第 37 卷 第 4 期(767~779)	中 国 地 震	Vol. 37 No. 4
2021年12月	EARTHQUAKE RESEARCH IN CHINA	Dec. 2021

王喜龙,贾晓东,杨梦尧,2021. 辽宁金州断裂断层土壤气地球化学调查. 中国地震,37(4):767~779.

# 辽宁金州断裂断层土壤气地球化学调查

王喜龙<sup>1)</sup> 贾晓东<sup>1)</sup> 杨梦尧<sup>2)</sup>

1) 辽宁省地震局, 沈阳 110034
 2) 北京红晶石投资咨询有限责任公司, 北京 100044

摘要 对辽宁南部地区重点活动断裂的 8 条剖面进行跨断层土壤气 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 浓度测量。测量结果表明,各测量剖面土壤气 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 的浓度平均值变化范围分别为 10.65~39.50kBq/m<sup>3</sup>、0.59%~3.37%和 9.74~306.28ppm。研究区土壤气 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 浓度异常主要集中在海城老震区和盖州震群地区,土壤气空间变化特征显示 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 浓度从南至北有逐渐增高变化趋势,这与辽南地区地震活动分布、地下低速层分布、地质特征及地壳垂直变形速率等变化相对应,表明辽南地区金州断裂土壤气地球化学特征主要受控于辽南地区地震活动、地下介质结构和地壳垂直形变速率的影响,同时也受到测量场地地质特征的影响。

关键词: 土壤气 地球化学 异常界 金州断裂 辽南地区

[文章编号] 1001-4683(2021)04-0767-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

### 0 引言

辽宁地区地质结构复杂,著名地震带── 郑庐地震带穿越该区,同时辽宁地区还位于环 渤海地区,复杂的地质构造环境导致辽宁地区地震频发。根据以往地震地质资料研究显示, 辽宁地区历史上曾发生过多次破坏性地震。相关地震统计及精定位结果显示,自1800年以 来辽宁地区发生的 M≥5.0 地震主要集中在辽南地区,且大多受 NE 向金州断裂控制,地震 沿金州断裂呈带状分布(万波等,2017)。近年来金州断裂未有5级以上地震发生,但 2.0 ≤ M < 5.0 地震及震群活动频繁,主要集中在辽宁盖州和海城地区,表明地震活动性仍然 较强,金州断裂仍在活动(图1)。对 2013年以来辽南地区发生的8次 M≥4.0 地震和震群 进行精定位结果分析,结果显示中强地震和震群基本均沿金州断裂和海城河断裂分布,其中 金州断裂控制震群及 M≥4.0 地震居多(曹凤娟等,2013; 王亮等,2014; 张博等,2017),这 表明金州断裂是辽宁地区活动性最强的构造单元(万波等,2017)。

全面认识金州断裂断层特征、断层土壤气释放特征以及准确监视断层活动状态,成为把

<sup>[</sup>收稿日期] 2020-03-09 [修定日期] 2020-11-12

<sup>[</sup>项目类别] 地震科技星火计划(XH19007Y)、中国地震局预报专项(YBZX-DQHX2018-04)、沈阳地质调查中心辽中南城 市群地质环境综合调查项目(DD20160266)、中国地震灾害防御中心地灾评价项目(152007000000170013)和 震情跟踪定向工作任务(2021010303、2020010307)共同资助

<sup>[</sup>作者简介] 王喜龙,男,1988 年生,硕士,工程师,主要从事地震地下流体、地球化学研究。E-mail:546737333@qq.com 贾晓东,通讯作者,男,1980 年生,高级工程师,主要从事地震监测预报、震害风险防治研究等工作。 E-mail:jxd.dx@163.com



图 1 辽南地区历史地震和构造简图 F<sub>1</sub>:金州断裂; F<sub>2</sub>:海城河断裂; F<sub>3</sub>: 郊庐断裂带; F<sub>4</sub>: 庄河断裂; F<sub>5</sub>: 皮口断裂; F<sub>6</sub>: 太子河断裂

握辽南地区地震形势关键问题之一。跨断层土壤气调查研究作为一种有效追踪断裂活动状态和地震活动的地质流体观测手段,能够客观、灵敏地反映地壳应力状态和地震活动(Lombardi et al,2010; Walia et al,2013; Han et al,2014),同时其对查找隐伏断裂具体位置也 有较好的指示意义(李营等,2009; Woodruff et al,2009; Li et al,2013; 李继业等,2019)。与 其他常规地球化学方法相比,跨断层土壤气调查研究具有采样简单、快速、成本低廉等优点。

近年来大量监测研究表明,跨断层土壤气体(Rn、CO<sub>2</sub>、Hg、H<sub>2</sub>等)对地震的响应性十分 敏感,不论是定点观测还是流动观测,均曾多次监测到地震前出现的显著异常(Fytikas et al, 1999;Chyi et al,2005;Ciotoli et al,1998、2007;周晓成,2011;向阳等,2018;康健等,2019)。 例如,林元武等(1998)应用 CO<sub>2</sub>快速测定法,对怀来后郝窑断层气 CO<sub>2</sub>观测点近7年的观 测数据进行分析,发现在1996年内蒙古包头 6.4 级地震和 1998年张北-尚义 6.2 级地震发 生前,震中附近区域均监测到了显著的断层气 CO<sub>2</sub>浓度异常。范雪芳等(2016)应用断层氢 连续观测方法,在山西夏县中条山山前断裂与南师隐伏断裂交汇处进行了断层 H<sub>2</sub>浓度连续 观测,结果表明在 2010年、2011年河南太康发生 M4.6 和 M4.1 地震前,夏县断层 H<sub>2</sub>浓度连续 观了明显的高值波动异常,表明高精度断层氢浓度观测是地震短临预报的一种有效手段。 Kumar 等(2009)采用平均值±2 倍标准偏差以减小气象因素对 Rn 浓度的影响方法,对喜马 拉雅山西北格拉山谷巴伦布尔土壤气 Rn 日值浓度观测数据进行分析,发现土壤气 Rn 浓度

段进行了土壤气 Rn、Hg 和 CO<sub>2</sub> 气体浓度观测,结果表明土壤气浓度在断裂带附近较为密 集,对断层位置有一定指示作用,且气体富集程度与断裂活动有一定关系;孙小龙等(2016) 基于海原断裂带土壤气测量结果,对海原断裂带构造活动分段性特征进行分析,发现海原断 裂中西段断层闭锁程度较弱,有利于地下流体的扩散与运移;Zhou 等(2010)对 2008 年汶川 8.0级地震发生后的地震断裂进行土壤气 He、H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和 Rn 等 8 种气体浓度测量,发现土壤 气浓度异常与区域应力和余震活动具有一定相关性;Wang 等(2014)通过对唐山地区土壤 气 Rn 浓度进行测量分析,发现土壤气 Rn 对于追踪浅层断裂和地震活动具有较好的指示意 义,由大地震产生的活动断裂及与之相关的裂隙均为 Rn 运移的主要途径。

因此,本文依据金州断裂不同段落的活动特征,在金州断裂上布设8条跨断层剖面进行 土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>浓度测量,通过分析测得的断层土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>浓度数据,对辽 宁金州断裂断层土壤气地球化学特进行调查研究。

### 1 地震地质背景

作为辽宁地区近年地震发生危险程度最高的活动断裂之一,金州断裂南起大连湾,经金 州、瓦房店、盖州、海城等地延伸至鞍山南,全长约 280km,是辽南地区规模最大、活动性强、 切割最深且构造行迹清楚的区域性大断裂(钟以章等,1999;万波等,2013)。其不仅控制了 该地区新构造运动格局,还对区域岩浆活动、地层分布及其他构造演化等产生重要影响。金 州断裂是一条正断裂,走向 NNE、NE,倾向 NW,两盘相对运动速率为0.07mm/a(高常波等, 1998;万波等,1997、2013),并具有多期活动特征(雷清清等,2008)。依据前人对金州断裂 的地质研究,金州断裂自南向北划分为金州-普兰店段、普兰店-九寨段、九寨-盖州北段以及 盖州北-鞍山南段 4 个段落(表1、图1)。

断裂段名称	长度/km	断裂活动性质 —	断层泥测	年数据	甜胡良欢地日	历史地震	
			TL/ka BP	SEM	- 钳切取新地层		
金州-普兰店段(①)	50	濡滑为主	200	$Q_p^2 - Q_p^3$	$Q_p^2$	金州 M5.5	
普兰店-九寨段(②)	70	濡滑为主	120	$Q_{p}^{2}$ - $Q_{p}^{3}$	$Q_p^2$	普兰店 M6.0	
九寨-盖州北段(③)	60	粘滑为主	188	$Q_{p}^{1}$ - $Q_{p}^{2}$	$Q_p^2$ $Q_p^3$	熊岳 M5.7	
盖州北-鞍山南(④)	100	粘滑为主	79	$Q_{p}^{2}-Q_{p}^{3}$		营口 M5.9	

金州断裂各段落特征(据万波等(2013))

表 1

注:断裂段名称括号中的编号①~④,与图 1中的①~④对应; TL 为热释光; SEM 为扫描电镜。

金州断裂的金州-普兰店段形成于晚元古代,燕山运动时期断裂重新复活,沿断裂有小型 基性岩脉贯入,而后断裂活动减弱,第四纪时期金州断裂又表现出明显的活动。普兰店-九寨段 由 1~3条大致平行的断裂组成,控制了侏罗系地层的分布,为大连地区中生代盆地的西缘断 裂。九寨-盖州北段走向 NE-NNE,总体倾向 NW,倾角较陡,由 2~3条主干断裂组成,发育次生 断裂,断裂带总宽度 1~3km,断裂运动性质主要表现为正倾滑兼右旋走滑。盖州北-鞍山南段 走向 NE-NNE,总体倾向 NW,倾角较陡,由东、西2条主干分支断裂组成,次生断裂发育,断裂带 总宽度一般为 0.5~1km,断裂运动性质主要表现为正倾滑兼右旋走滑。

在历史地震活动方面,虽然金州断裂南北4段自1800年以来均有 M≥5.0 地震发生,但

4 期

中国地震

37 卷

近年中小地震及震群活动表明,中小地震与震群主要集中在盖州及海城地区,即主要位于金 州断裂盖州北-鞍山南段范围内。且前人对金州断裂的断层泥测年数据也表明,该段断层泥 测年距今最短,表明金州断裂盖州北-鞍山南段为金州断裂目前活动最强的段落(万波等, 2013)。在对金州断裂断层土壤气地球化学调查研究过程中,共布设8条测量剖面,由于盖 州北-鞍山南近年小震活动频繁,断裂活动性较强,布设了6条观测剖面;另外2条剖面分别 布设于金州断裂的九寨-盖州北段和普兰店-九寨段;金州-普兰店段由于地区发展以及地质 地貌等条件限制,未进行观测。

### 2 土壤气测量方法

根据断裂特征及实地情况,对金州断裂由北至南选取8条跨断层剖面进行测量(表1、 图1)。8条剖面由北至南依次为于家沟(YJG)剖面、烟台岗(YTG)剖面、后五道(HWD)剖 面、兴隆屯(XLT)剖面、后邓家(HDJ)剖面、博洛铺(BLP)剖面、虹溪谷(HXG)剖面和万家岭 西(WJLX)剖面。每条剖面布设1条测线,每条测线布设16个浓度测点进行土壤气Rn、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub>浓度测量,其中上、下盘各8个测点,共布置384个浓度测点。在实地测量过程中,以 断裂陡坎位置为中线,测点间距向两端逐渐拉长。断裂陡坎位置测点间距5m,而后依据测 量点地势地貌及岩土特征,向外依次10m、20m、40m间距拉长。对土壤气体组分浓度进行测 量时,首先在测点处使用钢钎进行打孔,孔径30mm、打孔深度80cm左右,然后拔出钢钎,迅 速将取样器(麻花钻)钻入孔中,并封住孔口使取样器与外界空气隔绝,最后使用橡皮管将取 样器与测量仪器连通进行取样测量。土壤气测量时间为2018年6月,为了排除气象因素对 测量结果造成的影响,对8条剖面一次性完成测量。

土壤气 Rn 浓度测量选用 Alpha GUARD PQ-2000 测氡仪,仪器测量误差 <3%,仪器量程为 2~200000Bq/m<sup>3</sup>,气泵采用 1L/min 抽气模式,采样间隔设置为 1min,每个测点测量 15 个浓度值,取平均值作为该点浓度值;土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度测试采用 GXH-3010E 便携式 CO<sub>2</sub> 检测仪,仪器测量范围 0~10.00%,分辨率为 0.001%,线性误差±2% FS,响应时间  $\leq$  15s,重复性 <1%;H<sub>2</sub> 浓度测试采用 ATG-300H 便携式氢分析仪,测量范围 0~5000ppm,检出限为 0.05ppm,平均相对标准偏差  $\delta \leq$  5%。

### 3 测量结果

现场测量 Rn、H<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>三种土壤气体的浓度,共获得 2176 组有效数据,其中 Rn 浓度数据 1920 组,H<sub>2</sub>浓度数据 128 组,CO<sub>2</sub>浓度数据 128 组,A [4] 本 CO<sub>2</sub>浓度数据 128 组,A [4] 本 CO<sub>2</sub>浓度数据 1920 组,H<sub>2</sub>浓度数据 128 组,CO<sub>2</sub>浓度数据 128 组,A [4] 本 CO<sub>2</sub>浓度数据 10.50%  $+ 3.01 - 96.02 k B q/m^3$ 、0.23% - 9.55%和 0.31 - 1527 p m; Rn、H<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>的平均值浓度变化范围分别为 10.65  $- 39.50 k B q/m^3$ 、0.59% - 3.37%和 9.74 - 306.28 p m; Rn、H<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>浓度最大值变化范围分别为 22.58  $- 96.02 k B q/m^3$ 、0.86% - 9.55%和 52.23 - 1527 p m。

### 4 分析讨论

#### 4.1 土壤气浓度地球化学特征分析

野外测量结果表明,辽南地区金州断裂8条剖面上的土壤气组分浓度变化各具特色

770

+	•
汞	-2
ic	4

СМҮК

#### 金州断裂土壤气 $Rn_{1}$ 和 $CO_{2}$ 的组分浓度测量结果统计

		$\operatorname{Rn}/(\mathrm{kBq}\cdot\mathrm{m}^{-3})$			CO <sub>2</sub> /%				H <sub>2</sub> /ppm				
测点名称 测点	测点 代号	最 大 值	最 小 值	平 均 值	异常下限	最 大 值	最 小 值	平 均 值	异常下限		最 小 值	平 均 值	异常下限
于家沟	YJG	96.02	3.63	32.87	76.23	9.55	0.23	3.37	9.70	1527.00	0.48	306.28	776.03
烟台岗	YTG	91.52	7.20	39.50	78.27	2.58	0.40	1.11	1.53	540.90	4.85	171.94	339.78
后五道	HWD	64.65	5.28	16.37	19.11	2.42	0.31	0.77	0.94	280.40	1.09	67.09	72.55
兴隆屯	XLT	44.56	25.23	33.23	38.05	2.12	0.45	1.27	1.32	376.60	13.98	117.34	159.85
后邓家	HDJ	57.85	9.99	29.17	39.21	1.60	0.65	1.08	1.30	245.10	6.93	107.14	124.96
博洛铺	BLP	40.54	7.40	22.97	33.15	4.24	0.84	1.77	2.07	229.10	4.96	86.80	108.18
虹溪谷	HXG	34.85	3.01	10.65	19.82	2.42	0.27	0.88	1.20	93.00	1.33	13.99	65.41
万家岭西	WJLX	22.58	3.73	11.67	22.81	0.86	0.38	0.59	0.83	52.23	0.31	9.74	43.27

(图2)。YJG 测点土壤气 Rn、H<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>浓度具有明显的上盘高、下盘低特征,且3种气体具 有较好的相关性,其中 Rn 和 CO<sub>2</sub>气体相关系数可达 0.70,表明 CO<sub>2</sub>对 Rn 具有一定的载气 作用(王喜龙等,2017)。研究表明,土壤气浓度与土壤湿度、土壤类型密切相关,土壤中小幅 降水会导致地表形成不透气层,阻碍土壤气与大气交换,增加了土壤气的浓度(Hinkle et al, 1987);在断裂位置,砂质土壤较泥质土壤更易出现浓度高异常,但砂砾土壤由于裂隙渗透 性过大及基岩覆盖,一般其上方土壤气浓度值相对较低(Fu et al,2005;韩晓昆,2014)。金 州断裂北段为倾角相对较高的高角度正断层,且上盘较为破碎(雷清清等,2008),基于野外 地质调查结果,YJG 测点上盘主要以砂质土壤为主,沉积层较厚,且富含水分较多,植被及农 作物茂盛;下盘主要以砂砾土壤为主,沉积层较薄,最薄处 1m 左右可见基岩。因此,综合以 上分析认为造成该测点所测气体浓度上盘明显高于下盘的原因,主要为该条测量剖面断层 上、下盘沉积层的明显差异性以及断层性质。

YTG 测点土壤气 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度具有高一致性,相关系数达 0.94,呈现上盘高、下盘低的特征;土壤气 H<sub>2</sub> 浓度具双峰式特征,在断裂陡坎浓度相对较低,两侧浓度相对较高。 HWD 测点土壤气 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度相关系数达 0.92,具高度相关性,且在数据变化形态上具 有上、下盘浓度高、中间低的双峰式特征。XLT 测点土壤气 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度具有相对较明显 的上盘较高特征,土壤气 H<sub>2</sub> 浓度与土壤气 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征差异较大,具有下盘相 对较高的变化特征。对于 XLT 测点土壤气浓度变化规律不明显这一特点,分析认为可能主 要与该点构造特殊性有关,XLT 测点位于金州断裂和海城河断裂交汇处,在测点位置,2 条断 裂互相切割交错,造成地质结构较为复杂。HDJ 测点土壤气 Rn、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度在断裂陡坎 位置相对较高,两侧相对较低。BLP 测点土壤气 Rn、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度在断裂陡坎位置相对较 低,上、下盘两侧相对较高。金州断裂九寨至盖州北段,HXG 测点土壤气 Rn、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度 在断裂上盘相对较高,断裂下盘浓度相对较低。金州断裂普兰店至九寨段,WJLX 测点土壤 气 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度在断裂位置相对较高,但不显著,土壤气 H<sub>2</sub> 浓度在断裂偏上盘位置浓度 相对较高,两侧相对较低。



图 2 金州断裂土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>浓度变化曲线

#### 4.2 背景值及异常界特征分析

4 期

СМҮК

对金州断裂由南至北挑选的 8 条测量剖面、384 个测点的土壤气浓度测量数据进行背景 值及异常下限计算。利用箱式图法对测得的断层土壤气 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 数据进行处理, 剔除 离群高值异常点后,取剩余测点平均值来表征每条测线的背景值。根据实际测量情况,本文 以背景值与 2 倍标准偏差之和作为测线异常下限。经计算, 各测点的背景值及异常下限见 表 2,该背景值及异常下限计算方法被广泛应用于国内外土壤气地球化学研究中,能较为客 观地反映研究区断层土壤气逸出特征(Kumar et al, 2009; 郑海刚等, 2016; 张扬等, 2017; 张 磊等, 2019; 王明亮等, 2019)。

将计算得到的各测点异常下限与各观测数据由北至南作图并进行对比分析,如图3所示。由图可见,在金州断裂8条观测剖面中,位于南、北两端的3个测点(YJG、YTG与WJLX)土壤气观测数据除个别单点高于异常界外,总体表现低于异常界,属正常变化范围; 而对于金州断裂中段 HWD 至 HDJ 测段以及 BLP 至 HXG 测段,土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>浓度表现为较多测点高于异常界。结合辽南地区历史地震活动(图4)可见,HWD 至 HDJ 测段位于海城老震区范围内,BLP 至 HXG 测段位于盖州震群及其附近地区。

对于异常主要集中在海城老震区和盖州震群地区这一特征,王喜龙等(2017)通过对首



图 3 金州断裂各测点土壤气 Rn、CO2 与 H2 浓度与异常界变化曲线

774



图 4 2018 年辽南地区 M<sub>L</sub> ≥ 2.0 地震及历史地震分布

都圈地区 18 条活动断裂的 35 条土壤气剖面进行测量,分析测得的土壤气 Rn、Hg 和 CO<sub>2</sub> 浓 度及通量数据,发现土壤气浓度变化与当地地震活动、应力水平、地壳结构及沉积层厚度等 存在一定关系。对比辽南地区历史地震活动及 2018 年辽南地区中、小地震活动(图4、图5)可以发现,海城老震区与盖州震群区域近年来中、小地震频发,是辽宁地区中、小地震活动最 为频繁的地点之一。经统计,仅 2015—2019 年期间,海城老震区便发生  $3.0 \le M_L < 4.0$  地震 15 次, $M_L \ge 4.0$  地震 2 次,最大地震为 2017 年 12 月 19 日海城  $M_L 4.8$  地震;盖州震群及附近 地区发生  $3.0 \le M_L < 4.0$  地震 11 次, $M_L \ge 4.0$  地震 1 次,最大地震为 2015 年 8 月 4 日盖州青 石岭  $M_L 4.8$  地震。1975 年辽宁海城 M7.3 地震的发生,以及近年来海城老震区和盖州地区 中、小地震及震群活动频繁,导致 2 处区域地下介质较为破碎。而地下介质破碎易造成地下 流体在断层和裂缝中充填增多,因此当应力发生改变时,该区域地下流体组成、赋存状态等 易发生变化并上移至地表,从而造成土壤气浓度和化学组分发生变化(Bernard,2001; 王喜 龙等,2017)。已有研究表明,金州断裂附近地下低速层发育明显,而低速层在垂直方向上对 中强地震具有明显的控制作用(万波等,2013);金州断裂与中地壳上部的低速层之间存在 密切关系,辽南地区大多数历史中强地震震源均集中在低速层附近(卢造勋等,1990、1993)。 王亮等(2014)利用 2008—2014 年盖州和海城地区地震观测数据,应用 Simulps14 软件对 2

37 卷



图 5 2015—2019 年海城老震区及盖州震群 M<sub>L</sub>≥2.0 地震 M-t 图 (a)海城老震区; (b)盖州震群

个地区进行小震精定位及三维速度结构分析,发现盖州地区震群位置发生较浅,且盖州地区 与海城地震地下速度结构存在一定的相似性,地震活动集中在低速体区域。Zheng 等 (2018)应用双差层析成像法对辽宁地区中上地壳进行研究,显示在海城地区金州断裂在地 下 15~20km 处存在明显低速层,且这些速层主要由地下流体作用导致,认为海城地区地震 频发主要是由断裂活动和低速体,即地下流体共同作用引起。因此,综合前人研究结果以及 对辽南地区土壤气异常分析和地震活动性分析,认为海城老震区和盖州震群附近小震活动 频繁及地下介质结构,可能是造成2处区域部分测点土壤气浓度值高于异常界的主要原因 之一。

#### 4.3 土壤气空间变化特征

对金州断裂 8 条土壤气测量剖面的观测数据由北至南进行制图分析(图 3、图 6),发现 金州断裂土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>浓度具有北高南低的变化特征,即金州断裂盖州北-鞍山南段 土壤气平均浓度最高(YJG、HWD、YTG、XLT、HDJ、BLP),九寨-盖州北段土壤气浓度次之 (HXG),普兰店-九寨段土壤气平均浓度最低(WJLX)。

孙启凯等(2017)对辽宁地区地壳垂直形变特征进行分析,发现辽宁地区地壳垂直形变 整体上呈现"东北升、西南降"的变化特征,就辽东南地区而言,1988—2016年表现为金州至 盖州一带下降,盖州以北上升,盘锦至海城一带下降,海城-岫岩地区上升。结合该地区 1988 年以来发生的 M<sub>s</sub>≥4.5 地震进行分析,认为金州断裂和海城河隐伏断裂正处于较强活动期, 对地壳垂直形变速率过度交界地带应当予以关注。对比孙启凯等(2017)的研究结果,辽南 地区地壳垂直形变速率过度交界带与盖州震群位置、海城老震区位置吻合。且对比上述对 辽南地区近年中小地震、震群活动及地下介质的分析结果,辽南地区中小地震及震群活动主

СМҮК

775

776



图 6 金州断裂各测点土壤气 Rn、CO, 与 H, 浓度平均值柱状图

要集中在地壳垂直形变速率过度交界地带的低速体区域。以上分析表明,盖州地区与海城 地区土壤气浓度在空间上表现为北高南低变化,可能与该地区近年地壳运动、地下介质结构 以及与中小震活动有关。

此外,对比盖州以北地区土壤气浓度空间变化特征,位于金州断裂最北段的 YJG 和 YTG 测点土壤气平均浓度整体偏高,甚至个别测点平均浓度高于海城老震区与盖州地区。而对 比辽南地区地震活动分布特征却发现,中小地震均集中在海城和盖州地区,而 YJG 至 YTG 测段地震活动却相对较弱(图4)。小震活动偏弱地区的土壤气浓度反而相对较高,对于这 一特征,本文从测量数据和测量场地地质特征等方面进行了分析。

对比 YJG 与 YTG 测点土壤气浓度变化曲线、异常界变化特征以及平均浓度变化特征 (图 2、图 3、图 6),可以发现 YJG 测段土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>浓度整体均表现上盘明显高于 下盘特征,浓度变化特征较为明显,土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>异常界均相对较高。而 YTG 测段 土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>浓度变化则差异性较大,且土壤气浓度变化规律不显著,其中土壤气 Rn 与 H<sub>2</sub>异常界与平均浓度明显偏高,而 CO<sub>2</sub>则相对较低,对比该测段测线浓度变化特征, 认为可能主要与测量过程中个别点土壤气 Rn 和 H<sub>2</sub>浓度出现显著增大有关。而对于这种存 在孤立高值点的原因,目前存在 2 种解释,一种观点认为在高值点处存在空间不连续性,导 致监测气体在此处富集(Ciotoli et al, 1998;Lombardi et al, 1996),另一种观点则认为是由多 条断裂带交汇于某处造成的(Ciotoli et al, 1998;Fridman, 1990;李营等, 2009)。通过对比 YTG 测线土壤气浓度变化,本文更倾向于监测气体在此处富集造成浓度偏高的观点。

基于上述对 YJG 测段场地地质特征的分析,得出 YJG 测段剖面土壤气浓度上盘高、下

王喜龙等: 辽宁金州断裂断层土壤气地球化学调查

777

盘低的特征主要与该处断裂特征、土壤类型及沉积层厚度有关。李营等(2009)通过对延怀 盆地土壤气地球化学特征进行分析,发现控制土壤气体地球化学背景场的主要因素为气体 组分的来源、地壳结构、断裂构造、地层和微生物作用;王喜龙等(2017)对首都圈地区土壤 气 Rn、Hg 和 CO<sub>2</sub>地球化学特征及其成因进行分析,认为首都圈地区土壤气的区域地球化学 特征主要受控于上地壳物质结构、深部气体补给和地震活动,同时也受自然环境以及土壤类 型的影响;韩晓昆(2014)通过对首都圈地震重点监测区土壤气体地球化学进行研究,发现 土壤气浓度变化的影响因素除受控于构造和地震活动外,还受到气象条件、土壤类型、岩石 类型等因素的影响。将 YJG 测段与其他 7 条测段地质地貌进行对比,其测量时间与测量期 间气象条件基本一致,可基本排除影响。将 YJG 测段上盘土壤结构类型、湿度与微生物作用 与其他 7 条测段进行对比,其土壤结构类型基本均为砂壤土或壤土,土壤结构类型基本一 致,对土壤气浓度的空间变化影响相对较低。但 YJG 测段上盘土壤湿度较其他测段则明显 偏高,土壤中富集水分较大,测线边缘附近喜水植被(芦苇等)茂盛,与其他测段相比,YJG 测 段上盘微生物作用与湿度明显较强。因此综合以上分析,认为辽南地区金州断裂土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>浓度北高南低的变化可能主要受控于该地区地下介质结构、地壳运动及地震 活动,同时受到场地地质特征的影响。

### 5 结论

通过对辽南地区土壤气 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 浓度进行测量,并结合地质特征、地震活动性特征以及前人研究结果,对该地区土壤气的地球化学特征进行分析,得出以下结论:

(1)对辽南地区金州断裂 8 条跨断层剖面进行土壤气测量,获得 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 浓度变 化范围分别为 3.01~96.02kBq/m<sup>3</sup>、0.23%~9.55% 和 0.31~1527ppm;浓度平均值变化范围 分别为 10.65~39.50kBq/m<sup>3</sup>、0.59%~3.37% 和 9.74~306.28ppm;Rn、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 浓度最大值 变化范围分别为 22.58~96.02kBq/m<sup>3</sup>、0.86%~9.55% 和 52.23~1527ppm。

(2) 土壤气 Rn、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub> 浓度异常下限计算及分析结果显示,金州断裂土壤气浓度异常主要与该地区地震活动及地下介质结构有关。

(3) 土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>地球化学特征在空间上呈现北高南低的变化趋势。通过对该 区域土壤类型、沉积层厚度、地壳形变特征以及地震活动等方面的综合分析,认为辽南地区 土壤气 Rn、CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>浓度北高南低的地球化学特征主要受地下介质结构、地壳运动与地震 活动的制约,同时还受到观测场地地质条件的影响。

致谢: 审稿专家对论文修改提出了中肯的意见与建议,在此致以衷心感谢。

#### 参考文献

曹凤娟,王亮,焦明若,等,2013.2012年2月2日盖州 M<sub>L</sub>4.7 震群序列特征及发震构造探讨.地震地质,35(4):842~852.
范雪芳,张磊,李自红,等,2016. 断裂带土壤气高精度氢异常分析.地震地质,38(2):303~315.
高常波,等,1998.东北输油管道场地断层活动性与地震危险性研究.北京:地震出版社,103~159.
韩晓昆,2014.首都圈地震重点监测区土壤气体地球化学.硕士学位论文.北京:中国地震局地震预测研究所,10~45.
康健,肖宁,高小其,等,2019. 松原 5.7 级地震震中区土壤氢气变化特征.中国地震,35(2):277~285.
雷清清,廖旭,董晓燕,2008.辽宁省地震构造研究.东北地震研究,24(4):1~10.

4 期

778 中 玉 地 震 37 卷 李继业,张彦吉,高研,等,2019. 黑龙江肇东痕量氢野外定点观测实验与分析. 中国地震,35(1):126~133. 李营,杜建国,王富宽,等,2009. 延怀盆地土壤气体地球化学特征. 地震学报,31(1):82~91. 林元武,王基华,高松升,1998. 断层气 CO,测定新方法与张北-尚义 6.2 级地震预报. 地震,18(4):353~357. 卢造勋,刘国栋,魏梦华,等,1990.中国辽南地区地壳与上地幔介质的横向不均匀性与海城7.3级地震.地震学报,12(4): 367~378. 卢造勋,夏怀宽,1993.内蒙古东乌珠穆沁旗-辽宁东沟地学断面.地球物理学报,36(6):765~772. 孙启凯,池国民,畅柳,等,2017. 辽宁地区地壳垂直形变特征与地震危险性分析. 地震学报,39(6):891~898. 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. 地学前缘,23(3):140~150. 万波,贾丽华,戴盈磊,等,2013. 辽东半岛中强地震活动及其与构造相关性. 地震地质,35(2):300~314. 万波, 靳超宇, 索锐, 2017. 辽宁省及邻近地区主要地震构造及其危险性判定. 防灾减灾学报, 33(1):1~11. 万波,钟以章,1997. 东北地区的新构造运动特征分析及新构造运动分区. 东北地震研究,13(4):64~75. 王亮,周龙泉,焦明若,等,2014.海城盖州地区速度结构和震源位置的联合反演研究.地震,34(3):13~26. 王明亮, 胡宁, 郭德科, 等, 2019. 安阳南断裂带土壤 H<sub>2</sub>、Rn 地球化学特征. 大地测量与地球动力学, 39(11): 1198~1201. 王喜龙,李营,杜建国,等,2017. 首都圈地区土壤气 Rn,Hg,CO,地球化学特征及其成因. 地震学报,39(1):85~101. 向阳,孙小龙,高小其,等,2018. 新疆库尔勒断层氢气浓度的影响因素及其地震预测的潜在效能评价. 中国地震,34(1): 48~59. 张博, 钱蕊, 夏彩韵, 2017. 盖州青石岭地震序列发震构造初探. 地震学报, 39(6):848~859. 张磊,刘耀炜,包创,等,2019. 川西冕宁断层土壤气特征. 环境化学,38(4):777~783. 张扬,戴波,单菡,等,2017. 郑庐断裂带江苏段断层气氡地球化学特征研究. 地震工程学报,39(2):248~252. 郑海刚,方震,周晓成,等,2016. 郑庐断裂带安徽段土壤气体的地球化学特征. 中国地震,32(4):642~652. 钟以章,白云,1999. 辽东半岛及两侧海域深部构造、活动构造与地震关系研究. 华北地震科学,17(2):59~65. 周晓成,2011. 汶川 M<sub>8</sub>8.0 地震后川西地区的气体地球化学.博士学位论文.合肥:中国科学技术大学,10~78. Bernard P, 2001. From the search of 'precursors' to the research on 'crustal transients'. Tectonophysics, 338(3~4):225~232. Chyi L L, Quick T J, Yang T F, et al, 2005. Soil gas radon spectra and earthquakes. Terr Atmos Ocean Sci, 16(4):763~774. Ciotoli G, Guerra M, Lombardi S, et al, 1998. Soil gas survey for tracing seismogenic faults: a case study in the Fucino Basin, central Italy. J Geophys Res, 103 (B10): 23781~23794. Ciotoli G, Lombardi S, Annunziatellis A, 2007. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin; Fucino Plain, central Italy. J Geophys Res, 112(B5): B05407. Fridman A I, 1990. Application of naturally occurring gases as geochemical pathfinders in prospecting for endogenetic deposits. J Geochem Explor.  $38(1 \sim 2) \cdot 1 \sim 11$ . 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. Geochem J, 39(5):427~439. Fytikas M, Lombardi S, Papachristou M, et al, 1999. Investigation of the 1867 Lesbos (NE Aegean) earthquake fault pattern based on soil-gas geochemical data. Tectonophysics, 308(1~2):249~261. Han X, Li Y, Du J, et al, 2014. Rn and CO<sub>2</sub> geochemistry of soil gas across the active fault zones in the capital area of China. Nat Hazards Earth Syst Sci, 14(10):2803~2815. Hinkle M E, Ryder J L, 1987. Effect of moisture and carbon dioxide on concentrations of helium in soils and soil gases. J Geophys Res, 92(B12): 12587~12594. Kumar A, Singh S, Mahajan S, et al, 2009. Earthquake precursory studies in Kangra valley of North West Himalayas, India, with special emphasis on radon emission. Appl Radiat Isot,  $67(10):1904 \sim 1911$ . Li Y, Du J G, Wang X, et al, 2013. Spatial variations of soil gas geochemistry in the Tangshan area of northern China. Terr Atmos Ocean Sci, 24(3): 323~332. Lombardi S, Etiope G, Guerra M, et al, 1996. The refinement of soil gas analysis as a geological investigative technique. Brussels. Lombardi S, Voltattorni N, 2010. Rn, He and CO<sub>2</sub> soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults. Appl Geochem, **25**(8):1206~1220.

**MYK** 

- Walia V, Yang T F, Lin S J, et al, 2013. Temporal variation of soil gas compositions for earthquake surveillance in Taiwan. Radiat Meas, 50:154~159.
- 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. Radiat Meas, 60:8~14.
- Woodruff L G, Cannon W F, Eberl D D, et al, 2009. Continental-scale patterns in soil geochemistry and mineralogy: Results from two transects across the United States and Canada. Appl Geochem, 24(8): 1369~1381.
- Zheng Q, Liu C, Tian Y, et al, 2018. Seismic imaging of the middle and upper crust by double-difference tomography: the Haicheng earthquake( $M_s7.3$ ) in Liaoning Province. Appl Geophys,  $15(1): 125 \sim 136$ .
- Zhou X C, Du J G, Chen Z, et al, 2010. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan  $M_{\rm S}8.0$  earthquake, southwestern China. Geochem Trans, 11:5.

## Study on Geochemical Characteristics of Soil Gas cross Jinzhou Fault in Liaoning Province

Wang Xilong<sup>1</sup> Jia Xiaodong<sup>1</sup> Yang Mengyao<sup>2</sup>

1) Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, China

2) Balas Investment Consulting Company of Limited Liability of Beijing, Beijing 100044, China

Abstract The concentration of soil gas Rn,  $CO_2$  and  $H_2$  were measured cross Jinzhou Fault along totally 8 profiles in the southern area of Liaoning. The results showed that the average concentrations of soil gas Rn,  $CO_2$  and  $H_2$  varied from 10.65 to 39.50kBq/m<sup>3</sup>, 0.59% to 3.37% and 9.74 to 306.28 ppm, respectively. The distribution of anomaly concentrations of soil gas Rn,  $CO_2$  and  $H_2$  concentrated within the Haicheng, Gaizhou area and its nearby. There exists a clear spatial distribution feature in which the concentration values of soil gases in the northern area of Liaoning were higher than those in the southern region within the study area, which could be attributed to characteristics of the earthquake spatial distribution, low velocity distribution, geological of the observation site and vertical crustal deformation rate. These geochemical characteristics in the study area might be mainly controlled by the seismic activity, crustal structure and vertical crustal deformation, as well as the geological condition on site.

Keywords: Soil gas; Geochemistry; Anomaly concentration contrast; Jinzhou fault; The southern area of Liaoning

4 期