

赵影, 陈志, 吕坚, 等. 2023. 江西瑞昌盆地土壤气体 Rn、CO₂ 地球化学特征研究[J]. 地震研究, 46(4): 542–550, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0059.

Zhao Y, Chen Z, Lyu J, et al. 2023. Geochemical characteristics of soil gas (Rn, CO₂) in the Ruichang basin, Jiangxi province [J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4): 542–550, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0059.

江西瑞昌盆地土壤气体 Rn、CO₂ 地球化学特征研究*

赵影^{1,2}, 陈志^{3*}, 吕坚^{1,2}, 肖孟仁^{1,2}, 胡婷霞^{1,2}, 刘兆飞³,
何鸿毅³, 罗齐彬⁴, 王成楠⁵, 胡旭东⁴

(1. 江西九江扬子块体东部地球动力学野外科学观测研究站, 江西九江 332006; 2. 江西省地震局, 江西南昌 330096; 3. 中国地震局地震预测重点实验室, 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 4. 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; 5. 江西省地质环境调查研究院, 江西南昌 330096)

摘要: 通过野外流动观测, 获取了 2005 年江西九江—瑞昌 M_s5.7 地震震中所处的瑞昌盆地 139 个测点的土壤气体 Rn 和 CO₂ 浓度数据。地质统计分析显示, 瑞昌盆地 Rn、CO₂ 背景浓度分别为 7.33 kBq/m³ 和 0.50%, 异常界浓度分别为 27.50 kBq/m³ 和 6.00%。Rn 和 CO₂ 浓度空间分布结果表明: Rn 浓度异常呈 NE 向优势分布特征, 可能反应了当前赣北区域的构造应力场状态; Rn 和 CO₂ 浓度的同步异常带与刘家—范家铺—城门山断裂带、瑞昌盆地东南缘断裂重合较好; Rn、CO₂ 浓度异常分布对比分析显示瑞昌盆地东南方向的断裂活动性较西北方向的断裂活动性强, 推测瑞昌盆地内相关地震活动与盆地东南方向断裂构造关联性较大。

关键词: 九江—瑞昌地震; 土壤气; 地球化学; Rn; CO₂

中图分类号: P315.724 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2023)04-0542-09
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0059

0 引言

大量调查研究表明, 活动断裂带因其裂隙相对发育而成为地球深部气体集中脱气的重要地带, 经断裂带释放气体的地球化学特征与断裂的活动性密切相关 (陈多福等, 2005; Bhongsuwan et al., 2011; Walia et al., 2013; Han et al., 2014; Chen et al., 2018)。如意大利 Fucino 盆地断裂带内土壤气体 Rn 通量大多高于 45 mBq/(m²s), 最高达 120 mBq/(m²s), 显著高于盆地内非断裂带区域的 10 mBq/(m²s) (Ciotoli et al., 2007)。中国台湾南部潮州断裂及周边地区土壤

气体 He 和 CO₂ 浓度高值异常聚集条带与潮州断裂的展布基本重合 (Fu et al., 2005)。Li 等 (2013)、赵元鑫 (2021) 对唐山断裂带及周边地区的土壤气体进行地球化学野外探测发现, CO₂、Rn、Hg、He 和 H₂ 的浓度异常高值集中出现于唐山断裂带内, 且土壤气体浓度异常强度与区域断裂活动呈现较强的相关性。近年来, 土壤气体地球化学特征研究已成为隐伏断裂探测及断层活动性评估的重要方法之一 (周晓成等, 2012; Li et al., 2013; Wang et al., 2014; Fu et al., 2017; Chen et al., 2018), 如 Mahajan 等 (2010) 基于印度喜马拉雅山脉西北段新构造区域土壤气体 Rn 和 He 浓度的高值空间展布特征, 揭露了平

* 收稿日期: 2022-03-20.

基金项目: 江西九江扬子块体东部地球动力学野外科学观测研究站开放基金 (OGYB202206); 中国地震局“监测、预报、科研”三结合课题 (3JH-202301004); 江西省防震减灾与工程地质灾害工程研究中心开放基金 (SDGD202209)。

第一作者简介: 赵影 (1990-), 工程师, 主要从事地震地下流体监测预测、测氢仪计量检测工作。

E-mail: 993085163@qq.com

✉ 通讯作者简介: 陈志 (1983-), 研究员, 主要从事地震地球化学等研究。E-mail: dugu-830822@163.com.

行于喜马拉雅山前断裂的一条新的隐伏断裂；Wang 等（2006）利用土壤气体 Rn 和 Hg 浓度野外探测，进一步确定了福州市内的隐伏断裂展布情况；邵永新等（2007）通过土壤气体 Rn 和 Hg 浓度结果与人工地震探测结果的综合分析，将海河隐伏断裂划分为东、西两段，且断裂东段土壤气体浓度明显高于西段，可能指示断裂东段的较强活动性。

已有的观测和研究发现，中强地震的发生通常会造发震断裂带气体的地球化学异常变化（King, 1986; Italiano *et al.*, 2008; 杜建国等, 2018），如唐山 M_s7.8 地震发生后 40 年对唐山断裂带土壤气体 Rn 的野外探测发现，唐山地震震中区仍是 Rn 浓度和通量高值的聚集区域，表明唐山地震及其余震对断裂带的脱气仍存在影响（Chen *et al.*, 2018）；通过对汶川 M_s8.0 地震震中区域科学钻探随钻泥浆气体的地球化学监测发现，汶川地震的余震活动也会造成泥浆中气体 H₂ 和 Hg 浓度的明显升高（Zhang *et al.*, 2014; 张彬等, 2018）；在捷克波希米亚西北部和印度西部 Koyna - Warna 地区均观测到发震断裂带土壤气体 Rn 浓度在区域地震发生前的增高异常变化，研究认为地震附近构造区应力重分布导致的断层渗透率增加及地震过程中裂隙的演化可能是造成断裂带土壤气体异常变化的主要原因之一（Weinlich *et al.*, 2006; Reddy *et al.*, 2011）。由此可见，通过地震发生区域主要断裂带及周边地区的土壤气体地球化学探测，有望为发震构造的进一步深入研究提供重要的科学依据。

2005 年 11 月 26 日在瑞昌盆地发生了华东地区近 30 年以来震级最大的地震——九江—瑞昌 M_s5.7 地震（卢福水等, 2006; 李传友等, 2008）。该地震的发震构造也引起了众多学者的广泛关注（卢福水等, 2006; 杨中书等, 2007; 李传友等, 2008; 吕坚等, 2008; Han *et al.*, 2012; 曾新福等, 2018）。然而，瑞昌盆地断裂错综复杂，且多隐伏于厚的沉积物之下，也给发震构造研究造成极大的困难，现有的关于该地震发震构造的研究报道仍众说不一（陈学忠等, 2008; 罗丽等, 2016）。因此，本文采取土壤气体野外流动观测手段，在获取瑞昌盆地土壤气体 Rn 和 CO₂ 浓度背景场的基础上，结合区域已有地球物理、地

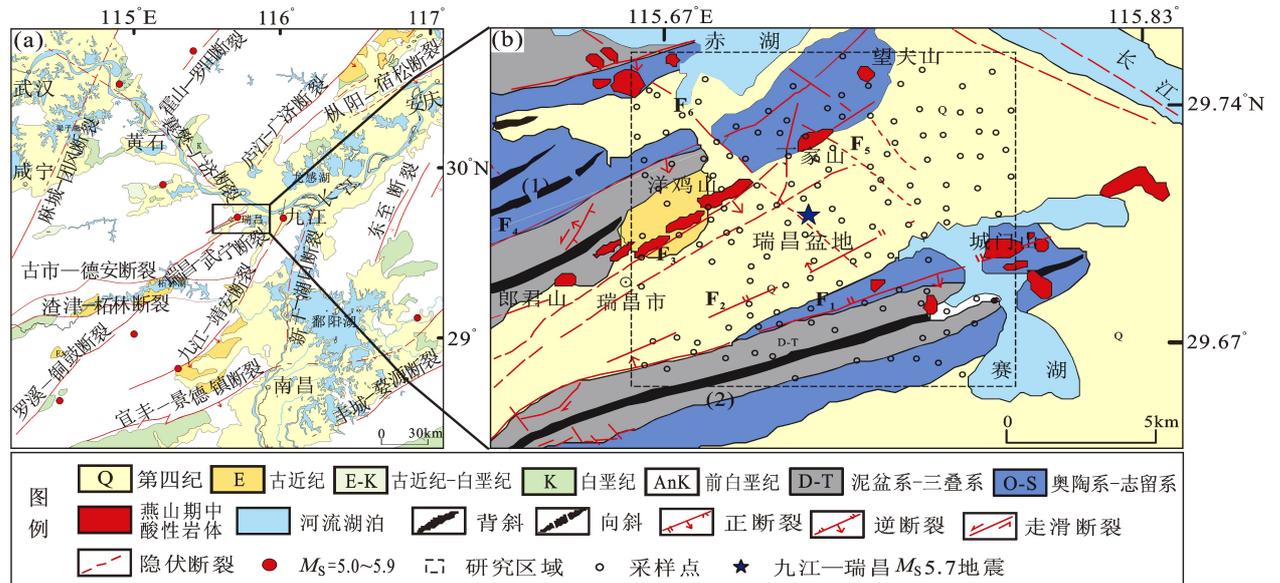
震地质及地表震害等研究成果开展综合研究，进一步探讨九江—瑞昌 M_s5.7 地震的发震构造。

1 地震地质背景

赣西北九江瑞昌地区位于秦岭—大别褶皱系和扬子准地台两大构造单元交界部位，该地区的构造活动受以上 2 个构造单元的控制。瑞昌盆地以北存在两组不同方向的区域大断裂：NE 向的庐江—广济断裂（郟庐断裂带南段）和 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活动断裂带，为中国东部最大的地震活动带（徐嘉炜, 马国峰, 1992）。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（湖北武穴）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（图 1a）（朱光等, 2001; 张国伟等, 2004）。

瑞昌盆地是位于赣西北九江地区的一个 NE 向小型盆地，地处幕阜山隆起向鄱阳湖拗陷的过渡地带，长约 18 km，宽约 5 km，以盆地为中心，其周边 300 km 内曾发生 5 级及以上历史地震共 8 次（图 1a）。瑞昌盆地所在断裂带为 NE 向瑞昌—武宁断裂，北起瑞昌以北，向西南经瑞昌盆地、范家铺、横港、鲁溪至武宁，长约 70 km；断裂北段隐伏于开阔的第四系盆地之下，中段隐伏于山间谷地之下，南段出露于基岩之中。断层泥化学分布特征显示，瑞昌—武宁断裂北段围岩为氧化条件，断裂带内部处于还原环境，存在与地下深部流体的交换作用（田素素, 2019）。沿断裂走向曾发生 1888 年 3 月 29 日铜鼓 5.2 级、1995 年 4 月瑞昌 4.9 级和 2004 年 1 月德安 4.1 级等多次地震（图 1a）（李传友等, 2008; Han *et al.*, 2012; 曾新福等, 2016）。

瑞昌盆地两侧为志留系—泥盆系碎屑岩组成的 NE 向山体。东南边缘主要出露新生代地层，盆地西北边缘主要出露下第三系紫红色砾岩、砂砾岩夹粉砂岩。西北边缘的中更新世阶地海拔约 40 m，而盆地东南边缘海拔仅约 20 m，这表明盆地西北部的抬升速度高于东南部边缘（图 1b）（李传友等, 2008）。



F₁: 刘家—范家铺—城门山断裂带; F₂: 瑞昌盆地东南缘隐伏断裂; F₃: 丁家山—桂林桥—武宁断裂带; F₄: 望夫山—大浪断裂带; F₅: 丁家山—狮子岛隐伏断裂; F₆: 洋鸡山—武山—通江岭隐伏断裂; (1) 横立山—黄桥向斜; (2) 长山—城门背斜

图1 研究区地震地质概况 (a) 及土壤气采样点布设图 (b) (据 Han *et al.*, 2012; 罗丽等, 2016 修改)

Fig. 1 Seismo-geological settings (a) and distribution of the measuring points of the soil gas (b) in the study area (revised from Han *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2016)

2 土壤气体测量方法

2.1 测点布设

按照均匀布点原则, 江西省地震局九江地震监测中心站以本次地震精定位震中位置为中心在瑞昌盆地布设土壤气观测网, 面积约 140 km², 东西长约 12 km, 南北长约 12 km, 测点间距约 1 km, 共布设测点 139 个 (图 1b)。测量时间为 2021 年 6 月 5—20 日 6:30—10:00、15:00—17:30, 可以减少正午气温过高对土壤气体扩散的影响 (张磊等, 2019)。

2.2 测量仪器

Rn 浓度测量使用的是 RAD7 多功能氡检测仪, 测量范围是 $3.70 \times 10^{-3} \sim 740.00$ kBq/m³, 采样测量频率为 1 次/5 min。使用该仪器测量 Rn 浓度一般取采样开始 15 min 以后的值, 因为 Po 和 Rn 达到衰变平衡所需时间大约为 218Po 半衰期的 5 倍, 即 15 min 左右。CO₂ 浓度测量使用 GXH-3010 便携红外线二氧化碳监测仪, 仪器测量误差为 $\pm 2.00\%$ F·S, 分辨率为 0.001%, 测量范围为 0~20.00%, 采样测量频率为 1 次/s。

2.3 测量方法

土壤气体测量使用实心钢钎在测点处垂直于地表土壤向下打孔, 实心钢钎直径为 3 cm, 将其打入地面 0.8 m 以下后拔出, 将底部带有花孔的空心采样杆插入孔底。通过乳胶管将采样杆连接到 RAD7 多功能氡检测仪和 GXH-3010E 便携红外线二氧化碳监测仪分别进行采样测量 (Chen *et al.*, 2018)。其中, 在 Rn 浓度测量过程中, 仪器进气口前端设置气体过滤器和分子筛干燥剂, 以此保护内部探测器免受灰尘和土壤水分的侵害; 在 CO₂ 测量过程中, 同样通过在进气口前端设置气体过滤器来保护内部探测器免受灰尘的侵害。

2.4 仪器稳定性验证

测量结束后, 将 RAD7 多功能氡检测仪送至江西省地震局地震监测氡观测仪检测平台 HD-6 型多功能自控氡室开展校准验证 (赵影等, 2021), 结果表明仪器重复性、体积活度响应相对误差和相对固有误差三项指标均符合相关技术要求 (表 1); 使用新鲜空气对 GXH-3010E 便携红外线二氧化碳监测仪进行进样测试, 测试结果为 0.04%, 排除了仪器自身因素对测量数据准确性的影响。

表1 RAD7 多功能氡检测仪校准结果

Tab. 1 Calibration results of multi-functional radon detector RAD7

检测项目	技术要求	原始数据		校准结果
		氡室浓度/(kBq·m ⁻³)	测量浓度/(kBq·m ⁻³)	
重复性	≤10.00%	0.73	0.75、0.79、0.82、0.79、0.82、0.71、0.85、0.78、0.86、0.75	9.76%
体积活度响应相对误差	≤±5.00%	1.44	1.55、1.41、1.30、1.34、13.0、1.45、1.50、1.36、1.39、1.25	-1.98%
相对固有误差	≤15.00%	3.12	3.21、2.90、2.84、3.71、2.79、3.10、3.08、3.32、3.51、3.51	7.72%

3 结果分析

土壤气体 Rn 和 CO₂ 数据的统计结果表明, Rn 浓度范围为 $35.70 \times 10^{-3} \sim 79.70 \text{ kBq/m}^3$; CO₂ 浓度变化范围为 0.10 ~ 10.67% (表2)。Rn 和 CO₂ 浓度波动较大, 且 CO₂ 浓度明显高于大气水平 (0.04%), 而少部分测点 Rn 浓度明显低于空气水平, 小于 100.00 Bq/m^3 (Ciotoli *et al*, 1999; Novelli *et al*, 1999)。均值和中位数显示气体浓度概率分布因异常值的存在而呈偏正态分布, 表明样本分布异常。Rn 和 CO₂ 浓度数据偏度值分别为 1.76 和 1.25, 表明 Rn 相较 CO₂ 具有较高的分散性分布。

由于土壤气体的成因比较复杂, 其浓度异常阈值不能绝对固定, 因此有多种地质统计方法确定异常阈值。在某些情况下, 上四分位数

被认为是可能的异常阈值 (Beaubien *et al*, 2003); 或者通过去除异常高值后的平均值加上两倍标准差来确定异常阈值 (Baubron *et al*, 2002; Fu *et al*, 2005)。然而, 土壤气体异常阈值受构造、岩性、季节变化和人为因素等多种因素的影响, 为此, 结合此次密集采样特点, 本文采用更加客观的分位数-分位数图 (Q-Q 图) 方法。该方法是一种区分背景值和异常值之间的不同群体的有效方法 (Kafadar, Spiegelman, 1986; Sinclair *et al*, 1991; Cheng *et al*, 1994)。同时, 本文采用了基于更复杂统计推导的 Q-Q 图方法: 在 Q-Q 图的基础上, 通过近似直线段的方法确定气体异常阈值, 即取这些直线段交点所对应的纵坐标值分别作为背景值与异常阈值。最终结果显示: Rn、CO₂ 背景浓度分别为 7.33 kBq/m^3 、0.50%, 异常界浓度分别为 27.50 kBq/m^3 、6.00% (图2)。

表2 震源区土壤气体主要参数统计表

Tab. 2 Main soil gas data in the seismic region

组分	总数	最小值	最大值	均值	中位数	标准差	偏度	峰度	变异系数	下四分位数	上四分位数	IQR
Rn/(kBq·m ⁻³)	139	35.70×10^{-3}	79.70	13.35	7.66	15.54	1.76	3.16	1.16	18.30	19.10	17.27
CO ₂ (%)	139	0.10	10.67	2.44	1.71	2.20	1.25	1.69	0.90	0.65	3.89	3.24

4 讨论

4.1 土壤气体空间分布特征

鉴于实际采样过程中无法做到完全等间距均匀采样, 为合理估计未采样区域的土壤气体浓度, 本文采用 Kriging 插值法绘制研究区土壤气体浓度空间等值线图。Kriging 插值法是一种以变异函数理论和结构分析为基础, 对研究区域未采样位置进行无偏最有效估计的方法。该方法利用了测量点之间的空间关联性, 被广泛应用于地球化学、

大气、矿场资源的数据处理及异常定位 (李如仁等, 2020)。考虑到土壤气体数据的空间各向异性, 为正确描述研究区土壤气体浓度的空间特征, 本文使用 Surfer 13 软件, 通过对各类变异函数模型比对, 选取效果较好的指数差变函数模型进行 Kriging 插值。在该模型下, Rn 和 CO₂ 浓度的各向异性比值均为 2, 各向异性角度分别为 48.87° 和 140.00°。本文采用颜色梯度来表示土壤气浓度的空间变化, 浓度值低于异常阈值的区域用蓝色到绿色表示, 高于异常阈值区域则用黄色到红色表示 (图3)。

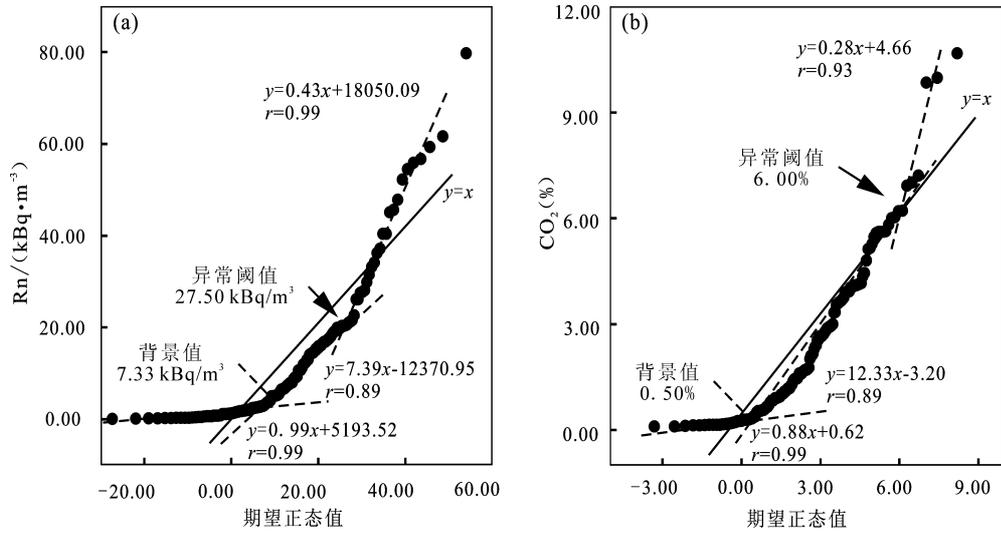


图 2 Rn 浓度 (a) 与 CO₂ 浓度 (b) Q - Q 图
Fig. 2 Q - Q plot of the Rn (a) and CO₂ (b) concentration

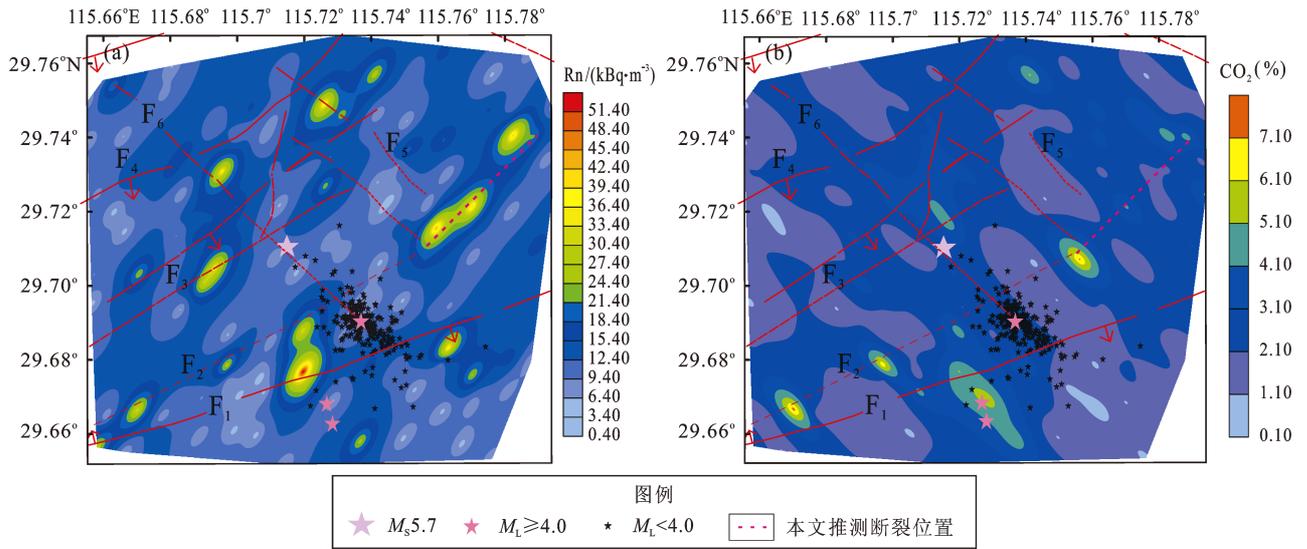


图 3 研究区域 Rn、CO₂ 浓度等值线图
F₁: 刘家—范家铺—城门山断裂带; F₂: 瑞昌盆地东南缘隐伏断裂; F₃: 丁家山—桂林桥—武宁断裂带;
F₄: 望夫山—大浪断裂带; F₅: 丁家山—狮子岛隐伏断裂; F₆: 洋鸡山—武山—通江岭隐伏断裂

图 3 研究区域 Rn、CO₂ 浓度等值线图
Fig. 3 A contour map of soil gas CO₂ concentration in the seismic region

图 3a 显示, Rn 浓度异常基本呈点状或带状沿断裂分布, 且异常整体呈现 NE 向优势分布特征。九江地区节理统计表明, 新近纪以来太平洋板块俯冲挤压速率减缓, 印度板块挤压速率增大。受印度板块 NE 向挤压的显著影响, 区域现代应力场表现为 NEE 向主压应力场 (高坤, 2019)。在 NEE 向应力场影响下, 该区域断块山、断陷盆地的边界断裂亦呈 NNE 至 NE 走向, 如瑞昌—武宁断裂、罗溪—铜鼓断裂、九江—靖安断裂、新干

—湖口断裂等。因此, 研究区 Rn 浓度异常的 NE 向优势分布特征可能反映了当前赣北区域构造应力状态。

CO₂ 浓度异常除沿刘家—范家铺—城门山断裂带、瑞昌盆地东南缘隐伏断裂附近有点状分布外, 在整个研究区并未显示其它明显特征 (图 3b)。相比于 Rn, CO₂ 来源较为复杂, 存在地幔脱气、变质分解、有机质氧化、微生物作用等。非火山地区的高 CO₂ 含量往往由深大断裂导致, 且 CO₂ 可

以作为确定构造活动和地震危险性的良好指示剂 (Irwin, Barnes, 1980; Annunziatellis *et al.*, 2003)。笔者推测, 刘家—范家铺—城门山断裂带、瑞昌盆地东南缘隐伏断裂可能比研究区其它断裂切割深度大。

以瑞昌盆地为界, 盆地东南方向 Rn 和 CO₂ 浓度异常较盆地西北方向异常分布更为密集、带状分布更为明显, 最高异常均分布在盆地东南方向 (图 3)。相关研究表明, 断裂活动性的增强, 通常会在岩石中产生新的破裂, 增加断裂带地层的渗透性, 从而使地下裂隙连通, 加速地球深部气体向地表的运移, 其土壤气体浓度及释放通量通常也越大 (Baixeras *et al.*, 2001; 苏鹤军等, 2013; Yang *et al.*, 2018), 以上对比分析显示瑞昌盆地东南方向断裂活动性相对较强。Rn 和 CO₂ 浓度异常分布显示, 沿瑞昌盆地东南缘隐伏断裂走向往 NE 向延伸仍有带状异常分布, 笔者推测该缘隐伏断裂在前人已探明基础上往 NE 向存在一定程度延伸, 且延伸部分异常带分布区域可能为该隐伏断裂与丁家山—狮子山岛隐伏断裂交汇部位 (图 3)。

4.2 土壤气体同步异常带与地震活动关联性分析

研究区 Rn 和 CO₂ 浓度呈现出两条 NE 向同步异常带, 与刘家—范家铺—城门山断裂带、瑞昌盆地东南缘隐伏断裂重合较好, 显示以上两条断裂可能具有较高的破碎程度。在震区周边固定台站及震后流动台站所获取的余震重新定位结果显

示: 本次 $M_{\text{L}} \geq 5.7$ 地震共发生 220 次 $M_{\text{L}} \geq 1.0$ 余震, 精定位结果显示大部分余震分布于刘家—范家铺—城门山断裂和瑞昌盆地东南缘隐伏断裂附近 (罗丽等, 2016), 且本次地震的 3 次 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 余震同样分布在以上两条断裂附近 (表 3), 表明以上两条断裂及附近区域地壳应力变化相对较大 (图 3)。花岗岩压裂实验已经证明, 在低应力条件下, 花岗岩中原始微孔隙闭合, 使 Rn 浓度保持在背景值或较低水平, 但随应力的不断累积, 岩石微裂隙的发展、连通和破碎导致 Rn 浓度不断升高 (Girault *et al.*, 2017)。膨胀—扩散模型提出, 当构造应力增加时, 微裂隙定向扩展并出现在岩石孔隙附近。随着应力的不断累积, 岩石中的微裂隙逐渐发育和扩张。当微裂隙将岩石孔隙与断裂相贯通时, 孔隙和微裂隙中的气体通过断裂快速向上运移 (Martinelli *et al.*, 1991)。刘家—范家铺—城门山断裂带、瑞昌盆地东南缘隐伏断裂所在区域强烈且持久的地震带来的应力扰动可能改变了岩石的物理性质和化学成分, 如密度、孔隙度、弹性、含水量和离子组成等 (刘耀炜, 任宏微, 2009; Du *et al.*, 2010), 从而导致微裂缝的发育和扩张。当岩石微裂隙将岩石孔隙与断裂相贯通时, 刘家—范家铺—城门山断裂、瑞昌盆地东南缘隐伏断裂及附近土壤气体通过断裂运移的路径变得更多, 从而表现出了较高土壤气浓度 (图 4) (Holub, Brady, 1981; Zhang, Sanderson, 1996)。

表 3 $M_{\text{L}} \geq 4.0$ 余震精定位后的震源参数 (据罗丽等, 2016; 汤兰荣等, 2019 修改)

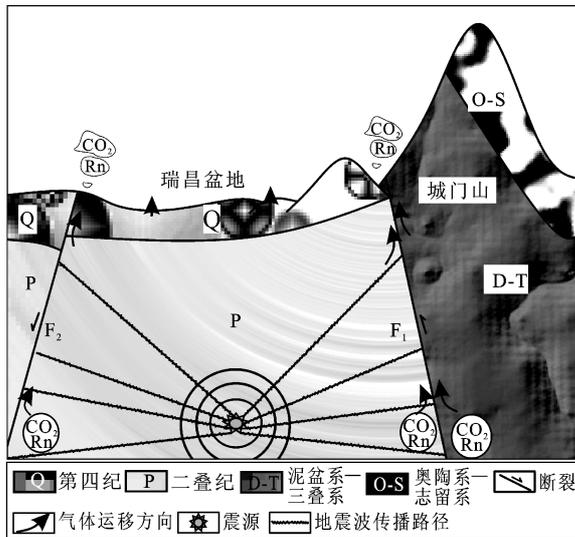
Tab. 3 Source parameters of the $M_{\text{L}} \geq 4.0$ aftershocks after accurate relocation (according to Luo *et al.*, 2016; Tang *et al.*, 2019)

序号	发震时间		震中位置		震源深度/km	M_{L}
	年-月-日	时:分:秒	$\lambda_{\text{E}}/(\text{°})$	$\varphi_{\text{N}}/(\text{°})$		
1	2005-11-26	09:25:24	115.727438	29.66284	10	4.5
2	2005-11-26	12:55:39	115.726314	29.667697	10	5.3
3	2005-12-03	07:46:36	115.736888	29.693864	14	4.0

本次 $M_{\text{S}} 5.7$ 地震震后震害调查结果显示: 此次地震引发地面塌陷、砂土液化、地表裂缝、崩塌等多种震害也主要分布在主震震中东南方向, 且呈 NE 走向优势分布; 地震造成的房屋倒塌同样呈 NE 走向带状分布 (曾新福等, 2018), 表明此次地震导致震中东南方向破裂已沿 NE 走向延伸至地表, 说明刘家—范家铺—城门山断裂、瑞昌盆

地东南缘隐伏断裂及附近区域可能应力变化较大, 导致裂隙贯通至地表, 为气体运移提供了较好的通道。浅层地震勘探显示瑞昌盆地东南缘隐伏断裂出现了地震波反射层偏移, 进一步揭示出该断裂是一条 NE 向发育的隐伏正断层, 中更新世以下地层出现 10~12 m 位移, 表明该断层第四纪显著活动 (Han *et al.*, 2012)。刘家—范家铺—城门山

断裂带为瑞昌盆地南东缘一条近 NE 向控制断裂,在震源区域倾向 SE,倾角 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$,该断裂第四纪地裂缝较为发育,地裂缝倾角多为 65° 以上,长度 $1 \sim 6 \text{ m}$ (吕坚等, 2007, 齐信等, 2015)。瑞昌盆地东南缘隐伏断裂为正断层,表明了断层附近的拉张环境,以及刘家—范家铺—城门山断裂的高倾角、地裂缝发育,这些均有利于地下气体向上运移,从而表现出较高土壤气浓度 (图 4)。



F₁: 刘家—范家铺—城门山断裂带; F₂: 瑞昌盆地东南缘隐伏断裂

图 4 瑞昌盆地土壤气体异常带气体排放模式

Fig. 4 Schematic diagram for degassing model in the anomalous soil-gas zone in the Ruichang Basin

5 结论

本文利用江西瑞昌盆地内 139 个 Rn 和 CO₂ 测点的土壤气体浓度测量结果,讨论了区域内土壤气体 Rn 和 CO₂ 浓度的空间分布特征,主要得出以下结论:

(1) 研究区土壤气体 Rn 和 CO₂ 浓度范围分别为 $35.7 \times 10^{-3} \sim 79.70 \text{ kBq/m}^3$ 和 $0.10\% \sim 10.67\%$,背景浓度分别为 7.33 kBq/m^3 、 0.50% ,异常界浓度分别为 27.50 kBq/m^3 、 6.00% 。Rn 和 CO₂ 浓度异常整体呈点状或带状分布,Rn 浓度异常呈现 NE 向优势分布特征,可能反应了赣北区域当前构造应力状态。

(2) 土壤气体 Rn 和 CO₂ 浓度同步异常带与刘家—范家铺—城门山断裂、瑞昌盆地东南缘断裂

重合较好,且 Rn 和 CO₂ 浓度异常分布对比分析显示瑞昌盆地东南方向断裂活动性较西北方向强,推测瑞昌盆地内相关地震活动与盆地东南方向断裂构造关联性较大。该区域具有气体地球化学敏感性,适合开展地震地球化学土壤气体长期连续监测。

参考文献:

- 陈多福,苏正,冯东,等. 2005. 海底天然气渗漏系统水合物成藏过程及控制因素[J]. 热带海洋学报,24(3):38-46.
- 陈学忠,吕坚,王惠敏. 2008. 2005 年 11 月 26 日江西九江—瑞昌 M_s5.7 地震序列的破裂过程研究[J]. 地震,28(1):100-106.
- 杜建国,李营,崔月菊,等. 2018. 地震流体地球化学[M]. 北京:地震出版社.
- 高坤. 2019. 江西九江—靖安断裂九江段新构造期活动特征研究[D]. 北京:中国地质大学.
- 李传友,曾新福,张剑玺,等. 2008. 2005 年江西九江 5.7 级地震构造背景与发震构造[J]. 中国科学:地球科学,38(3):343-354.
- 李如仁,李广超,陈伟,等. 2020. 京津冀气溶胶数据普通克里金差值研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),36(1):179-185.
- 刘耀炜,任宏微. 2009. 汶川 8.0 级地震宏观观测值震后效应特征初步分析[J]. 地震,29(1):121-131.
- 卢福水,曾新福,郑栋,等. 2006. 九江—瑞昌 5.7 级地震发震构造初探[J]. 防灾减灾工程学报,26(S1):75-82.
- 吕坚,倪四道,沈小七,等. 2007. 九江—瑞昌地震的精确定位及其发震构造初探[J]. 中国地震,23(2):166-174.
- 吕坚,郑勇,倪四道,等. 2008. 2005 年 11 月 26 日九江—瑞昌 M_s5.7、M_s4.8 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报,51(1):158-165.
- 罗丽,吕坚,曾文敬,等. 2016. 江西九江—瑞昌地震序列震源位置和发震构造再研究[J]. 地震地质,38(2):342-351.
- 齐信,陈州丰,邵长生,等. 2015. 九江地区第四系中典型地裂缝特征及构造意义[J]. 地质学报,89(12):2266-2276.
- 邵永新,杨绪连,李一兵. 2007. 海河隐伏活断层探测中土壤气和气汞测量及其结果[J]. 地震地质,29(3):627-636.
- 苏鹤军,张慧,李晨桦,等. 2013. 西秦岭北缘断裂带断层气浓度空间分布特征与强震危险性分析[J]. 地震工程学报,35(3):671-676.
- 汤兰荣,吕坚,曾新福,等. 2018. 九江—瑞昌地震震源机制和应力场特征[J]. 大地测量与地球动力学,38(8):791-795.
- 田素素. 2019. 江西九江地区断裂活动性研究——来自遥感解译、地震、热泉、断层泥的证据[D]. 南昌:东华理工大学.
- 徐嘉炜,马国峰. 1992. 郟庐断裂带研究的十年回顾[J]. 地质论评,38(4):316-324.
- 杨中书,曾文敬. 2007. 利用双差法对 2005 年江西九江—瑞昌 5.7 级地震序列重新定位[J]. 地震地磁观测与研究,28(2):25-31.
- 曾新福,汤兰荣,江春亮,等. 2018. 九江—瑞昌 5.7 级地震地质灾害

- 特征及发震构造[J]. 华北地震科学, 36(2): 8-17.
- 张彬, 刘耀伟, 方震, 等. 2018. 汶川地震科学钻探2号孔(WFSD-2)随钻泥浆氦和汞浓度与断裂构造关系[J]. 地球物理学报, 61(5): 1771-1781.
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 2004. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报, 23(9-10): 846-853.
- 张磊, 刘耀伟, 包创, 等. 2019. 川西冕宁断层土壤气特征[J]. 环境化学, 38(4): 777-783.
- 赵影, 黄仁桂, 鲍志诚, 等. 2021. 地震测氦仪野外校准的新方法[J]. 中国地震, 37(1): 140-147.
- 赵元鑫. 2021. 流体地球化学与构造活动关系的地质统计研究[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所.
- 周晓成, 杜建国, 陈志, 等. 2012. 地震地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(4): 340-346.
- 朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 2001. 郟庐断裂带走滑时代的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究及其构造意义[J]. 中国科学: 地球科学, 31(3): 250-256.
- Annunziatellis 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]. *Journal of Geochemical Exploration*, 77(2-3): 93-108.
- Baixeras C, Erlandsson B, Font L, Jönsson G. 2001. Radon Emanation from Soil Samples [J]. *Radiation Measurement*, 34(1-6): 441-443.
- 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(1): 69-81.
- Beaubien S E, Ciotoli G, Lombardi S. 2003. Carbon dioxide and radon gas hazard in the Albani Hills Area (Central Italy) [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 123(1-2): 63-80.
- Bhongsuwan T, Pisapak P, Helmut D. 2011. Result of alpha track detection of radon in soil gas in the Khlong Marui Fault Zone, Southern Thailand; A possible earthquake precursor [J]. *Songklanakar Journal of Science and Technology*, 33(5): 609-616.
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, *et al.* 2018. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the capital of China and its environmental effects [J]. *Scientific Reports*, 8(1): 1-12.
- Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109-130.
- Ciotoli G, Etiopie G, Guerra M, *et al.* 1999. The detection of concealed faults in the Ofanto Basin using the correlation between soil-gas fracture surveys [J]. *Tectonophysics*, 301(3-4): 321-332.
- Ciotoli G, Lombardi S, Annunziatellis A. 2007. Geo-statistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin; Fucino Plain, Central Italy [J]. *Journal of Geophysical Research*, 112(B2): B05407.
- Du J G, Amita K, Ohsawa S, *et al.* 2010. Experimental evidence on formation of imminent and short-term hydrochemical precursors for earthquakes [J]. *Applied Geochemistry*, 25(4): 586-592.
- Fu C C, Yang T F, Chen C H, *et al.* 2017. Spatial and temporal anomalies of soil gas in Northern Taiwan and its tectonic and seismic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 149: 64-77.
- 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]. *Geochemical Journal*, 39: 427-439.
- Girault F, Schubnel A, Pili É. 2017. Transient radon signals driven by fluid pressure pulse, micro-crack closure, and failure during granite deformation experiments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 474: 409-418.
- Han X K, Li Y, Du J G, *et al.* 2014. Rn and CO₂ geochemistry of soil gas across the active fault zones in the Capital Area of China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(10): 2803-2815.
- Han Z J, Lu F S, Ji F J, *et al.* 2012. Seismotectonics of the 26 November 2005 Jiujiang - Ruichang, Jiangxi, M_s5.7 earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 497-509.
- Holub R F, Brady B T. 1981. The effect of stress on radon emanation from rock [J]. *Journal of Geophysical Research*, 86(B3): 1776-1784.
- Irwin W P, Barnes I. 1980. Tectonic relation of carbon dioxide discharges and earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research - atmospheres*, 85(B6): 3115-3121.
- Italiano F, Martinelli G, Plescia P. 2008. CO₂ degassing over seismic areas; the role of mechanochemical production at the study case of Central Apennines [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 165(1): 75-94.
- Kafadar K, Spiegelman C H. 1986. An alternative to ordinary Q-Q plots: conditional Q-Q plots [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 4(3): 167-184.
- King C Y. 1986. Gas geochemistry applied to earthquake prediction: An overview [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B12): 12269-12281.
- 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.
- Mahajan S, Walia V, Bajwa B S, *et al.* 2010. Soil-gas radon/helium surveys in some Neotectonic areas of NW Himalayan Foothills, India [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10: 1121-1127.
- Martinelli G. 1991. Fluidodynamical and chemical features of Radon 222 related to total gases; Implications for earthquake predictions Proc [C]//Meeting on Isotopic and Geochemical precursors of earthquakes and volcanic eruptions. International Atomic Energy Agency. Austria: IAEA, 48-62.
- Novelli P C, Lang P M, Masarie K A, *et al.* 1999. Molecular hydrogen in the troposphere: global distribution and budget [J]. *Journal of Geophysical Research*, 104(D23): 30427-30444.
- Reddy D, Nagabhushanam P. 2011. Groundwater electrical conductivity and soil radon gas monitoring for earthquake precursory studies in Koyna, India [J]. *Applied Geochemistry*, 26(5): 731-737.

- Sinclair A J. 1991. A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 41(1): 1–22.
- Walia V, Yang T, Lin S, *et al.* 2013. Temporal variation of soil gas compositions for earthquake surveillance in Taiwan[J]. *Radiation Measurements*, 50: 154–159.
- Wang G C, Liu C, Wang J. 2006. The use of soil mercury and radon gas surveys to assist the detection of concealed faults in Fuzhou City, China[J]. *Environmental Geology*, 51(1): 83–90.
- Wang Xin, 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.
- Weinlich F H, Faber E, Boušková A, *et al.* 2006. Seismically induced Variations in Mariánské Lázně fault Gas Composition in the NW Bohemian Swarm Quake region, Czech Republic – A Continuous Gas Monitoring[J]. *Tectonophysics*, 421: 89–110.
- Yang Y, Li Y, Guan Z, *et al.* 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]. *Applied Geochemistry*, 89: 23–33.
- Zhang L, Liu Y W, Guo L S, *et al.* 2014. Isotope geochemistry of mercury and its relation to earthquake in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole – 1 (WFSD – 1) [J]. *Tectonophysics*, (619–620): 79–85.
- Zhang X, Sanderson D J. 1996. Numerical modeling of the effects of fault slip on fluid flow around extensional faults[J]. *Journal of Structural Geology*, 18(1): 109–119.

Geochemical Characteristics of Soil Gas (Rn, CO₂) in the Ruichang Basin, Jiangxi Province

ZHAO Ying^{1,2}, CHEN Zhi³, LYU Jian^{1,2}, XIAO Mengren^{1,2}, HU Tingxia^{1,2}, LIU Zhaofei³,
HE Hongyi³, LUO Qibin⁴, WANG Chengnan⁵, HU Xudong⁴

(1. *Observatory for Geodynamic of the East Yangtze Block in Jiujiang, Jiangxi Province, Jiujiang 332006, Jiangxi, China*)

(2. *Jiangxi Earthquake Agency, Nanchang 330096, Jiangxi, China*)

(3. *CEA Key Laboratory of Earthquake Forecasting, Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

(4. *Engineering Research Center for Seismic Disaster Prevention and Engineering Geological Disaster Detection of Jiangxi Province, Nanchang 330013, Jiangxi, China*)

(5. *Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang 330096, Jiangxi, China*)

Abstract

The concentration of the soil gases Rn and CO₂ at 139 sites within 140 km² in the Ruichang Basin, in which the epicenter of the Jiujiang-Ruichang M_s5.7 earthquake on November 26, 2005 is located, is measured. The geostatistical analysis shows that the background values of the concentration of Rn and CO₂ are 7 330 Bq/m³, 0.50%, and the abnormal boundary values of the concentration are 27 500 Bq/m³, 6.00%, respectively. The anomalous values of Rn are distributed in NE direction, which is consistent with the current state of tectonic stress field in northern Jiangxi. The zone which has synchronous high-value anomaly of Rn and CO₂ is in line with the Ruichang-basin southeast marginal fault and the Liujia-Fanjiapu-Chengmenshan marginal fault. The distribution of abnormal concentration of Rn and CO₂ shows that the fault activity in the southeast direction of the Ruichang Basin is stronger than that in the northwest direction. The earthquake activity in the Ruichang Basin may be closely related to the fault structure in the southeast direction of the Basin.

Keywords: the Jiujiang-Ruichang earthquake; soil gas; geochemistry; Rn; CO₂