强, 付海清, 马向贤, 胡超. 2017. 山东黄县弧形断裂带断层泥铁元素化学种分布特征及其地震地质意义[J]. *中国地震*, **33**(2): 248–259.
- Wang H L, Zheng G D, Wang J Q, Fu H Q, Ma X X, Hu C. 2017. Iron speciation of fault gouge from the Huangxian arc fault in Shandong Province, eastern China and its seismo-geological implications[J]. *Earthquake Research in China*, **33**(2): 248–259 (in Chinese).
- 王萍, 付碧宏, 张斌, 孔屏, 王刚. 2009. 汶川 8.0 级地震地表破裂带与岩性关系[J]. *地球物理学报*, **52**(1): 131–139.
- Wang P, Fu B H, Zhang B, Kong P, Wang G. 2009. Relationships between surface ruptures and lithologic characteristics of the Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 131–139 (in Chinese).
- 王喜龙, 李营, 杜建国, 陈志, 周晓成, 李新艳, 崔月菊, 王海燕, 张志宏. 2017. 首都圈地区土壤气 Rn, Hg, CO₂ 地球化学特征及其成因[J]. *地震学报*, **39**(1): 85–101.
- Wang X L, Li Y, Du J G, Chen Z, Zhou X C, Li X Y, Cui Y J, Wang H Y, Zhang Z H. 2017. Geochemical characteristics of soil gases Rn, Hg and CO₂ and their genesis in the capital area of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **39**(1): 85–101 (in Chinese).
- 王云, 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 2015. 地壳流体 CO₂ 的释放与地震关系: 回顾与展望[J]. *地震研究*, **38**(1): 119–130.
- Wang Y, Zhao C P, Ran H, Chen K H. 2015. The relationship between the release of crustal fluid CO₂ and earthquake: Retrospect and prospect[J]. *Journal of Seismological Research*, **38**(1): 119–130 (in Chinese).
- 魏国孝. 2011. 现代吉兰泰盆地地下水演化规律及古大湖补给水源研究[D]. 兰州: 兰州大学: 1–143.
- Wei G X. 2011. *Research on Groundwater Recharge and Evolution in Jilantai Basin and Water Supply for Jilantai-Hetao Paleomegalake*[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1–143 (in Chinese).
- 徐伟进, 高孟潭, 任雪梅, 冯希杰. 2008. 鄂尔多斯地块区内地震活动特征的初步研究[J]. *中国地震*, **24**(4): 388–398.
- Xu W J, Gao M T, Ren X M, Feng X J. 2008. Study on seismic activity characteristics in the Ordos block[J]. *Earthquake Research in China*, **24**(4): 388–398 (in Chinese).
- 杨江. 2018. 首都圈地区土壤气体地球化学特征[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 1–63.
- Yang J. 2018. *Soil Gas Geochemistry Characteristics in the Capital Area of China*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration: 1–63 (in Chinese).
- 杨丽萍. 2008. 基于遥感与 DEM 的“吉兰泰—河套”古大湖重建研究[D]. 兰州: 兰州大学: 1–10.
- Yang L P. 2008. *Reconstruction of Paleo-Megalake ‘Jilantai-Hetao’ Based on Remote Sensing and DEM*[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 1–10 (in Chinese).
- 于昌明. 1998. CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. *地球物理学报*, **41**(1): 133–138.
- Yu C M. 1998. The application of CSAMT method in looking for hidden gold mine[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **41**(1): 133–138 (in Chinese).
- 张复. 2015. 吉兰泰盆地 MIS 3 阶段沉积环境及生态环境研究[D]. 兰州: 兰州大学: 50–60.
- Zhang F. 2015. *The Sedimentary and Ecological Environment Research of Jilantai Basin During the MIS 3*[D]. Lanzhou: Lanzhou University: 50–60 (in Chinese).
- 赵建明, 李营, 陈志, 刘兆飞, 赵荣琦, 荣伟健. 2018. 蔚县—广灵断裂和口泉断裂气体排放和断裂活动性关系[J]. *地震地质*, **40**(6): 1402–1416.
- Zhao J M, Li Y, Chen Z, Liu Z F, Zhao R Q, Rong W J. 2018. Correlation between gas geochemical emission and fault activity

- of the Yuxian-Guangling and Kouquan faults[J]. *Seismology and Geology*, **40**(6): 1402–1416 (in Chinese).
- 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氡、汞地球化学特征[J]. *地震*, **27**(1): 70–76.
- Zhou X C, Guo W S, Du J G, Wang C Y, Liu L. 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).
- 周晓成, 孙凤霞, 陈志, 吕超甲, 李静, 仵柯田, 杜建国. 2017. 汶川 $M_S 8.0$ 地震破裂带 CO_2 、 CH_4 、Rn 和 Hg 脱气强度[J]. *岩石学报*, **33**(1): 291–303.
- Zhou X C, Sun F X, Chen Z, Lü C J, Li J, Wu K T, Du J G. 2017. Degassing of CO_2 , CH_4 , Rn and Hg in the rupture zones produced by Wenchuan $M_S 8.0$ earthquake[J]. *Acta Petrologica Sinica*, **33**(1): 291–303 (in Chinese).
- Annunziatellis A, Beaubien S E, Bigi S, Ciotoli G, Coltella M, Lombardi S. 2008. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Lateral caldera (central Italy): Implications for CO_2 geological storage[J]. *Int J Greenh Gas Con*, **2**(3): 353–372.
- Baixeras C, Erlandsson B, Font L, Jönsson G. 2001. Radon emanation from soil samples[J]. *Radiat Meas*, **34**(1/6): 441–443.
- Baubron J C, Rigo A, Toutain J P. 2002. Soil gas profiles as a tool to characterise active tectonic areas: The Jaut Pass example (Pyrenees, France)[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **196**(1/2): 69–81.
- Becken M, Ritter O, Park S K, Bedrosian P A, Weckmann U, Weber M. 2008. A deep crustal fluid channel into the San Andreas fault system near Parkfield, California[J]. *Geophys J Int*, **173**(2): 718–732.
- Chen Z, Zhou X, Du J, Xie C, Liu L, Li Y, Yi L, Liu H, Cui Y. 2015. Hydrochemical characteristics of hot spring waters in the Kangding district related to the Lushan $M_S = 7.0$ earthquake in Sichuan, China[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **15**(6): 1149–1156.
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, Wang J, Zhou X C, Du J G. 2018. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the capital of China and its environmental effects[J]. *Sci Rep*, **8**(1): 16772.
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, Zheng G D, Xu W, Yan W, Yi L. 2019. CH_4 and CO_2 emissions from mud volcanoes on the southern margin of the Junggar Basin, NW China: Origin, output, and relation to regional tectonics[J]. *J Geophys Res*, **124**(5): 1–15.
- Etiope G, Martinelli G. 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: An overview[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **129**(3/4): 185–204.
- Faulkner D R, Lewis A C, Rutter E H. 2003. On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain[J]. *Tectonophysics*, **367**(3/4): 235–251.
- Finizola A, Aubert M, Revil A, Schütze C, Sortino F. 2009. Importance of structural history in the summit area of Stromboli during the 2002–2003 eruptive crisis inferred from temperature, soil CO_2 , self-potential, and electrical resistivity tomography[J]. *J Volcanol Geoth Res*, **183**(3/4): 213–227.
- Fu C C, Yang T F, Chen C H, Lee L C, Wu Y M, Liu T K, Walia V, Kumar A, Lai T H. 2017. Spatial and temporal anomalies of soil gas in northern Taiwan and its tectonic and seismic implications[J]. *J Asian Earth Sci*, **149**: 64–77.
- Ghosh D, Deb A, Sengupta R. 2009. Anomalous radon emission as precursor of earthquake[J]. *J Appl Geophys*, **69**(2): 67–81.
- Giammanco S, Immè G, Mangano G, Morelli D, Neri M. 2009. Comparison between different methodologies for detecting radon in soil along an active fault: The case of the Pernicana fault system, Mt. Etna (Italy)[J]. *Appl Radiat Isotopes*, **67**(1): 178–185.
- Han X, Li Y, Du J, Zhou X, Xie C, Zhang W. 2014. Rn and CO_2 geochemistry of soil gas across the active fault zones in the capital area of China[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **14**(10): 2803–2815.
- Irwin W P, Barnes I. 1980. Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **85**(B6): 3115–3121.
- Italiano F, Bonfanti P, Ditta M, Petrini R, Slejko F. 2009. Helium and carbon isotopes in the dissolved gases of Friuli region (NE Italy): Geochemical evidence of CO_2 production and degassing over a seismically active area[J]. *Chem Geol*, **266**(1/2): 76–85.
- King C Y. 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: An overview[J]. *J Geophys Res*, **91**(B12): 12269–12281.

- King C Y, King B S, Evans W C, Zhang W. 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California[J]. *Appl Geochem*, **11**(4): 497–510.
- Lehmann B E, Lehmann M, Neftel A, Tarakanov S V. 2000. Radon-222 monitoring of soil diffusivity[J]. *Geophys Res Lett*, **27**(23): 3917–3920.
- Lehmann B E, Ihly B, Salzmann S, Conen F, Simon E. 2004. An automatic static chamber for continuous ^{220}Rn and ^{222}Rn flux measurements from soil[J]. *Radiat Meas*, **38**(1): 43–50.
- Li Y, Du J G, Wang X, Zhou X C, Xie C, Cui Y J. 2013. Spatial variations of soil gas geochemistry in the Tangshan area of northern China[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, **24**(3): 323–332.
- Ma X X, Zheng G D, Liang S Y, Xu W. 2015. Geochemical characteristics of absorbed gases in fault gouge from the Daliushu Dam area, NW China[J]. *Geochem J*, **49**(4): 413–419.
- Papp B, Deák F, Horváth Á, Kiss Á, Rajnai G, Szabó C. 2008. A new method for the determination of geophysical parameters by radon concentration measurements in bore-hole[J]. *J Environ Radioactiv*, **99**(11): 1731–1735.
- Revil A, Finizola A, Sortino F, Ripepe M. 2004. Geophysical investigations at Stromboli volcano, Italy: Implications for ground water flow and paroxysmal activity[J]. *Geophys J Int*, **157**(1): 426–440.
- Schütze C, Vienken T, Werban U, Dietrich P, Finizola A, Leven C. 2012. Joint application of geophysical methods and direct push-soil gas surveys for the improved delineation of buried fault zones[J]. *J Appl Geophys*, **82**: 129–136.
- Seminsky K Z, Bobrov A A. 2009. Radon activity of faults (western Baikal and southern Angara areas)[J]. *Russ Geol Geophys*, **50**(8): 682–692.
- Seminsky K Z, Demberel S. 2013. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia[J]. *Radiat Meas*, **49**(1): 19–34.
- Seminsky K Z, Bobrov A A, Demberel S. 2014. Variations in radon activity in the crustal fault zones: Spatial characteristics[J]. *Izv-Phys Solid Earth*, **50**(6): 795–813.
- Sun X L, Yang P T, Xiang Y, Si X Y, Liu D Y. 2018. Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments[J]. *Geosci J*, **22**(2): 227–239.
- Toutain J P, Baubron J C. 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: A review[J]. *Tectonophysics*, **304**(1/2): 1–27.
- Wang D Y, He L, Shi X J, Wei S Q, Feng X B. 2006. Release flux of mercury from different environmental surfaces in Chongqing, China[J]. *Chemosphere*, **64**(11): 1845–1854.
- Winkler R, Ruckerbauer F, Bunzl K. 2001. Radon concentration in soil gas: A comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations[J]. *Sci Total Environ*, **272**(1/3): 273–282.
- Woodruff L G, Cannon W F, Eberl D D, Smith D B, Kilburn J E, Horton J D, Garrett R G, Klassen R A. 2009. Continental-scale patterns in soil geochemistry and mineralogy: Results from two transects across the United States and Canada[J]. *Appl Geochem*, **24**(8): 1369–1381.
- Yang Y, Li Y, Guan Z J, Chen Z, Zhang L, Lü C J, Sun F X. 2018. Correlations between the radon concentrations in soil gas and the activity of the Anninghe and the Zemuhe faults in Sichuan, southwestern of China[J]. *Appl Geochem*, **89**: 23–33.
- Zarroca M, Linares R, Bach J, Roqué C, Moreno V, Font L, Baixeras C. 2012. Integrated geophysics and soil gas profiles as a tool to characterize active faults: The Amer fault example (Pyrenees, NE Spain)[J]. *Environ Earth Sci*, **67**(3): 889–910.
- Zheng G D, Fu B H, Takahashi Y, Miyahara M, Kuno A, Matsuo M, Miyashita Y. 2008. Iron speciation in fault gouge from the Ushikubi fault zone central Japan[J]. *Hyperfine Interact*, **186**(1/3): 39–52.
- Zheng G D, Xu S, Liang S Y, Shi P L, Zhao J. 2013. Gas emission from the Qingzhu River after the 2008 Wenchuan earthquake, Southwest China[J]. *Chem Geol*, **339**: 187–193.
- Zhou X C, Du J G, Chen Z, Cheng J W, Tang Y, Yang L M, Xie C, Cui Y J, Liu L, Yi L, Yang P X, Li Y. 2010. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ earthquake, southwestern China[J]. *Geochem Trans*, **11**(1): 5.
- Zhou X C, Chen Z, Cui Y J. 2016. Environmental impact of CO_2 , Rn, Hg degassing from the rupture zones produced by Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ earthquake in western Sichuan, China[J]. *Environ Geochem Health*, **38**(5): 1067–1082.