

沂沭断裂带构造地球化学观测结果分析*

耿 杰, 付俊东, 孔向阳, 缪 杰, 葛孚刚

(山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要: 为了监测郯庐断裂带跨活动断裂地球化学组分变化特征, 利用在沂沭断裂带上的安丘—莒县断裂勘选出的5条地球化学观测测线剖面观测资料, 分析了不同测线的土壤气体浓度(Rn , CO_2 和 H_2)和测值分布特征。结果表明: 断裂活动性质、活动强度、构造组合和裂隙分布对跨活动断层的地球化学测项测值分布具有控制作用, 地球化学测项测值分布与活动断裂两侧地层结构、类型和密实程度密切相关, 跨活动断层不同地球化学测项分布存在一定的相关性。

关键词: 地球化学测项; 测值分布; 活动断层; 安丘—莒县断裂

中图分类号: P315.724

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)03-0310-10

0 引言

活动断裂作为物质和气体运移的通道, 对地球化学测项的测值分布有明显的控制作用(King *et al.*, 1996; Giammanco *et al.*, 1998)。在地震多发区和活动断层分布区对土壤气的浓度和化学特征等进行的大量调查研究结果显示, 地下气体 Rn , Hg 和 CO_2 等组分能够客观地、灵敏地反映地壳应力状态和地震活动(Yang *et al.*, 2005; Wiersberg, Erzinger, 2008; Kumar *et al.*, 2009; Lombardi, Voltattorni, 2010; Walia *et al.*, 2013)。由于地壳中的断层和裂缝会被各种地球化学组分的流体所充填(Bernard, 2001), 当地下应力或应变发生改变而引起地壳形变、断层或地震活动时, 地下流体的组成、赋存状态等会发生变化, 并沿断层和裂缝向上运移至地表, 从而导致断裂附近土壤气的释放强度和化学组分有所改变。因此, 监测跨断层土壤气释放浓度的变化, 已成为探索地震前兆与地震预测、评价断裂活动性的有效途径和重要方法(Baubron *et al.*, 2002; Woodruff *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016; 汪成民等, 1991 a, b; 刘菁华等, 2006)。国外很多学者从20世纪80年代开始进行跨断层土壤气研究, 在断层探测、

地震预测以及断层气来源等方面的研究已取得了很多重要成果。中外学者也相继在美国的圣安德烈斯断裂(King *et al.*, 1996)、日本 Yamasaki 断层(Wakita *et al.*, 1980)、意大利的 Pernicana 断裂(Giammanco *et al.*, 1998)以及中国的海河隐伏断层、海原断裂带、玛曲断裂带、夏垫断裂、西秦岭北缘断裂带等利用断层土壤气探测断层的位置, 研究断层的活动性(张新基等, 2005; 邵永新等, 2007; 周晓成等, 2007, 2011; 张慧等, 2013; 韩晓昆等, 2013; 苏鹤军等, 2013; Wakita *et al.*, 1980), 以及跨断层土壤气特别是 Rn 的浓度变化与地震的关系(杜建国等, 1998; 王博等, 2010), 并尝试通过断层土壤气这一手段预测地震。

郯庐断裂带作为中国大陆东部最显著的深大断裂, 其未来的震情趋势一直备受关注。根据郯庐断裂带断层活动特征(晁洪太等, 1997a, b; 郯庐断裂带地质填图课题组, 2013; 王华林, 1995; 王志才等, 2017; 李家灵, 1989; 李家灵等, 1994 a, b; 曹筠等, 2018)、深部构造条件(张碧秀, 汤永安, 1988)、历史地震活动与现今中小震活动特点(魏光兴等, 1993)、构造应力场(刘峡等, 2006)和地震前兆演化特征, 王华林等(2017)综合分析认为该区存在发生中强

* 收稿日期: 2018-09-03.

基金项目: 中国地震局地震预测预报系统运维(2200405(018))专项和山东省地震局地震概率预测科技创新团队项目联合资助。

地震的背景。建立和完善郯庐地震构造带地球化学观测网,监测构造地球化学动态变化是判定郯庐断裂带构造活动特征的有效途径之一。在中国地震局的统一安排下,2017年笔者团队在沂沭断裂带开展跨活动断层流动地球化学观测(R_n , CO_2 和 H_2),这在山东省地震监测历史上属首次,目的是为郯庐断裂带山东段地下气体浓度提供背景值数据,以确定不同断裂带气体的释放特征,综合分析研究气体的释放机制,尝试建立气体释放的理论模型,为郯庐断裂带地震趋势研判提供科学依据,为地震预测研究提供科技支撑。本文基于该次现场观测资料,分析和研究了郯庐断裂带山东段陆域段(以下简称沂沭断裂带)断层土壤气体浓度(R_n , CO_2 和 H_2)测值分布特征,探讨了不同测线土壤气体测值分布与断裂活动性质、活动强度、构造组合和裂隙分布的关系。

1 地震地质背景

沂沭断裂带是山东地区的主导活动构造(李家灵, 1989),具有两堑夹一垒的构造格局(陈国星, 高维明, 1988; 高维明等, 1988),主要由昌邑—一大店断裂、白芬子—浮来山断裂、沂水—汤头断裂、郯部—葛沟断裂、安丘—莒县断裂等5条近乎平行的断裂组成(图1),晚更新世晚期以来的新活动主要表现在安丘—莒县断裂上(方仲景等, 1986; 李家灵等, 1994a),在该断裂上曾发生过公元前70年安丘7.0级地震(王志才等, 2005)和1668年郯城8½级地震(高维明等, 1988)。该断裂是沂沭断裂带的主要活动断裂(晁洪太等, 1994),是沂沭断裂带中活动时代最新、活动强度最大的一条断裂(王华林, 耿杰, 1996)。它总体走向NNE,倾向E或W,以右旋走滑运动为主,兼有正断和逆断活动特征,对强震的发生具有明显的控制作用(王志才等, 2005)。断裂带两侧构造演化历史存在明显差异(方仲景等, 1986),新构造期以来仍继承了前期的构造格局特点,总体活动比较强烈。

安丘—莒县断裂晚更新世以来活动的断裂可分4段(图1),自北向南分别是昌邑—南流段、安丘—孟疃段、青峰岭段和莒县—郯城段(郯庐

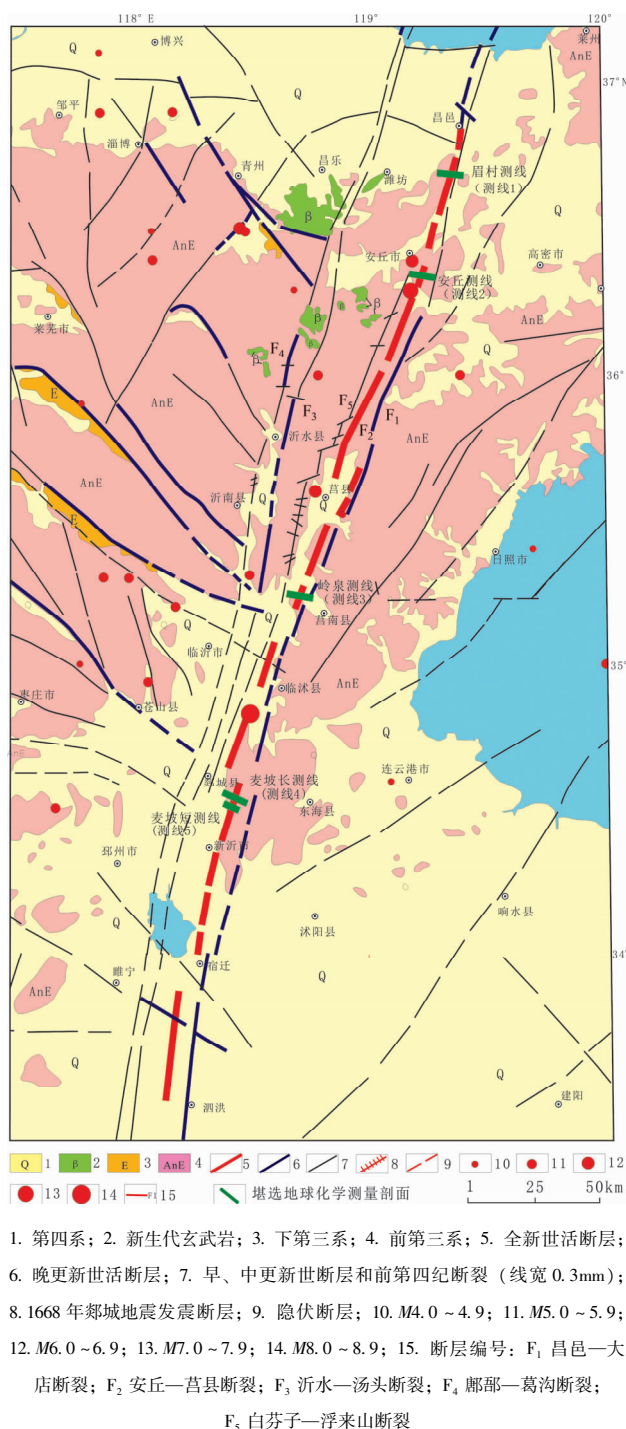


图1 郯庐断裂带山东段活动断裂与流动地球化学观测测线分布图

Fig. 1 Distribution map of active faults and the measuring line of mobile geochemical observations in the Shandong section of the Tanlu fault zone

断裂带地质填图课题组, 2013; 王志才等, 2017)。这4段之间总体上是呈左阶斜列的形式, 其中昌邑—南流段和安丘—孟疃段之间左阶形式比较明显,

青峰岭段和莒县—郯城段之间总体上具有左阶斜列形式,但安丘—孟瞳段、青峰岭段之间的左阶形式不是十分明显。

昌邑—南流段总长 31 km,自北向南可分为文山、朱里、北眉—双官和南流小段,它们之间呈右阶斜列,长度分别为 5, 7, 10, 9 km,阶区宽度分别是 2~3 km;根据错断地层关系和年代数据,认为该段最新活动时代为全新世中晚期。

安丘—孟瞳段总长约 21 km,自北向南可分为安丘—管公和庵上一孟瞳 2 小段。安丘—管公小段出露连续,断层陡坎清晰,长 13 km;庵上一孟瞳小段大部分隐伏在河流谷地中,出露段主要位于十字路与庵上镇之间,长约 8 km。2 小段平面上呈右阶斜列,其阶区宽度约 2 km。根据探槽揭露和年代数据,认为安丘—孟瞳段最新活动时代为晚更新世中晚期—全新世早期。

青峰岭段总长约 35 km,自北向南大致可分为小店子—恨虎山、库山—车庄、茅埠、王台子和王家岭小段,长度分别为 6, 8, 14, 4, 3 km,最新活动时代为晚更新世晚期—全新世早期。

莒县—郯城段是一个独立的破裂单元,其几何形态、活动性质、最大位移量、最新活动时代、大震复发间隔、现代活动状态等都有自己的特点。该段总体走向 NE20°,由多个独立的破裂段组成。各段间呈右阶排列,断层间错列距离不大,一般为几百米到一千米左右。该段为 1668 年郯城 8½ 级地震的发震断层(李家灵等,1994b),野外调查发现沿 1668 年地震断层各处的断层性质是不一致的,中部以走滑为主,向南、北两侧逐渐转变为以逆冲为主。中部左山强震走滑断层和腾马—中华山强走滑断层的存在应是板泉拉分盆地形成的原因(晁洪太等,1994)。

2 构造地球化学观测测线遴选

2.1 遴选原则

在沂沭断裂带相关地震地质研究成果的基础上(晁洪太等,1997a, b; 郯庐断裂带地质填图课题组,2013; 王华林,1995; 王志才等,2005),结合构造地球化学观测要求和本次工作前对沂沭断裂带及其附近地区的实地踏勘情况,拟定以下测线遴选原则:①测线选取断裂活动特征明显,断错第四纪微地貌和晚第四纪地层,具有最新活动的段落;②测线通过处断裂位置明确,能通过地震地质调查和地球物理探测确定安丘—莒县断裂主断面的部位;③具有一定厚度的第四纪覆盖层,利于地球化学组分的富集;④测线尽可能垂直于断裂走向布设;⑤测线选择充分考虑断裂活动性质和产状的差异,兼顾正断层和逆断层,考虑断层西倾和东倾的差异;⑥为了对比研究,排除干扰因素,同测线选取双向 2 条测线;⑦测线要求避开水塘、化工源和其他可能引起地球化学气体异常的地段。

2.2 遴选结果

按遴选原则,通过实地考察确定了 5 条地球化学测线(图 1, 表 1)。1~4 号测线长度均在 500 m 左右(5 号测线位于麦坡,是对 4 号测线的补充),且均与断裂垂直或接近垂直,断裂位于测线中心点附近,能够很好地控制断裂。所选测线处的安丘—莒县断裂主断面位置准确,最新活动强,且位于断裂的不同段落上。

(1) 眉村测线

安丘—莒县断裂在眉村测线附近自南向北经南流、穆村、邓村和朱里,在北眉—双官小段冲

表 1 沂沭断裂带构造地球化学测线情况

Tab. 1 The basic in for mation of structural geochemical measuring lines of Yishu fault zone

测线名称与编号	测线与断裂交点坐标		测线长度/ m	测点数	分段
	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$			
眉村测线(1号)	119.34	36.69	478	21	昌邑—南流段
安丘测线(2号)	119.22	36.38	513	20	安丘—孟瞳段
岭泉测线(3号)	118.71	35.23	488	20	莒县—郯城段
麦坡长测线(4号)	118.43	34.55	476	20	莒县—郯城段
麦坡短测线(5号)	118.42	35.54	136	9	莒县—郯城段

注:1~2 号测线位于公元前 70 年安丘 7.0 级地震断裂活动段;3~5 号测线位于 1668 年郯城 8½ 级地震断裂活动段。

沟具有明显的右旋位移特征，47 ka 以来断裂右旋位移速率为 0.22 ~ 0.4 mm/a。眉村测线南侧开挖探槽（图 2a）资料显示，断层错断了晚更新世晚期至全新世早期风成黄土层（ Q_{3-4} ），断层性质为

正断层，其西盘为王氏组灰黑色砂砾岩和紫红色泥页岩，其东盘为第四系砂质亚黏土和黏土地层。综合资料分析表明，眉村测线跨的安丘—莒县断裂活动性质为右旋走滑正断层。断裂走向 NNE，

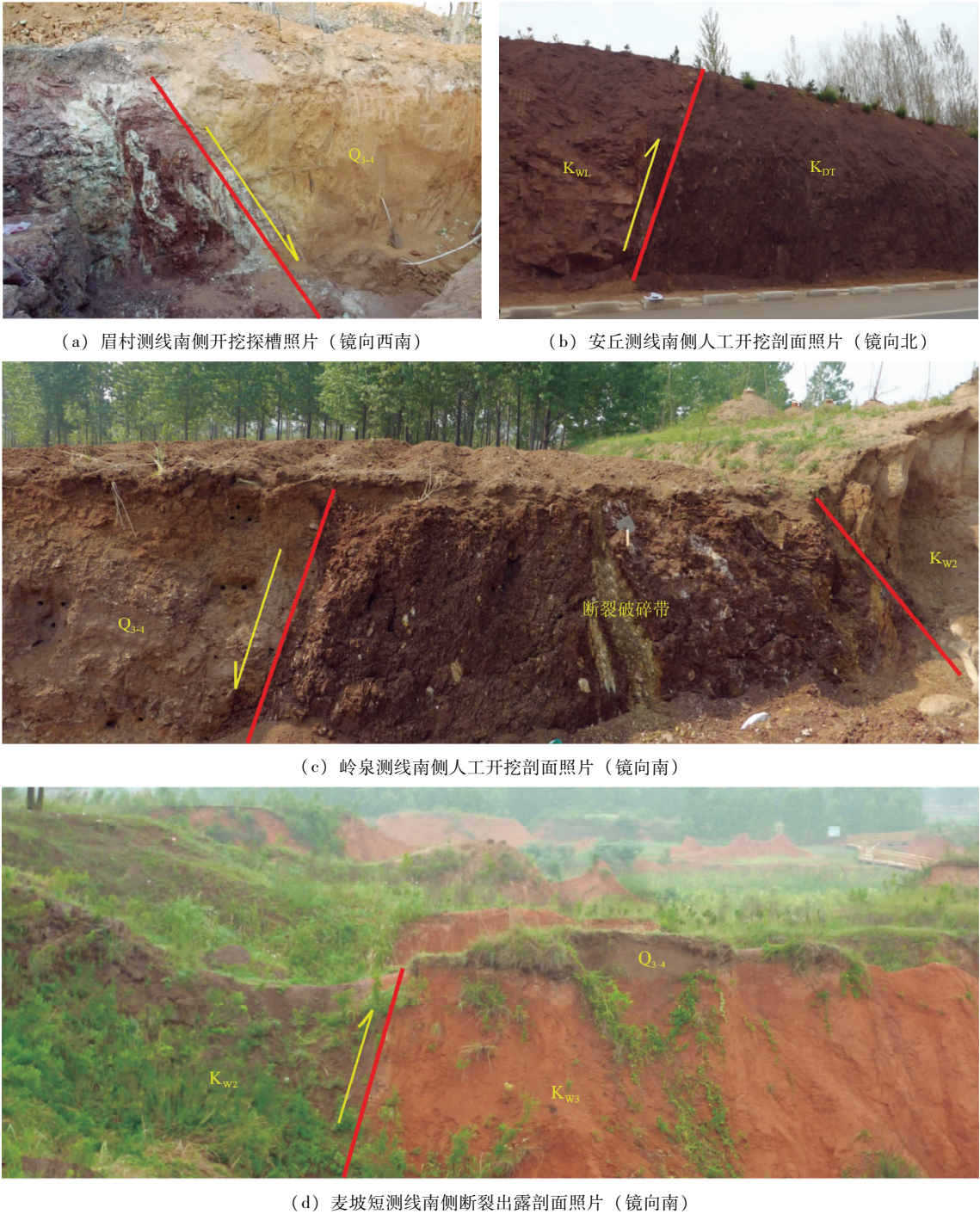


图 2 沂沭断裂带构造地球化学测线及其附近断层开挖和出露照片
（红线为断层，黄色箭头指示断层错动方向）

Fig. 2 Structural geochemical observation measuring line of Yishu fault zone and photos of excavation and exposure of its near area (the red line is the fault, and the yellow arrow indicates the direction of fault dislocation)

主断裂倾向 E, 伴有西倾正断层, 宽度达 30 ~ 40 m。断裂活动时代为全新世, 并显示多期活动特点。

(2) 安丘测线

安丘—莒县断裂在安丘测线附近自南向北经田家官庄东、冯家坊子西、小苇园村东。断裂在地貌上形成高 1 ~ 2 m 左右的陡坎, 沿断层面发育厚 1 ~ 3 cm 的灰绿色断层泥, 是最新滑动面, 且沿最新滑动断面房屋和地面出现裂缝。安丘—莒县断裂将一条 EW 向冲沟右旋错断, 在冯家坊子—川里有 10 余条冲沟同步右旋位移, 右旋位移量约为 15 m。安丘测线南侧人工开挖剖面 (图 2b) 显示断层性质为逆断层, 断裂东盘为碎裂岩带, 主要为白垩系大盛群田家楼组 (K_{DT}) 紫红色砂岩、粉砂岩和泥岩; 断裂西盘为白垩系王氏群林家庄组 (K_{WL}) 暗紫红色砾岩。

综合资料分析, 发现安丘测线跨的安丘—莒县断裂活动性质为右旋走滑逆断层。断裂走向 NNE, 主断裂倾向 W。断裂活动时代为全新世, 且显示多期活动特点, 其西盘为白垩系砾岩和砂砾岩地层, 东盘为白垩系泥质砂岩和泥岩地层, 断裂带宽度达 40 ~ 50 m。

(3) 岭泉测线

安丘—莒县断裂在岭泉测线附近自南向北经板泉和岭泉。在岭泉镇西侧山前, 地貌上表现为 NNE 平直延伸的陡坎。近 EW 向的冲沟右旋错断, 水平断距 10 m。在左山 NW 向见宽度约 8 m 安丘—莒县断裂破碎带, 由一系列断层组成, 沿断层面发育了厚约 3 m 的紫红色及灰绿色断层泥带, 最新的断层泥厚 30 ~ 60 cm, 断层以走滑兼正断活动为主, 错断了上更新统沉积物和全新统松散砂砾层。在莒县岭泉测线南侧人工开挖剖面 (图 2c), 显示断层性质为正断层, 西盘为白垩系王氏组 (K_w) 泥页岩和砂砾岩, 发育宽 8 m 左右的断层破碎带; 东盘为第四系上更新统和全新统 (Q_{3-4}) 褐黄色灰绿色含砾黏土、亚黏土和砂砾石层。

综合资料分析, 岭泉测线跨的安丘—莒县断裂活动性质为右旋走滑正断层。断裂走向 NNE, 主断裂倾向 W。断裂活动时代为全新世, 显示多期活动特点。断裂西盘为白垩系砾岩和砂砾岩地层, 东盘为第四系砾黏土、亚黏土和砂砾石层地层, 断裂带宽度约 30 ~ 40 m。

(4) 麦坡长、短测线

安丘—莒县断裂在麦坡测线附近自南向北经

田家官庄东、冯家坊子西、小苇园村东。在郯城麦坡地震断层遗址的卫星影像上断层迹线明显, 近于一条直线。沿断裂冲沟被右旋位错, 具有阶跃变化, 显示断裂多次活动。出露地表的断层线表现得更一目了然, 由于断层错断了一系列新生代岩脉, 水平位错达 50 多米, 所以使该断裂的右旋走滑运动特征更为典型。在麦坡短测线南侧断裂出露剖面 (图 2d), 显示断层性质为逆断层, 其西盘为白垩系王氏组三段 (K_{W3}) 砖红色粉砂岩, 东盘为白垩系王氏组二段 (K_{W2}) 灰黑色砂砾岩, 断层断错上更新统砂质亚黏土。

综合资料分析, 麦坡测线所跨安丘—莒县断裂活动性质为右旋走滑逆断层。断裂走向 NNE, 主断裂倾向 E。断裂活动时代为全新世, 显示多期活动特点。断裂东盘为灰黑色砾岩和砂砾岩地层, 西盘为砖红色泥质砂岩和泥岩地层, 断裂带宽度约 30 ~ 40 m。

3 观测结果初步分析

按照郯庐断裂带流动地球化学观测项目的要求, 采用 P2000 测氢仪、华云便携式红外线 CO_2 分析仪、ATG-300H 测氢仪完成了跨安丘—莒县断裂 5 条测线 R_n , CO_2 和 H_2 观测, 累计测线长度 4 176 m, 测点 180 个, 并完成了测线及其附近地区水样采集、水化学分析和氢氧同位素化验分析。各测线观测数据计算结果和断裂带及其两侧土壤气 R_n , CO_2 和 H_2 组分浓度分布情况归纳总结于表 2。

(1) 眉村测线

眉村测线观测结果显示 (表 2), 在断裂带两侧, C_{Rn} 平均值显示出西盘高东盘低的特征, C_{CO_2} 平均值显示出东盘低西盘高的特征, C_{H_2} 平均值显示西盘高东盘低的特征。断裂带为 C_{Rn} , C_{CO_2} 及 C_{H_2} 测值梯度带。 C_{Rn} 与 C_{H_2} 测值似乎存在正相关关系。

实地考察发现, 安丘—莒县断裂在眉村测线为正断层, 倾向 E。断裂 NW 盘下伏基岩主要为砂岩、砾岩和泥岩, 第四系厚度约 1 ~ 1.5 m; 南东盘发育有风成黄土, 厚度大于 10 m, 在考察点处的人工坑中见风成黄土。由于断裂两盘岩性和第四系覆盖层厚度差异, 使断裂两侧地球化学测项测值存在明显的不同, 断裂控制着地层发育, 构成了地球化学测项测值梯度带。

表 2 郯庐断裂带山东段各测线及断裂带两侧土壤气 Rn、CO₂ 和 H₂ 观测结果
Tab. 2 Observation results of Rn, CO₂ and H₂ components in soil gas along the measuring lines
near the Shandong section of the Tanlu fault zone

测线	测项								
	C _{Rn} 值/(kBq·m ⁻³)			C _{CO₂} 值(%)			C _{H₂} 值/ppm		
眉村测线	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
	203.29	15.01	86.20	0.55	0.17	0.32	117.20	12.36	44.82
	断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布		
	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带
	42.67	125.30	梯度带	0.24	0.40	梯度带	27.47	57.23	梯度带
安丘测线	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
	89.61	21.39	40.58	1.45	0.22	0.54	287.20	11.14	70.77
	断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布		
	断裂东盘 (下盘)	断裂西盘 (上盘)	断裂带	断裂东盘 (下盘)	断裂西盘 (上盘)	断裂带	断裂东盘 (下盘)	断裂西盘 (上盘)	断裂带
	32.98	46.53	低值带	0.75	0.40	分界线	62.74	101	低值带
岭泉测线	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
	165.04	35.76	77.89	2.43	0.16	0.62	634.70	6.32	134.13
	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带
	75.22	78.19	梯度带	1.09	0.38	过渡带	36.21	191	陡变带
麦坡长测线	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
	78.29	5.23	32.37	2.1	0.25	0.96	389.90	34.22	157.07
	断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布		
	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带
	30.78	31.37	梯度带	1.05	1.06	梯度带	132.45	183.33	低值带
麦坡短测线 (5 号测线)	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
	57.80	10.42	23.38	1.45	0.27	0.77	591.90	20.65	196.54
	断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布			断裂带及其两侧平均值分布		
	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带	断裂东盘 (上盘)	断裂西盘 (下盘)	断裂带
	35.34	19.60	低值带	0.63	0.88	梯度带	236.80	167.84	低值带

(2) 安丘测线

安丘测线观测结果显示(表 2),在断裂带两侧,C_{Rn} 平均值显示西盘高东盘低的特征,断裂带为 C_{Rn} 测值低值带;C_{CO₂} 平均值显示东盘高西盘低的特征,断裂带构成了测值高低值分界线;C_{H₂} 平均值显示西盘高东盘低的特征,断裂带为 C_{H₂} 低值

带。C_{Rn} 与 C_{CO₂} 测值近乎存在负相关关系,C_{Rn} 与 C_{H₂} 测值近乎存在正相关关系。

实地考察发现,安丘测线安丘—莒县断裂为逆断层,倾向 W。断裂北西盘下伏基岩主要为白垩系王氏群林家庄组暗紫红色砂岩和砾岩,南东盘为碎裂岩带,原岩主要为白垩系大盛群田家楼

组紫红色砂岩、粉砂岩和泥岩。在安丘测线范围内,第四系地层发育,地表均有第四系覆盖,第四系的厚度约 1~2.5 m。由于断裂两盘岩性有差异,且受断裂产状和活动性质控制,导致断裂及其两侧地球化学测项测值存在明显差异。由于断裂带附近覆盖层较薄,导致地球化学组分散失,出现测值低值区。

(3) 岭泉测线

岭泉测线观测结果显示(表 2), C_{Rn} 平均值在断裂带两侧相近,断裂带为 C_{Rn} 梯度带; C_{CO_2} 平均值显示出东盘高西盘低的特征,断裂带为其测值变化的过渡带; C_{H_2} 平均值在断裂西盘观测值波动较大,且显示西盘高东盘低的特点,断裂带为 H_2 测值陡变带。 C_{Rn} 与 C_{CO_2} 测值近乎存在正相关关系, C_{Rn} 与 C_{H_2} 测值近乎存在负相关关系。

实地考察发现,岭泉测线安丘—莒县断裂为正断层,倾向 E。断裂北西盘下伏基岩主要为白垩系王氏组泥页岩和砂砾岩,第四系的厚度约 1~1.5 m;南东盘为第四系褐黄色灰绿色含砾黏土、亚黏土和砂砾石层,厚度大于 10 m。在考察点处的人工坑中见风成黄土。由于断裂两盘岩性和第四系覆盖层厚度差异,使断裂两侧地球化学测项测值存在明显的不同,断裂控制着地层发育,构成了地球化学测项测值梯度带或陡变带。在 330~440 m 存在 C_{Rn} 和 C_{CO_2} 高值梯度带,推测在此段可能有活动断裂通过,有待进一步验证。

(4) 麦坡长、短测线

麦坡长测线观测结果显示(表 2),断裂带两侧 C_{Rn} 及 C_{CO_2} 平均值相近,断裂带为 C_{Rn} 测值相对高值梯度带和 C_{CO_2} 测值梯度带; C_{H_2} 平均值在断裂带两侧测值有一定差异,西盘测值波动较大,断裂带为 C_{H_2} 低值带。 C_{Rn} 与 C_{CO_2} 测值似乎呈负相关关系。

实地考察发现,麦坡长测线安丘—莒县断裂为逆断层,倾向 E。断裂北西盘下伏基岩主要为白垩纪王氏组三段砖红色粉砂岩,南东盘为白垩纪王氏组二段灰黑色砂砾岩,断层断错上更新统砂质亚黏土。在麦坡长测线范围内,地表有第四系覆盖,断裂东侧第四系厚度 0.5~1.5 m,西侧第四系厚度 1.0~5.0 m。由于断裂两盘岩性和覆盖层厚度差异,使断裂两侧地球化学测项测值存在明显的不同,受断裂产状和活动性质控制,造

成了断裂及其两侧地球化学测项测值出现梯度带。断裂东侧第四系覆盖层较薄,造成地球化学组分散失,出现测值低值区。在 390~440 m 存在 C_{Rn} , C_{CO_2} 和 C_{H_2} 高值梯度带,推测在此段可能有活动断裂通过,有待进一步验证。

麦坡短测线观测结果显示(表 2), C_{Rn} 平均值在断裂两侧显示东盘高西盘低的特征,断裂带为 C_{Rn} 低值带; C_{CO_2} 平均值在断裂上显示西盘高东盘低的特征,断裂带为 C_{CO_2} 测值梯度带; C_{H_2} 平均值在断裂上显示东盘高西盘低的特征,断裂带为 C_{H_2} 低值带。 C_{Rn} 与 C_{H_2} 测值近乎正相关关系。

实地考察发现,麦坡短测线安丘—莒县断裂为逆断层,倾向 E,在麦坡短测线范围内,断裂出露地表,无第四系覆盖层或覆盖层厚度小于 1 m。断裂带附近区域 C_{Rn} , C_{H_2} 差异变化不明显,可能与断裂出露,第四系较薄,造成地球化学组分散失有关。

4 结论与讨论

本文基于对 2017 年沂沭断裂带上的安丘—莒县断裂勘选出的 5 条流动地球化学观测测线的观测结果进行分析,得出以下初步结论与认识:

(1) 本次勘选的 5 条流动地球化学观测测线跨越了安丘—莒县断裂不同的活动段,选取时考虑了断裂活动性质和产状的差异,兼顾正断层和逆断层,断层西倾和东倾的差异。眉村测线和安丘测线位于公元前 70 年安丘 7.0 级地震断裂活动段,眉村测线跨正断层,断裂东倾;安丘测线跨逆断层,断裂西倾。岭泉测线和麦坡长、短测线位于 1668 年郯城 8½ 级地震断裂活动段,岭泉测线跨正断层,断裂东倾;麦坡测线跨逆断层,断裂东倾。堪选的 5 条测线的观测资料有利于开展不同活动强度、不同活动性质和不同断裂产状活动断层地球化学组分测值分布特征的分析研究。

(2) 由于断裂活动性质和活动强度不同,可产生不同的构造组合和裂隙分布,从而控制跨活动断层测线的地球化学测项测值分布特征。眉村测线和安丘测线 C_{Rn} 最大测值为 89.61~203.29 $kBq \cdot m^{-3}$, C_{CO_2} 最大测值为 0.55%~1.45%, C_{H_2} 最大测值为 117.20~287.20 ppm;岭泉测线和麦坡长、短测线 C_{Rn} 最大测值为 57.80~165.04 kBq

$\cdot \text{m}^{-3}$, C_{CO_2} 最大测值为 1.45% ~ 2.43%, C_{H_2} 最大测值为 389.90 ~ 634.70 ppm。根据汪成民等 (1991a) 研究结果, C_{Rn} 被作为应力集中的指标, 一般 C_{Rn} 值越大, 应力集中越强; C_{H_2} 被作为断裂贯通性的指标, 一般 C_{H_2} 值越大, 断裂贯通性越好。分析认为, 安丘段的应力集中高于郯城段的, 郯城段的断裂贯通性高于安丘段。

眉村测线和岭泉测线为跨越正断层测线, 安丘测线和麦坡长、短测线 (2 条) 为跨越逆断层测线。眉村和岭泉测线的 C_{Rn} , C_{CO_2} 和 C_{H_2} 最大测值总体高于安丘和麦坡测线。正断层产生于引张应力环境, 逆断层产生于挤压应力环境。引张应力环境更有利于张裂隙的产生, 形成地球化学组分的运移通道, 而挤压应力环境更有利于裂隙的闭合, 不利用形成地球化学组分的运移通道。因此, 跨越正断层测线的 C_{Rn} , C_{CO_2} 和 C_{H_2} 最大测值往往会高于跨逆断层测线。

(3) 地球化学测项测值分布与断裂活动控制两侧地层结构、类型和密实程度密切相关。安丘—莒县断裂在眉村测线控制着东盘砂质亚黏土和黏土与西盘砂砾岩、泥页岩的发育。东盘的砂质亚黏土和黏土透气性较差, 对断层溢出的 C_{Rn} 和 C_{H_2} 地球化学组分具有抑制作用, 对 C_{CO_2} 有密封和富集作用, 从而导致断裂东盘 C_{Rn} 和 C_{H_2} 测值较低; 西盘第四系覆盖层厚度为 1 ~ 2 m, 砂砾岩和泥页岩由于断裂活动、破裂面和裂隙较发育, 西盘地层结构有利于断层溢出的地球化学组分富集。断裂活动控制的断裂两侧地层结构、类型和密实程度差异性, 在断裂带附近形成 C_{Rn} , C_{CO_2} 和 C_{H_2} 测值梯度带。安丘—莒县断裂在岭泉测线控制着东盘砂质亚黏土和黏土与西盘砂砾岩、泥页岩的发育, 这种断裂和地层结构分布特征, 控制了岭泉测线地球化学测项测值的分布。岭泉测线在 330 ~ 440 m 存在 C_{Rn} 和 C_{CO_2} 高值梯度带, 推测在此段可能有活动断裂通过。眉村测线和岭泉测线, 由于断裂两盘岩性和第四系覆盖层厚度差异, 断裂两侧地球化学测项测值存在明显的不同, 断裂控制着地层发育, 从而形成了跨断裂的地球化学测项测值梯度带。

安丘—莒县断裂在安丘测线控制着东盘泥质砂岩和泥岩、西盘砾岩和砂砾岩发育, 安丘测线范围内, 第四系地层发育, 地表均有第四系覆盖,

第四系的厚度约 1 ~ 2.5 m。在麦坡测线, 断裂东盘为砾岩和砂砾岩、西盘泥质砂岩和泥岩发育。在安丘和麦坡测线, 由于断裂两盘岩性差异, 并受断裂产状和活动性质控制, 导致断裂及其两侧地球化学测项测值存在明显差异。由于断裂带附近覆盖层较薄, 导致地球化学组分散失, 出现测值低值区。值得注意的是, 麦坡长测线在 390 ~ 440 m 存在 C_{Rn} , C_{CO_2} 和 C_{H_2} 高值梯度带, 推测在此段可能有活动断裂通过。

(4) 跨活动断层不同的地球化学测项分布存在一定的相关性, 有的测项之间为正相关关系, 但各测项间关系的规律性特征不明显。断层地球化学测项的相关性与断裂活动性质、活动强度、贯通性、应力作用和环境、断裂两侧基岩岩性组合、第四系地层结构和密实程度、第四系覆盖层厚度、地下水和地表水作用等多种因素相关。造成的原因和形成的机理较为复杂, 有待深入研究。

(5) 对 5 条流动地球化学观测测线的观测获得了较好的资料和成果。监测构造地球化学动态变化是判定地震带构造活动特征的重要手段。为了监测郯庐断裂带跨活动断裂地球化学组分变化特征, 为地震危险区地震跟踪预报提供资料, 需要进行同剖面、多手段的多期重复跟踪观测, 以多期重复观测的对比分析结果为依据。

本文观测结果对积累该测段土壤气浓度背景值、判定各种气体对断裂的指示作用有一定意义, 为该区段构造地球化学研究和地震危险区地震跟踪预报奠定了一定的基础。今后, 还需要再进一步积累数据, 使分析研究结果更为客观科学。

参考文献:

- 曹筠, 冉勇康, 许汉刚, 等. 2018. 郯庐断裂带安丘—莒县断裂南断 (郯城—淮河) 晚第四纪活动特征 [J]. 地震研究, 41 (2): 280 ~ 292.
- 晁洪太, 李家灵, 崔昭文, 等. 1994. 郯庐断裂带中段全新世活断层的几何结构与分段 [M] // 国家地震局地质研究所. 活动断裂研究 (3). 北京: 地震出版社, 180 ~ 190.
- 晁洪太, 李家灵, 崔昭文, 等. 1997a. 郯庐断裂带潍坊—嘉山段全新世活断层的活动方式与发震模式 [J]. 地震研究, 20 (2): 218 ~ 226.
- 晁洪太, 王铸, 李家灵, 等. 1997b. 山东省地震构造图 [M]. 济南: 山东省地图出版社.
- 陈国星, 高维明. 1988. 沂沭断裂带现代活动特征及其与强震构造的关系 [J]. 中国地震, 4 (3): 130 ~ 135.

- 杜建国, 宇文欣, 李圣强, 等. 1998. 八宝山断裂带逸出氡的地球化学特征及其映震效能[J]. 地震, 18(2): 155–162.
- 方仲景, 丁梦林, 向宏发, 等. 1986. 郯庐断裂带基本特征[J]. 科学通报, 31(1): 52–55.
- 高维明, 郑朗荪, 李家灵, 等. 1988. 1668 年山东郯城 8.5 级地震的发震构造[J]. 中国地震, 4(3): 9–15.
- 韩晓昆, 李营, 杜建国, 等. 2013. 夏垫断裂中南段土壤气体地球化学特征[J]. 物探与化探, 37(6): 976–982.
- 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 等. 1994a. 郯城活断层的分段及其大震危险性分析[J]. 地震地质, 16(2): 121–126.
- 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 等. 1994b. 1668 年郯城 8.5 级地震断层及其破裂机制[J]. 地震地质, 16(3): 229–237.
- 李家灵. 1989. 郯庐活断层[M]//IGCP 第 206 项中国工作组. 中国活断层图集. 北京: 地震出版社, 西安: 西安地图出版社.
- 刘菁华, 王祝文, 刘树田, 等. 2006. 城市活动断裂带的氡、汞气评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(23): 295–297.
- 刘峡, 傅容珊, 杨国华, 等. 2006. 用 GPS 资料研究华北地区形变场和构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 33–39.
- 邵永新, 杨绪连, 李一兵. 2007. 海河隐伏活断层探测中土壤气氡和气汞测量及其结果[J]. 地震地质, 29(3): 627–635.
- 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.
- 郯庐断裂带地质填图课题组. 2013. 郯庐断裂带地质填图(1:50000)说明书[M]. 北京: 地震出版社.
- 汪成民, 李宣瑚, 魏柏林. 1991b. 断层气测量在地震科学中的应用[M]. 北京: 地震出版社.
- 汪成民, 李宣瑚. 1991a. 中国断层气测量在地震科学研究中的应用现状[J]. 中国地震, 7(2): 19–30.
- 王博, 黄辅琼, 简春林. 2010. 嘉峪关断层带土壤气氡的影响因素及映震效能分析[J]. 中国地震, 26(4): 407–417.
- 王华林, 耿杰. 1996. 沂沭断裂带及其附近断裂的断层泥分形特征及其地震地质意义[J]. 中国地震, 12(3): 307–315.
- 王华林, 郑建常, 耿杰, 等. 2017. 郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 王华林. 1995. 1668 年郯城 8.5 级地震断裂的全新世滑动速率、古地震和强震复发周期[J]. 西北地震学报, 17(4): 1–12.
- 王志才, 贾荣光, 孙昭民, 等. 2005. 沂沭断裂带安丘—莒县断裂安丘—朱里段几何结构与活动特征[J]. 地震地质, 27(2): 212–220.
- 王志才, 王冬雷, 许洪泰, 等. 2017. 安丘莒县断裂活动断层分布图(1:50000)说明书[M]. 北京: 地震出版社.
- 魏光兴, 刁守中, 周翠英. 1993. 郯庐带地震活动性研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 张碧秀, 汤永安. 1988. 沂沭断裂带地壳结构特征[J]. 中国地震, 4(3): 16–22.
- 张慧, 苏鹤军, 李晨桦. 2013. 合作市隐伏断层控制性地球化学探测场地试验[J]. 地震工程学报, 35(3): 618–624.
- 张新基, 张慧, 苏鹤军, 等. 2005. 刘家堡活动断层土壤气氡、汞地球化学特征[J]. 地震, 25(4): 87–92.
- 周晓成, 郭文生, 杜建国, 等. 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, 279(1): 70–74.
- 周晓成, 王传远, 柴炽章, 等. 2011. 海原断裂带东南端土壤气体地球化学特征[J]. 地震地质, 33(1): 123–132.
- 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.
- Bernard P. 2001. From the search of ‘precursors’ to the research on ‘crustal transients’ [J]. Tectonophysics, 338(3): 225–232.
- Giammanco S, Gurrieri S, Valenza M, et al. 1998. Anomalous soil CO₂ degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna (Sicily Italy) [J]. Bulletin of Volcanology, 60(4): 252–259.
- King C, King B, Evans W C, et al. 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California [J]. Applied Geochemistry, 11(4): 497–510.
- 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 [J]. Appl Radiat Isot, 67(10): 1904–1911.
- Li C H, Su H J, Zhang H et al. 2016. Correlation between the spatial distribution of radon anomalies and fault activity in the northern margin of West Qinling Fault Zone, Central China [J]. J Radio and nuclear Chem, 308(2): 679–686.
- Li Y, Du J G, Wang X, et al. 2013. Spatial variations of soil gas geochemistry in the Tangshan area of northern China [J]. Terr Atmos Oceanic Sci, 24(3): 323–332.
- Lombardi S, Voltattorni N. 2010. Rn, He and CO₂ soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults [J]. Appl Geochem, 25(8): 1206–1220.
- Wakita H, Naramura Y, Notsu K, et al. 1980. Radon anomaly: A possible precursor of the 1978 Izu – Oshima Kinkai earthquake [J]. Science, 207(4433): 882–883.
- Walia V, Yang T F, Lin S J, et al. 2013. Temporal variation of soil gas compositions for earthquake surveillance in Taiwan [J]. Radiat Meas, 50: 154–159.
- Wiersberg T, Erzinger J. 2008. Origin and spatial distribution of gas at seismogenic depths of the San Andreas fault from drill – mud gas analysis [J]. Appl Geochem, 23(6): 1675–1690.
- 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 [J]. Appl Geochem, 24(8): 1369–1381.
- Yang T F, Walia V, Chyi L L, et al. 2005. Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan [J]. Radiat Meas, 40(2–6): 496–502.

Analysis of Tectonic Geochemical Observation Results of Yishu Fault Zone

GENG Jie, FU Jundong, KONG Xiangyang, MIAO Jie, GE Fugang

(*Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, Shandong, China*)

Abstract

In order to monitor the variation characteristics of geochemical components across active faults along the Tanlu fault zone, based on the selected five geochemical observation profiles of the Anqiu-Juxian fault in cross-Yishu fault zones, we processed and analyzed the distribution characteristics of soil gas concentration (Rn , CO_2 , H_2) and measured values along different lines of the Anqiu-Juxian fault. The preliminary analysis results show that the nature of fault activity, activity intensity, tectonic assemblage and fracture distribution control the distribution of geochemical survey items across active fault, the distribution of geochemical survey items is closely related to the stratigraphic structure, type and compactness on both sides of fault activity. There is a certain correlation between the distribution of geochemical values across active faults.

Keywords: geochemical item; distribution of measured values; active fault; Anqiu-Juxian fault