

鲍志诚,赵爱平,吕坚,等. 2022. 瑞昌—武宁活动断裂带土壤气地球化学特征[J]. 地震研究, 45(2): 249–256, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2022.0021.

Bao Z C, Zhao A P, Lyu J, et al. 2022. Geochemical characteristics of the soil gas in the Ruichang – Wuning Active Fault Zone[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 249–256, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2022.0021.

瑞昌—武宁活动断裂带土壤气地球化学特征*

鲍志诚^{1,2}, 赵爱平², 吕坚², 肖健², 周红艳², 宁洪涛², 汤兰荣², 陈浩²

(1. 江西省地震局 江西省防震减灾与工程地质灾害探测工程研究中心, 江西 南昌 330013;
2. 江西省地震局, 江西 南昌 330026)

摘要: 对瑞昌—武宁断裂带瑞昌段进行了跨断层气体地球化学流动测量, 测定了断裂带土壤气 Rn 和 CO₂ 浓度, 分析了该断裂带的气体地球化学特征, 结合赣南地区 *b* 值讨论了断裂带气体分布特征与构造活动性的可能关系。结果显示: 桂林桥、伍家畈土壤气 Rn 和 CO₂ 浓度均表现出强正相关特征, 说明断裂带 Rn 是基于 CO₂ 载气运移至地表浅层。Rn 和 CO₂ 浓度峰值均出现在断裂带附近, 桂林桥测线中部土壤气浓度明显高于两端, 而伍家畈测线中部与两端浓度平均值相对接近, 这种浓度空间释放特征的差异可能主要是震后断裂带愈合程度不一所致。两条测线土壤气 Rn 浓度水平较高, *b* 值扫描发现研究区应力呈增强趋势, 表明断裂带活动性较强, 可能指示土壤气 Rn 浓度与断裂带的活动性有着密切的联系。

关键词: 瑞昌—武宁断裂带; 土壤气; 释放特征; 气体来源

中图分类号: P315.724 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000–0666(2022)02–0249–08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000–0666.2022.0021

0 引言

已有研究(汪成民等, 1991; 杜建国, 康春丽, 2000a, b; 刘耀炜, 2006; 李营等, 2009)认为地下气体组分(Rn、Hg、CO₂、H₂、He、CH₄等)能够客观、灵敏地反映地壳的应力、应变状态, 因为地震孕育和发生过程中, 地下物质迁移、能量释放和应力改变导致断裂带及其周边区域的气体地球化学场发生显著改变(King et al, 1996; Baubron et al, 2002; 陶明信等, 2005; Fu et al, 2005; Ciotoli et al, 2007; 李营等, 2009; 杜建国等, 2018; Chen et al, 2019)。地震发生前后地下气体常表现出各种异常, 映震效果显著, 是地震

前兆异常的主体, 这使得气体地球化学方法及其手段在地震监测预报相关研究中得到广泛应用(杜乐天, 2005; 杜建国等, 2018)。国内学者利用流动地球化学测量手段针对中国大陆主要地震带和大型构造带如张家口—渤海地震带、山西地震带、郯庐地震带、六盘山断裂带、鄂尔多斯西缘地震带、海原断裂带、南北地震带、天山断裂带、鲜水河断裂带等开展了大量气体地球化学观测和研究工作(李营等, 2009; Li et al, 2010, 2013; Han et al, 2014; 崔月菊等, 2016; 周晓成等, 2017; 王喜龙等, 2017; Chen et al, 2018; 杨江等, 2019; 张磊等, 2018; Xiang et al, 2020; Sun et al, 2021)。

九江—瑞昌地区位于长江中游地震带。2005

* 收稿日期: 2021–10–17.

基金项目: 江西省防震减灾与工程地质灾害探测工程研究中心项目(SDGD202019)和国家自然科学基金面上项目(41574057)联合资助.

第一作者简介: 鲍志诚(1985–), 工程师, 主要从事地震地下流体及流体地球化学研究. E-mail: bzc229@126.com.

年九江—瑞昌 5.7 级地震后, 长江中游地震带发生多次 5 级以上地震, 进入新的 5 级以上地震活跃幕, 赣北地区中等地震持续活跃, 发生 $M_L 3.0 \sim 3.9$ 地震 24 次, $M_L 4.0$ 以上地震 3 次, 最大为 2011 年 9 月 10 日瑞昌—阳新 $M_L 4.9$ 地震。而自 2011 至今该地区尚未发生中强以上地震, 未来中强地震发震的危险性及紧迫性进一步增强, 值得密切关注。目前, 前人针对九江—瑞昌地区只开展了九江 2 井的地震水文地球化学相关研究 (鲍志诚等, 2019, 2021), 关于瑞昌—武宁断裂带气体地球化学监测等相关工作尚未开展。因此, 本文以瑞昌—武宁断裂带瑞昌段土壤气流动测量为基础, 开展该断裂带气体地球化学特征研究, 构建断裂带活动特征的气体地球化学判定指标, 为探究土壤气浓度释放特征与地震活动性关系提供科学参考, 也为九江—瑞昌地区震情跟踪及异常核实工作提供技术支撑。

1 研究区概况

在大地构造部位上, 九江—瑞昌地区位于秦岭—大别造山带和扬子准地台两大地质单元的边界交接地带。研究区附近存在两条不同方向的重大的(区域)断裂带, 一条为 NE 向的庐江—广济断裂 (郟庐断裂带南段), 另一条为 NW 向的襄樊—广济断裂。郟庐断裂带是中国大陆一条极为重要的断裂带, 其活动性延续至今, 为中国东部最大的近代地震活动带。其主干断裂沿秦岭—大别造山带的东南边缘延伸, 终止于长江岸边的广济附近, 南段切割并错移大别山带而构成断裂尾端。襄樊—广济断裂带是一条区域性深大断裂, 构成了秦岭—大别造山南缘边界断裂构造带的东南部分, 被认为是扬子地块与秦岭—大别造山带的分界线。九江地震区位于这两大地质构造单元的交界地带, 构造背景十分特殊, 具有中强地震发生的地质背景。

瑞昌—武宁断裂带位于赣西北地区, 北起瑞昌盆地, 经范家铺、横港等地向南至武宁及铜鼓以南, 整体走向呈 $NE 40^\circ \sim 50^\circ$, 长约 150 km (曾新福等, 2016) (图 1)。该断裂形成于燕山

期, 发育于中—新元古届、古生界和三叠系, 主要由一系列 NNE 和 NE 向断裂斜列分布而成。该断裂上测线附近的浅层物探结果显示, 断层两侧基岩存在明显落差, 中更新统砾石层存在不连续分布。根据物探解译结果在解译断层两侧布设了联合钻孔, 发现更新统砾石层被错动数米, 白云质灰岩形成数米的基岩陡坎, 并且在钻孔中发现有断层破碎带。断层物质热释光年代样品测试结果显示该断裂在第四纪以来仍有明显活动, 属中更新世断裂, 根据地层的错动判断该断层为正断层 (中国地震局地质研究所等, 2006)。在该断裂及周边地区发生过 1575 年 3 月 5 级、1995 年 4 月 $M_L 4.9$ 和 2005 年 11 月九江—瑞昌 $M_S 5.7$ 破坏性地震 (图 1), 其中九江—瑞昌 5.7 级地震是近几年来我国东部地区造成灾害最严重、损失最大的地震, 造成 13 人死亡, 直接经济损失 20.4 亿元人民币 (吕坚等, 2008; Han *et al.*, 2014)。因此, 在该断裂上开展土壤气测量对深入认识瑞昌盆地的几次破坏性地震及该断裂的地震活动性特征具有重要意义。

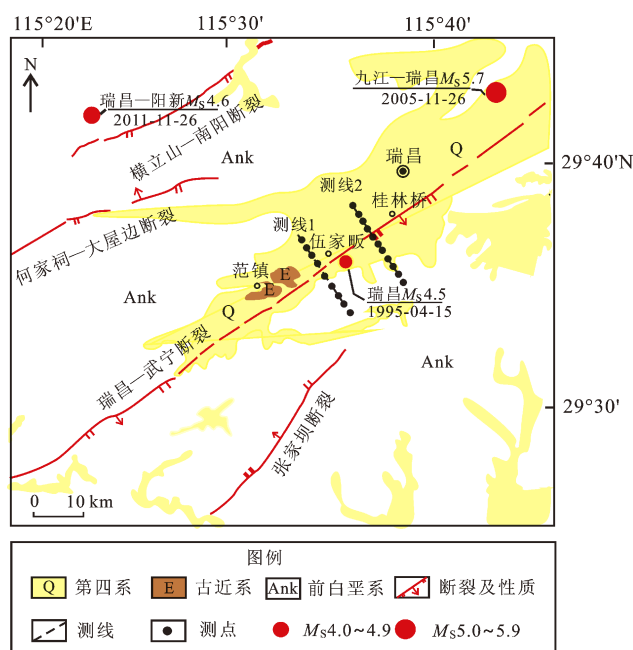


图 1 九江—瑞昌地区地质构造及测线分布概况 (据曾新福等, 2016)

Fig. 1 Geological structures and two survey lines in Jiujiang - Ruichang area (according to Zeng *et al.*, 2016)

2 布线和测量方法

2019年5月29—31日，课题组在瑞昌—武宁断裂带瑞昌段的桂林桥和伍家畈分别布置了2条流动观测测线，测线间距约为5 km（图1），测点间距为50 m。课题组在野外现场测量了土壤气中的Rn、CO₂含量，土壤湿度为40%~55%，土壤温度为25.5℃~33.5℃。测量时采用测氦仪、二氧化碳仪串联方式进行，抽气泵抽气通过过滤膜进入测氦仪，再进入二氧化碳仪，具体测量过程如图2所示。首先在各测点处打孔，孔径约为30 mm、深度为800 mm，取样器置于孔内，封住孔口，开始取样、测量。Rn气浓度使用Alpha GUARD P2000测氦仪测定，仪器灵敏度为50 cpm/(kBq·m⁻³)，流量为0.5 L/min，仪器校准误差优于3%；CO₂气体浓度测量使用华云GXH-3010E1E二氧化碳仪测定，测量范围为0~1.000%，分辨率为0.001%。测量前，用土壤气清洗采样气室，然后抽取土壤气，反复提压气室活塞，用薄膜过滤采样。测氦仪使用标准氦室进行校准，体积活动响应平均值为0.921。测量时为了消除Tn射气的影响，采取了两个措施：一是用长导管让Tn射气在进入仪器之前完成衰变；二是连续测量15 min，取静置、稳定后的8 min数据的平均值。本文还选取了郟庐断裂带中、南段上柯坦、肥东、泗县、重岗的流动测线测量数据用于对比分析，见表1。

3 测量结果

取断裂带上两条测线上对应测点的土壤气

Rn、CO₂浓度的平均值作为各测点综合观测值，对数据进行K-S非参数检验，结果显示土壤气Rn、CO₂的浓度综合观测值均符合正态分布，因此取综合观测值的平均值作为各组分的背景值。为避免极值对背景值产生影响，剔除极值后取平均值作为相应组分活动背景值（Walia *et al*, 2009; Zhou *et al*, 2017）。本文将大于平均值加2倍均方差的值视为极值，以剔除极值后的背景值加均方差作为气体异常点判定下限即异常限（苏鹤军等，2005）。

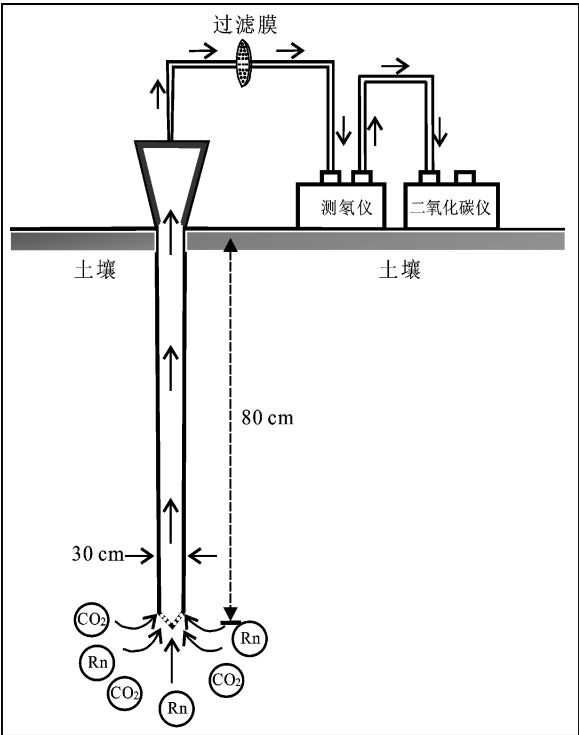


图2 土壤气测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soil gas measurement

表1 研究区土壤气Rn、CO₂地球化学背景测量结果

Tab. 1 Geochemical background values of Rn and CO₂ in the study area

测线	Rn 浓度/(Bq·m ⁻³)						CO ₂ 浓度 (%)						备注
	最低值	最高值	背景值	标准偏差	异常限	K _Q	最低值	最高值	背景值	标准偏差	异常限	K _Q	
桂林桥	5 635	79 360	38 937	30 135	69 072	1.54	0.22	1.76	0.81	0.50	1.31	1.46	部分测点经过耕地，湿度大
伍家畈	7 894	136 192	71 984	35 102	107 086	1.35	0.18	4.50	1.98	1.32	3.30	1.08	部分测点经过耕地
柯坦	—	325 000	78 500	—	205 000	—	—	—	—	—	—	—	郟庐断裂带南段
肥东	—	60 000	20 200	13 680	40 720	—	—	0.46	0.15	0.09	0.29	—	郟庐断裂带南段
泗县	—	130 000	11 720	15 070	34 330	—	—	1.67	0.38	0.32	0.86	—	郟庐断裂带安徽段
重岗	441	62 886	19 949	20 770	63 748	—	0.03	8.43	2.246	2.57	7.669	—	郟庐断裂带江苏段

由表 1 可知, 桂林桥测线的土壤气 Rn 、 CO_2 浓度均低于伍家畈测线, 但两条测线上的土壤气 Rn 浓度释放大致呈中间高、两侧低的特征, 断层位置均大致在桂林桥和伍家畈测点 6 和 7 之间, 即断层附近土壤气释放高, 远离断层的两侧逐渐降低, 对断层破碎带的指示作用显著 (图 3a-1, b-1)。桂林桥测线第 4、5 测点土壤气测量数据显著下降, 与测点钻孔湿度大、抽气受阻有关, 且土壤气 CO_2 与 Rn 的形态一致性较好, 但数据更为离散 (图 3a-1)。

已有研究表明, 来源于断裂带深部的气体, 其 Rn 浓度与 CO_2 或 CH_4 浓度具有正相关特性。如 Yang 等 (2003) 对中国台湾地区活动断裂上的 Yan - Chao (YC) 研究区和 Chung - Lun (CL) 研究区的泥火山气体研究发现, YC 区具有壳源

特征, CL 区具有幔源特征。在 YC 区, CH_4 作为载体将 Rn 运移至地表; 在 CL 区, CH_4 和 CO_2 作为载气将 Rn 运移至地表。Ciotoli 等 (2007) 对意大利 Fucino 盆地气体运移机制开展研究时发现 Rn 与 CO_2 的浓度成正相关, 认为 Rn 是通过 CO_2 运移至地表的。 Rn 在运移过程中有相应的载体 (如 CO_2 、 CH_4) 则更易迁移 (Etiope, Martinnelli, 2002; Ciotoli *et al*, 2007)。Pearson 相关系数显示 (图 3a-2, b-2), 桂林桥测线 Rn 与 CO_2 浓度相关系数 R 为 0.95 (极强正相关), 伍家畈测线 R 为 0.65 (强正相关), 图中阴影部分为置信带。说明桂林桥测线 CO_2 可能是 Rn 运移过程中的主要载体, 而伍家畈测线 Rn 运移的载体可能具有多解性, 而 CO_2 来源可能也相对复杂, 这可能与该测线部分测点土壤覆盖层为耕地有关。

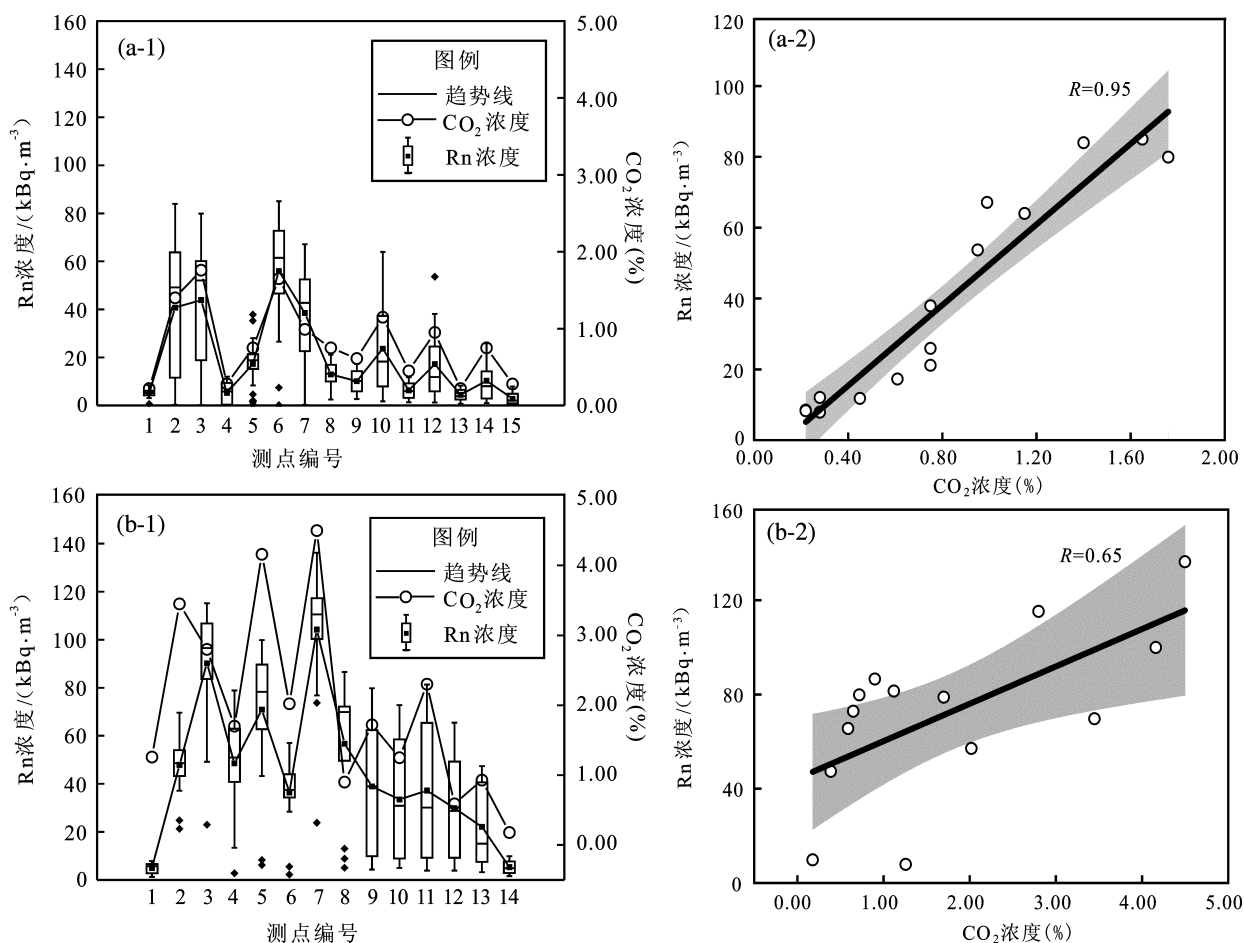


图 3 桂林桥 (a) 和伍家畈 (b) 测线断裂带 Rn 、 CO_2 浓度测值及其相关性

Fig. 3 The measured values and relationships between Rn and CO_2 concentrations along Guilinqiao survey line (a) and Wujiafan survey line (b)

4 讨论

4.1 土壤气 Rn 浓度与断裂带活动性关系

土壤气中 Rn 的浓度受基岩类型、裂隙发育、区域构造应力场、运移载体、地下水等环境因素的综合影响 (Sun *et al.*, 2018), 因此不同区域土壤气 Rn 浓度存在差异性。Rn 浓度在断层不同位置的差异可能与 Rn 的运移机制、断层的破碎程度及闭锁程度密切相关。孙小龙等 (2016) 研究认为, Rn 既可能来源于大气或浅层地表, 也可能来源于地下深部, 还可能来自于沉积地层中有机质的分解, 甚至来源于地幔, 其中来自深部的可能性与区域应力应变也有着密切的关系。桂林桥和伍家畈测线 Rn 浓度背景值分别为 $38\ 937\ \text{Bq/m}^3$ 和 $71\ 984\ \text{Bq/m}^3$, 前者明显小于后者。如表 1 所示, 与郯庐断裂带南段的柯坦相比, 瑞昌—武宁断裂带瑞昌段测线的土壤气 Rn 浓度相对较小, 但与郯庐断裂带安徽段及江苏段相比土壤气 Rn 浓度明显更高 (张扬等, 2016; 郑海刚等, 2016; 方震等, 2019)。孟亚锋等 (2019) 研究认为郯庐断裂带中段 (嘉山—郯城) 处于闭锁状态, 地震活动较弱, 相比之下南段活动性更强, 这与土壤气的测量结果基本一致。从土壤气 Rn 浓度分布可以看出, 伍家畈测线存在异常的测点更多, 土壤气 Rn 浓度水平也较高 (图 3b-1)。2005 年 11 月 26 日, 在瑞昌—武宁断裂带瑞昌段发生 5.7 级地震, 震中位置靠近桂林桥剖面。笔者推断出现上述现象的原因与地壳下部还没有完全形成闭锁, 且伍家畈测线断层愈合程度相对桂林桥更弱, 有利于深部流体向上扩散与运移有关。

构造活动地区的断裂带土壤气中 CO_2 来源主要包括: 地幔去气作用, 碳酸盐变质、分解, 有机质氧化, 微生物和植物的呼吸作用, 即壳幔成因、生物成因 (Sugisaki, 1983)。非火山地区的断裂带土壤气 CO_2 含量高, 一般认为是由深断裂造成的, 故 CO_2 常被作为判别构造活动和地震危险性的指示剂 (Irwin, Barnes, 1980; Annunziatellis *et al.*, 2003)。瑞昌—武宁断裂带桂林桥、伍家畈测线 CO_2 浓度背景值分别为 0.81%、1.98%, 明

显高于郯庐断裂带安徽段的 0.15% ~ 0.91% (郑海刚等, 2016; 张扬等, 2016), 这可能与测量时间及土壤覆盖层差异有关。本次测量在 2019 年 5 月开展, 研究区正值春季, 降雨较多, 所以土壤湿度较高, 同时, 相比其他季节, 该季节生物成因的 CO_2 更多。此外, 部分测线经过耕地、微生物和植物的呼吸作用明显更强。桂林桥测线的 CO_2 浓度明显小于伍家畈, 一方面可能是桂林桥测线破碎程度相对较高, 导致剖面的渗透性较高, 不利于 CO_2 的积累, 另一方面可能是伍家畈测线地势低洼土壤湿度高, 导致有机成因 CO_2 较多。

土壤气浓度与断层地下破裂程度密切相关, 而断层不同位置的破碎程度常常有差异, 进而表现为地层渗透率差异, 最终表现为土壤气释放强度的差异。为了消除不同观测测线因断层活动和结构、气体源区、地质以及气候等因素的影响, 常使用释放强度 K_Q 来表征断裂带土壤气释放特征 (杨江等, 2019)。 K_Q 一般被定义为测线中部测点平均值与测线两端测点平均值之比 (主断面附近 150 m 范围是测线中部, 之外是测线两端)。经计算桂林桥测线 Rn、 CO_2 的 K_Q 分别为 1.54 和 1.46, 伍家畈测线 Rn、 CO_2 的 K_Q 分别为 1.35 和 1.08。虽然伍家畈测线 Rn、 CO_2 浓度明显高于桂林桥测线, 但释放强度却相反, 说明桂林桥测线土壤气释放集中在测线中部, 而伍家畈测线中部则与两端土壤气的释放相对一致。

桂林桥测线土壤气 Rn 与 CO_2 的浓度成极强正相关, 暗示该测线的土壤气可能来自断层深部, 而伍家畈测线的相关系数则低得多, 暗示其土壤气来源复杂, 具有多源特征。从 Rn 与 CO_2 的散点图 (图 3a-1, b-1) 可知, 桂林桥测线的 Rn 浓度随 CO_2 浓度快速增加, Rn 浓度的增加可能反映地壳深部信息; 而伍家畈测线的 CO_2 浓度快速增加, Rn 浓度变化相对缓慢, 高浓度 CO_2 可能是部分测点因为耕种地中的微生物的呼吸作用形成 CO_2 并产生水平迁移所导致。

4.2 土壤气 Rn 浓度与 b 值的关系

b 值是重要的地震前兆指标之一。以往研究认为强震前先出现高 b 值, 然后下降, 在下降过程中发震。低 b 值异常区即未来强震的震源体 (李全

林等, 1978)。\$b\$ 值是古登堡和里克特提出的震级-频度 (G-R) 关系式中的系数 (Gutenberg, Richter, 1944):

$$\lg N = a - bM \quad (1)$$

式中: \$M\$ 为震级; \$N\$ 为 \$M \geq M_c\$ (最小完整性震级) 地震的累积频度; \$a\$、\$b\$ 为常数。

影响 \$b\$ 值的主要因素包括有效剪应力、介质的非均匀性以及温度、流体、构造条件等。花岗岩声发射实验研究显示: 各变形阶段的平均 \$b\$ 值随应力增加而系统性减小, 即 \$b\$ 值与应力呈反比关系, 实际地震研究中 \$b\$ 值的趋势性降低可能表征研究区所处环境应力的增强。

本文选取 1980 年 1 月—2020 年 12 月赣北地区 \$M_L 2.0 \sim 5.0\$ 地震进行 \$b\$ 值计算, 计算时震级分档间隔取 0.1, 每个统计单元内的地震样本数不少于 30, 参与拟合的有效震级分档数不低于 5 档。按 \$0.1^\circ \times 0.1^\circ\$ 的间距将研究区网格化, 统计单元的半径 \$r\$ 取 20 km, 对于地震分布较稀疏的局部区域, 扩大 \$r\$ 值, 最大不超过 40 km, 计算结果如图 4 所示。图 4 显示, 赣鄂皖交界的九江—瑞昌地区构造活动趋于增强, 并形成了以瑞昌盆地为中心的低 \$b\$ 值、高应力区, 区域应力的积累持续增强。伍家畈剖面的氦浓度明显高于桂林桥剖面, 可能与其构造活动性更强、应力积累更充分有关, 这与 \$b\$ 值空间分布吻合。

与庐断裂带中南段及唐山断裂带等重大断裂带相比, 瑞昌—武宁断裂带土壤气 Rn、CO\$_2\$ 释

放强度较高, 说明研究区总体构造活动趋于加强, 这与研究区内已形成的以瑞昌盆地为中心的低 \$b\$ 值、高应力区结果相一致。综上所述, 断裂带附近土壤气浓度高, 特别是土壤气 Rn 可能主要受断裂构造活动及区域应力增强控制, 说明气体高值是断裂存在的表征且能有效地指示断裂破碎带位置。对于 Rn、CO\$_2\$ 气体定量化的来源及贡献, 尚需进一步对溶解气体 \$^3\text{He}\$、\$^4\text{He}\$ 与 \$\delta^{13}\text{C}\$ 组成特征开展分析研究。

5 结论

本文通过对瑞昌—武宁断裂瑞昌段桂林桥、伍家畈两条测线 29 个测点的土壤气开展流动野外测量, 分析了该断裂带土壤气释放及地球化学特征, 同时结合赣北地区 \$b\$ 值空间分布图, 讨论了断裂带土壤气释放特征与构造活动的内在关系, 得到以下结论:

(1) 桂林桥、伍家畈两条测线土壤气 Rn 和 CO\$_2\$ 的地球化学背景值分别为 38 937 Bq/m\$^3\$、0.81% 和 71 984 Bq/m\$^3\$、1.98%; Rn 和 CO\$_2\$ 地球化学背景场明显呈现西南高、东北低的空间分布特征。

(2) 通过数据测量, 并结合测点土壤覆盖层实际情况开展研究, 发现土壤气中各组分来源和浓度值所受的影响因素不同。Rn 浓度可能主要受到区域内岩石地球化学因素影响, 主要来源于地下深部; CO\$_2\$ 来源相对复杂, 可能含有来自地壳浅层的成分, 例如伍家畈测线地表破碎程度和微生物活动是影响 CO\$_2\$ 释放的主要因素。两条测线的 CO\$_2\$ 和 Rn 均达到了强相关, 说明 CO\$_2\$ 是 Rn 迁移释放的载气。桂林桥测线的 Rn 和 CO\$_2\$ 释放强度略高于伍家畈, 这种浓度空间释放特征的差异可能主要是震后断层愈合程度不一样所致。总体而言, 瑞昌—武宁断裂带附近土壤气浓度高, 说明气体高值是断裂存在的表征, 且能有效地指示断裂破碎带位置, 特别是土壤气 Rn 可能主要受断裂构造活动及区域应力增强的控制。

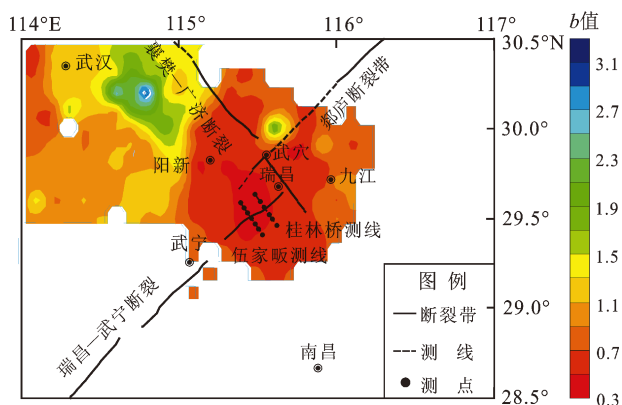


图 4 赣北地区 \$b\$ 值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of \$b\$-value in North Jiangxi Province

国家自然灾害防治研究院刘耀炜研究员及审稿专家对本文的撰写提供了帮助, 在此一并表示感谢!

参考文献:

- 鲍志诚,高小其,张磊,等. 2019. 九江地震台观测井水氢氧同位素特征及意义[J]. 中国地震,35(3):499–508.
- 鲍志诚,赵影,赵爱平,等. 2021. 九江地区地下水水文地球化学特征及成因[J]. 大地测量与地球动力学,41(5):471–477.
- 崔月菊,杜建国,陈杨,等. 2016. 汶川 M_s 8.0 地震前后龙门山断裂带 CO_2 和 CH_4 排气增强[J]. 地震研究,39(2):239–245.
- 杜建国,康春丽. 2000a. 地震地下流体发展概述[J]. 地震,20(S1):107–113.
- 杜建国,康春丽. 2000b. 强地震前兆异常特征与深部流体作用探讨[J]. 地震,20(3):95–101.
- 杜建国,仵柯田,孙凤霞. 2018. 地震成因综述[J]. 地震前缘,25(4):255–267.
- 杜乐天. 2005. 地球排气作用的重大意义及研究进展[J]. 地质评论,51(2):174–179.
- 方震,张彬,李军辉. 2019. 庐江地热温泉区活动断裂土壤气氡(Rn)释放对环境的影响[J]. 环境化学,38(8):1906–1911.
- 李全林,陈锦标,于录,等. 1978. b 值时空扫描——监视破坏性地震孕育过程的一种手段[J]. 地球物理学报,21(2):101–125.
- 李营,杜建国,王富宽,等. 2009. 延怀盆地土壤气地球化学特征[J]. 地震学报,31(1):82–91.
- 刘耀炜. 2006. 我国地震地下流体科学40年探索历程回顾[J]. 中国地震,22(3):222–235.
- 吕坚,郑勇,倪四道,等. 2008. 2005年11月26日九江—瑞昌 M_s 5.7、 M_s 4.8 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报,51(1):158–164.
- 孟亚锋,姚华建,王行舟,等. 2019. 基于背景噪声成像方法研究庐江断裂带中南段及邻区地壳速度结构与变形特征[J]. 地球物理学报,62(7):2490–2509.
- 苏鹤军,张慧,刘旭宙. 2005. 兰州市刘家堡隐伏断层的地球化学探测方法试验[J]. 高原地震,17(1):9–16.
- 孙小龙,王广才,邵志刚,等. 2016. 海原断裂带土壤气与地下水地球化学特征研究[J]. 地学前缘,23(3):140–150.
- 陶明信,徐永昌,史宝光,等. 2005. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征[J]. 中国科学:地球科学,35(5):441–451.
- 汪成民,李宣瑚,魏柏林. 1991. 断层气测量在地震科学的应用[M]. 北京:地震出版社.
- 王喜龙,李营,杜建国,等. 2017. 首都圈地区土壤气 Rn 、 Hg 、 CO_2 地球化学特征及其成因[J]. 地震学报,39(1):85–101.
- 杨江,李营,陈志,等. 2019. 唐山断裂带南西段和北东段土壤气 Rn 和 CO_2 浓度特征[J]. 地震,39(3):61–70.
- 曾新福,汤兰荣,陶鑫,等. 2016. 跨断层综合地质剖面法在隐伏断层野外地质调查中的研究与应用——以瑞昌—武宁断裂为例[J]. 中国地震,32(4):607–617.
- 张磊,高小其,包创,等. 2018. 呼图壁地下储气库构造气体地球化学特征[J]. 地震地质,40(5):1059–1071.
- 张扬,戴波,周晓成. 2016. 庐江断裂带江苏段土壤气地球化学特征研究[J]. 地震研究,39(3):444–449.
- 郑海刚,方震,周晓成,等. 2016. 庐江断裂带安徽段土壤气的地球化学特征[J]. 中国地震,32(4):642–652.
- 中国地震局地质研究所,中国地震局工程力学研究所,江西省防震减灾工程研究所. 2006. 江西核电彭泽厂址可行性研究阶段地震安全性评价报告[R]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 周晓成,陈超,吕超甲,等. 2017. 首都圈西北部主要活动断裂土壤中氢气(H_2)地球化学特征[J]. 环境化学,36(5):977–983.
- Annunziatelli A, Ciotoli G, Lombardi S, *et al.* 2003. Short and long term gas hazard: The release of toxic gases in the Alban Hills Volcanic Area (Italy) [J]. J Geoch em Explor, 77(2–3):93–108.
- Baubron J, Rigo A, Toutain J. 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.
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, *et al.* 2019. Evidence of multiple sources of soil gas in the Tangshan Fault Zone, North China [J]. Geofluids, 1–12.
- Chen Z, Li Y, Liu Z, *et al.* 2018. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the capital area and its environmental effects [J]. Scientific Reports, 8:1–12.
- Ciotoli G, Lombardi S, Annunziatelli A. 2007. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy [J]. Journal of Geophysical Research, 112(B5):1–23.
- Etiopie G, Martinelli G. 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: An overview [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 129(3–4):185–204.
- Fu C C, Yang T F, Walia V, *et al.* 2005. Reconnaissance of soil gas composition over the buried fault and fracture zone in southern Taiwan [J]. Geochem J, 39(5):427–439.
- Gutenberg B, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 34(4):185–188.
- Han X K, Li Y, Du J G, *et al.* 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 relation of carbon dioxide discharges and earthquakes [J]. J Geophys Res, 85(B6):3115–3121.
- King C, King B, Evans W, *et al.* 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California [J]. Appl Geochem, 11(4):497–510.
- Li Y, Du J G, Wang F K, *et al.* 2010. Geochemical characteristics of soil gas in the Yanhuai basin, Northern China [J]. Earthquake Science, 22(1):93–100.
- Li Y, Du J G, Wang X, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of soil gases in the Tangshan area, Northern China, Terr [J]. Atmos Ocean Sci, 24:323–332.
- Sugisakir R. 1983. Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity [J]. J Geo L, 91:239–258.
- Sun X L, Yang P T, Xiang Y, *et al.* 2018. Across-fault distributions of radon concentrations in soil gas for different tectonic environments [J]. Geosciences Journal, 22(2):227–239.

- Sun Y T, Zhou X C, Yan Y C, *et al.* 2021. Soil degassing from the Xian-shuihe – Xiaojiang Fault System at the eastern boundary of the Chuan – Dian Rhombic Block, Southwest China [J]. *Front Earth Sci*, 9: 1 – 12.
- Walia V, Yang T, Hong W, *et al.* 2009. Geochemical variation of soil – gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsincheng fault in NW Taiwan [J]. *Appl Radiat Isotopes*, 67 (10): 1855 – 1863.
- Xiang Y, Sun X L, Liu D Y, *et al.* 2020. Spatial distribution of Rn, CO₂, Hg, and H₂ concentrations in soil gas across a thrust fault in Xijiang, China [J]. *Front Earth Sci*, 8: 1 – 9.
- Yang T F, Chou C Y, Chen C H, *et al.* 2003. Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan [J]. *Radiation Measurements*, 36 (1/6): 425 – 429.
- Zhou H L, Su H J, Zhang H, *et al.* 2017. Correlations between soil gas and seismic activity in the generalized Haiyuan Fault Zone, North – central China [J]. *Nat Hazards*, 85 (2): 763 – 776.

Geochemical Characteristics of the Soil Gas in the Ruichang – Wuning Active Fault Zone

BAO Zhicheng^{1,2}, ZHAO Aiping², LYU Jian², XIAO Jian², ZHOU Hongyan²,
NING Hongtao², TANG Lanrong², CHEN Hao²

(1. *Disaster Prevention and Engineering Geological Disaster Detection of Jiangxi Province, Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330013, Jiangxi, China*)
(2. *Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330026, Jiangxi, China*)

Abstract

Based on the distribution of the concentration of the soil gas Rn and CO₂ in the Ruichang – Wuning Active Fault Zone obtained by cross – fault observation in the field, we analyze the geochemical characteristics of Rn and CO₂ in the Fault Zone, and reveal the relationship between the geochemical characteristics of the two soil gases and the Fault Zone. The results show that the strong correlation of Rn and CO₂ concentration indicates that in the Fault Zone Rn migrates to the shallow surface along with CO₂. The peak concentrations of Rn and CO₂ soil appear near the Fault Zone. The concentration of Rn and CO₂ in the middle of the Guilinqiao survey line is obviously higher than that at both ends of the line, while the average concentrations in the middle and both ends of the Wujiafan survey line are relatively close. The concentrations differ spatially mainly because of the different degrees of fault healing after the earthquake. The concentration of Rn in both the two survey lines is high, and the *b* – value scanning shows that the stress in the study area is increasing, indicating that the Fault activity is strong. This suggests that the concentration of Rn is closely related to the activity of the Ruichang – Wuning Active Fault Zone.

Keywords: the Ruichang – Wuning fault zone; soil gas; gas release characteristics; gas source