

王江,陈志,张帆,等. 2022. 基于土壤气体地球化学的雄安新区活动断裂空间展布及活动性探讨[J]. 地震研究, 45(2): 264–274, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0019.

Wang J, Chen Z, Zhang F, et al. 2022. Spatial distribution and movement of active faults in Xiong'an New Area: Insights from geochemical soil gas[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 264–274, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0019.

## 基于土壤气体地球化学的雄安新区活动断裂 空间展布及活动性探讨\*

王江<sup>1,2</sup>, 陈志<sup>3\*</sup>, 张帆<sup>1,2</sup>, 张志相<sup>1,2</sup>, 刘兆飞<sup>3</sup>, 何鸿毅<sup>3</sup>, 唐杰<sup>1,2</sup>, 丁志华<sup>1,2</sup>, 张素欣<sup>1,2</sup>

(1. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北 邢台 054000; 2. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021;  
3. 中国地震局地震预测研究所 地震预测重点实验室, 北京 100036)

**摘要:** 通过密集测点和跨断裂测线土壤气体地球化学野外流动观测, 获取了雄安新区土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度的区域背景场资料及跨断裂剖面分布特征。结合 Q-Q 图频率统计法和 Kriging 插值对雄安新区土壤气体地球化学背景进行综合分析发现, 雄安新区断裂来源土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 的浓度高值呈串珠状聚集于牛东断裂、牛东分支断裂1、牛东分支断裂2、容城断裂和徐水—大城断裂沿线, 表明这5条断裂可能是研究区较为活动的断裂带, 根据气体浓度高值优势方向及城市活断层探测结果, 进一步限定了各断裂的空间展布态势。各活动断裂不同段气体浓度相对强度的计算结果显示, 新区断裂活动性由东南向西北方向递减, 牛东分支断裂2的活动性最强, 其 Rn 浓度相对强度高于首都圈地区的18条主要活动断裂。由于观测范围的局限性, 各活动断裂不同段土壤气体浓度相对强度并无明显差异。

**关键词:** 雄安新区; 土壤气体; 地球化学; 气体浓度; 隐伏断裂; 断层活动性

**中图分类号:** P315.724 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)02-0264-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0019

## 0 引言

气体是地球内部最活跃的组分(Toutain, Baubron, 1999)。在压力、温度和浓度差异等因素的作用下, 地球内部的高温高压气体通常以扩散、对流等方式经由深大断裂源源不断地向地表运移(滕吉文, 2001), 并携带着地球内部物理、化学演变的重要信息(Chen et al, 2019a)。断裂带脱气及气体地球化学特征研究已被广泛应

用于地球深部物质组成、循环及能量交换等许多重大基础科学问题中(杜乐天, 2005)。研究表明, 通过断裂带释放的深部气体会在断裂带上覆土壤层中形成明显线状气体富集带, 研究人员可以观测到明显的气体 Rn、Hg、CO<sub>2</sub>、He、H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 等组分的高浓度异常(King et al, 1996; Ciotoli et al, 1998; Wakita et al, 1980; 王广才等, 2002; 周晓成等, 2007a, 2013), 其气体浓度可以高出区域(非断裂带)背景值的数倍甚至数十倍(王华林等, 1991; 杜建国等, 1998; Ampon-

\* 收稿日期: 2021-12-21.

基金项目: 河北省省级科技计划(20545401D)和中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(2020IEF0704、2021IEF0707)联合资助.

第一作者简介: 王江(1984-), 高级工程师, 主要从事地震地下流体监测与研究. E-mail: wang.jiang@msn.com.

✉ 通讯作者简介: 陈志(1983-), 研究员, 主要从事活动构造带流体地球化学特征及其成因机理研究.

E-mail: dugu\_830822@163.com.

sah *et al.*, 2008)。因此, 通过断裂带及其周边地区土壤气体地球化学密集探测, 可以得到断裂的可能空间展布形态 (汪成民, 李宣璐, 1991; Ciotoli *et al.*, 1999; Fu *et al.*, 2005; 张慧等, 2005)。

断层活动性的增强通常会增加断层附近地层的渗透性, 促进断裂带深部气体向地表逸散 (Lombardi, Voltattorn, 2010; Voltattorni *et al.*, 2014; 刘兆飞等, 2019)。因此, 断裂带土壤气体地球化学探测还可作为断层活动性分析评估的有效手段之一 (Fu *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2010)。目前, 依据断层土壤气体地球化学观测数据开展断层活动性分析的方法和指标包括测线最高值法 (张必敖等, 1987; 王华林等, 1991)、相对活动强度法 (测线最高值与正常平均值的比值) (姜大庸, 阎贤臣, 1990; 赵红梅, 1996; 孟广魁等, 1997; 刘菁华等, 2006; 邵永新, 2012)、异常衬度法 (测线异常平均值与正常平均值的比值) (丁政等, 1991; 王基华等, 1996; 邵永新等, 2007)、断层活动性相对指数法 (测线异常浓度最大值与异常区域外两侧浓度最小值的平均值的比值) (Seminsky, Bobrov, 2009; Demberel, 2013; Yang *et al.*, 2021) 及断层气体浓度强度法 (超出测线异常上限测值的平均值与异常上下限之间测值的平均值的比值) (Chen *et al.*, 2018) 等。这些方法在断层活动性分析研究评估工作中得到了广泛应用 (赵红梅, 1996; 王基华等, 1996; 邵永新等, 2007; Seminsky, Demberel, 2013; Yang *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019b; 杨江等, 2019)。

雄安新区位于历史上地震多发的华北地区, 该地区曾发生 1679 年三河平谷 8.5 级、1966 年邢台 6.6 级和 1976 年唐山 7.8 级等严重破坏性地震, 具有潜在的中强地震灾害风险。因此, 开展雄安新区活动断层探测和地震风险分析评估等工作, 具有非常重要的科学和现实意义。本文通过高密度土壤气体地球化学探测, 在获取雄安新区气体地球化学背景场的同时, 结合已有研究成果, 勾画新区主要活动断裂带的空间展布, 并通过土壤气体地球化学强度分析, 给出各断裂带活

动性的初步评估结果。

## 1 区域构造背景

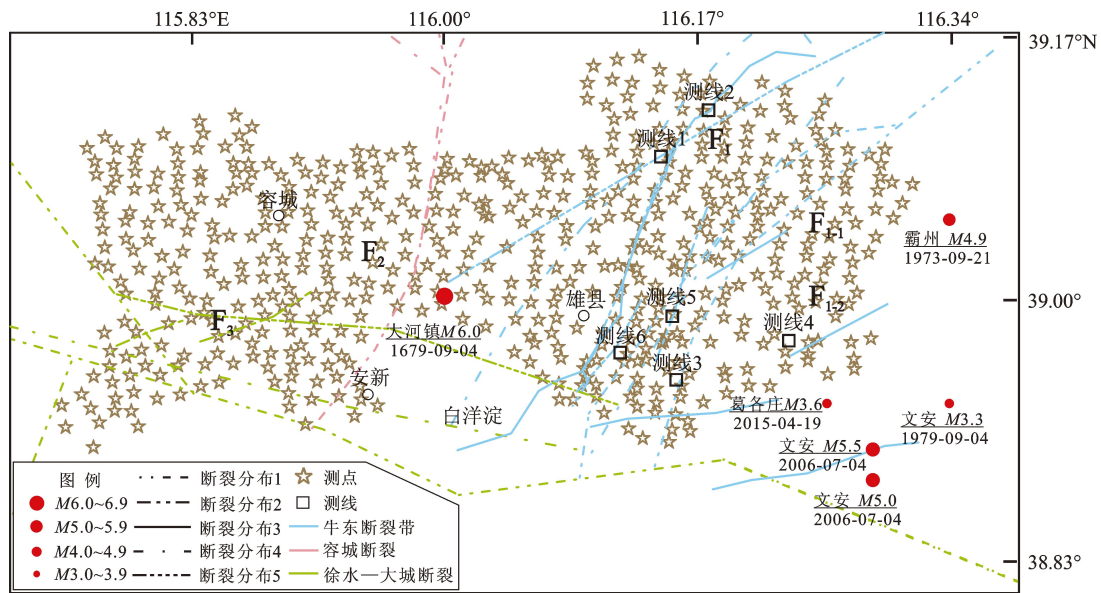
雄安新区下辖雄县、安新、容城, 位于 I 级构造单元渤海湾盆地中的 II 级构造单元冀中坳陷中西部 (孙冬胜等, 2004), 区内主要发育有两组隐伏断裂: NE 向的容城断裂、牛东断裂和 NW 向的徐水—大城断裂。其中, 容城断裂位于雄安新区中部, 为容城凸起的东部边界, 走向 NE, 倾向 SE, 上断点埋藏深度超过 350 m; 牛东断裂位于雄安新区东部, 为牛驼镇凸起与霸县凹陷的边界断裂, 规模较大, 长达 72 km, 走向 NNE—NE, 倾向 SE, 倾角  $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。牛东断层断面在平面上呈锯齿状, 为上陡下缓铲状, 上断点埋深超 150 m。徐水—大城断裂位于雄安新区西南, 为徐水凹陷的南部边界, 走向 NWW, 倾向 S, 倾角  $70^{\circ}$ , 形状为上陡下缓的铲状, 上断点埋藏深度超 200 m。容城断裂第四纪无活动, 最新活动时代为新近纪, 其滑动速率为 0.016 mm/a。牛东断裂继古近纪以来, 第四纪仍在活动。徐水—大城断裂第四纪早中更新世均有活动, 早更新世的平均滑动速率为 0.02 mm/a, 中更新世的平均滑动速率为 0.01 mm/a (商世杰等, 2019)。

## 2 测量方法

### 2.1 土壤气体测点布设

按照均匀布点原则, 河北省地震局在雄安新区行政范围内 (除起步区、高铁站等重大基础设施等未开放区域和河流水系外) 布设土壤气体观测网, 测网面积约 1 000 km<sup>2</sup>, 东西长约 50 km, 南北长约 22 km, 测点间距约 1 km, 研究区共布设测点 542 个 (图 1), 2020 年 8—9 月, 完成了整个测网的土壤气体地球化学野外流动观测工作。

在密集土壤气体测量的基础上, 垂直推断隐伏断裂布设了 6 条土壤气体地球化学测量剖面 (图 1)。测线 1、测线 2 垂直于牛东断裂, 其中,



注：断裂分布1修改自华北活动构造研究（Guo *et al.*, 2015）；断裂分布2修改自河北地震构造特征（彭远黔，孟立朋，2017）；断裂分布3修改自石油物理探测结果（何登发等，2018）；断裂分布4修改自航磁观测结果（于长春等，2017）；断裂分布5修改自中国地震构造图（徐锡伟等，2016b）

图1 雄安新区土壤气体地球化学观测点分布

Fig. 1 Distribution of the geochemical observation points for soil gas in Xiong'an New Area

测线1长1.2 km，测点12个；测线2长1 km，测点10个；测线3、4垂直于牛东分支断裂2，测线3长1.3 km，测点13个；测线4长0.6 km，测点6个；测线5、6垂直于牛东分支断裂1，测线5长1 km，测点10个；测线6长1.2 km，测点12个。2020年10月—11月，河北省地震局完成了6条土壤气体地球化学剖面63个观测点的野外流动观测。

## 2.2 土壤气体流动测量

土壤气体测量使用实心钢钎在测点处垂直地表土壤向下打孔，孔径0.03 m、深度0.8 m，然后将底部花孔的空心钎插入孔中，连接仪器气路后开始取样、测量（周晓成等，2007b；Li *et al.*, 2013；王江等，2017）。其中，Rn浓度测量使用RAD7型测氡仪，测量范围 $3.70 \times 10^{-3} \sim 740.00$  kBq/m<sup>3</sup>，采样测量频率为1次/5 min；CO<sub>2</sub>浓度测量使用GXH-3010型便携式红外二氧化碳分析仪，仪器误差为 $\pm 2\%$  F·S，分辨率为0.001%，测量范围为0~20%，采样测量频率为1次/s；Hg浓度测量采用RA-915+型塞曼效应汞分析仪，仪器标定误差为3%，检测限为0.3 ng/m<sup>3</sup>。

## 3 结果分析

### 3.1 土壤气体地球化学背景场结果

雄安新区土壤气体观测网内542个地球化学测点的观测统计结果见表1，由表可见，Rn浓度平均值为12.52 kBq/m<sup>3</sup>，变化范围为0.98~83.50 kBq/m<sup>3</sup>；CO<sub>2</sub>浓度平均值为2.83%，变化范围为0.23%~11.66%；Hg浓度平均值为5.9 ng/m<sup>3</sup>，变化范围为1.0~43.0 ng/m<sup>3</sup>。

土壤气体Rn的来源包括空气、地表岩石、土壤中的微量放射性铀元素的衰变，以及地壳深部在压力作用下沿断裂、裂隙运移至地表的气体

表1 雄安新区542个土壤气体地球化学测点观测统计结果

Tab. 1 Statistics of 542 geochemical measurements of soil gas in Xiong'an New Area

气体	平均值	标准差	最小值	最大值
Rn/(kBq·m <sup>-3</sup> )	12.52	11.69	0.98	83.50
CO <sub>2</sub> (%)	2.83	2.28	0.23	11.66
Hg/(ng·m <sup>-3</sup> )	5.9	4.5	1.0	43.0

(Etioppe, Martinelli, 2002)。CO<sub>2</sub> 主要来源包括气压作用下的空气混入气体、有机物分解和生物活动释放的土壤吸附气体、地球深部脱气、碳酸盐岩变质作用等 (Ciotoli *et al.*, 2007)。Hg 有 2 种主要来源：地壳深部或地幔、含汞硫化物矿床 (程鉴基, 1997)。一般情况下, 土壤气体浓度除了受断裂构造活动、地质作用及地震活动影响外, 还受到土壤类型、气象条件的制约 (韩晓昆等, 2013), 断裂、裂隙上方的土壤气体浓度高于非断裂上方的土壤气体 (周晓成等, 2011)。本文根据土壤气体分布数据概率统计法 (Sinclair, 1974), 分析了雄安新区 542 个土壤气体测点 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度 Q-Q 图中多个趋势转折的不同气体来源临界点 (Ciotoli *et al.*, 2014)。综合研究区地表第四纪沉积物土壤类型相同、测点布设条件一致及野外测量结果, 笔者认为研究区土壤气体可能存在的主要来源为沿断裂运移的深部气体与地表浅部土壤中的空气, 其中 Rn 临界点阈值分别为 1.20 和 31.80 kBq/m<sup>3</sup>, CO<sub>2</sub> 临界点阈值分别为 0.28% 和 9.45%, Hg 临界点阈值为 20.0 ng/m<sup>3</sup> (图 2)。

### 3.2 土壤气体地球化学剖面观测结果

雄安新区内 6 条土壤气体地球化学测量剖面中 Rn 浓度变化范围为 0.81 ~ 52.09 kBq/m<sup>3</sup>、CO<sub>2</sub> 浓度变化范围为 0.13% ~ 3.95%、Hg 浓度变化范围为 2.0 ~ 16.0 ng/m<sup>3</sup> (表 2)。

由图 3 可见, 测线 1 土壤气体 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度高峰位于测线两端, Rn 在测线中部还存在单个高峰, Hg、CO<sub>2</sub> 浓度中部较低 (图 3a); 测线 2 土壤气体 Rn 和 Hg 浓度主峰位于测线东侧, Rn 浓度在测线东侧出现高值, CO<sub>2</sub> 浓度自西向东呈上升趋势 (图 3b); 测线 3 土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度在测线南段形态一致 (图 3c); 测线 4 土壤气体 Rn 浓度呈双峰形态, Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度在南端附近分别出现高值 (图 3d); 测线 5 土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度曲线形态相似, 呈双峰形态 (图 3e); 测线 6 土壤气体 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度曲线形态相似, 呈多峰形态, 峰值集中于中段位置 (图 3f)。

综上所述, 雄安新区垂直推测断裂带的 6 条土壤气体浓度剖面的 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度曲线变化趋势基本重合, 说明 6 条土壤气体测线气体运移路径

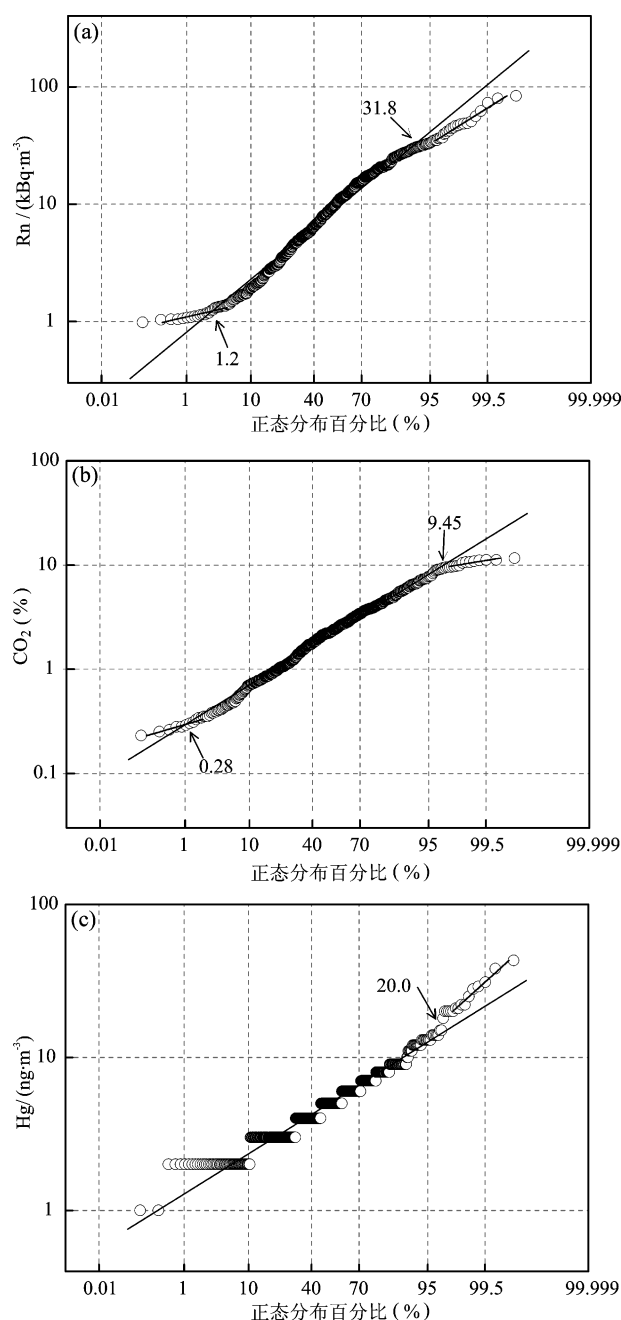


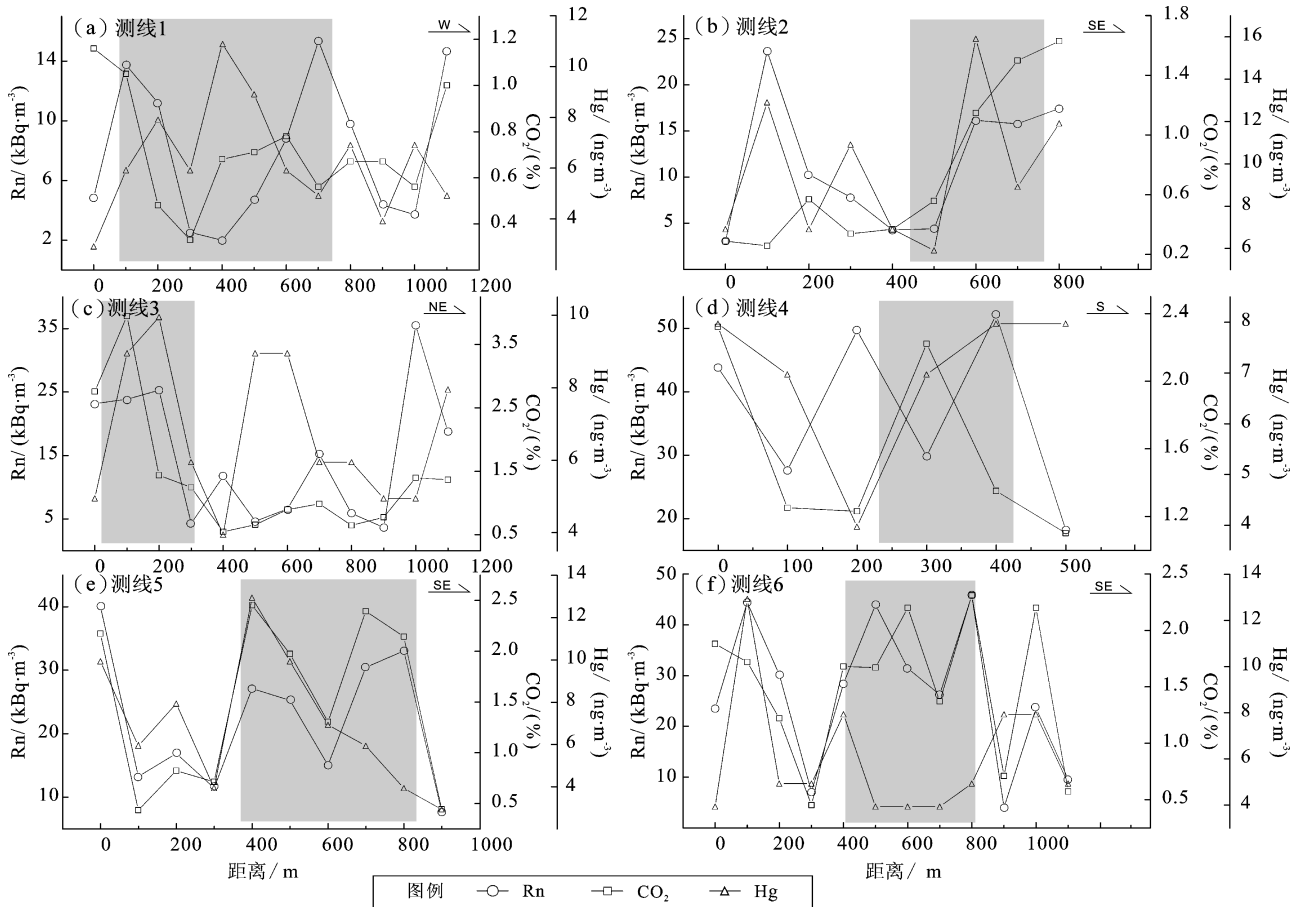
图 2 雄安新区土壤气体浓度 Q-Q 图

Fig. 2 Quantile - quantile plot of soil gas concentration in Xiong'an New Area

相似, 均位于断裂带内部。6 条土壤气体测线 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度曲线均呈多峰形态特征, 可能是深部气体经由新区隐伏花状构造正断层向上覆较厚沉积物发散式逸散所致 (何登发等, 2017)。另外, 位于雄县东南区域的测线 3、测线 4、测线 5、测线 6 的 Rn 和 Hg 浓度均值高于雄安新区背景值, 据此初步推断雄县东南区域断层活动性较强。

表 2 雄安新区 6 条土壤气体测量剖面 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度及相对强度Tab. 2 Statistics of the concentration of soil gas Rn, CO<sub>2</sub>, Hg and their relative strength from 6 survey profiles in Xiong'an New Area

土壤气体	断裂	测线	平均值	标准差	最大值	区域背景值	浓度相对强度
Rn/(kBq·m <sup>-3</sup> )	F <sub>1</sub>	1	7.97	4.89	15.33	12.52	1.22
		2	11.45	7.17	23.67	12.52	1.89
		3	14.89	10.45	35.5	12.52	2.84
	F <sub>3</sub>	4	36.85	13.61	52.09	12.52	4.16
		5	21.98	10.65	40.02	12.52	3.2
	F <sub>2</sub>	6	26.5	14.23	45.8	12.52	3.66
CO <sub>2</sub> (%)	F <sub>1</sub>	1	0.72	0.24	1.16	2.83	0.41
		2	0.74	0.54	1.63	2.83	0.58
		3	1.39	1	3.95	2.83	1.4
	F <sub>3</sub>	4	1.58	0.54	2.32	2.83	0.82
		5	1.48	0.83	2.45	2.83	0.87
	F <sub>2</sub>	6	1.5	0.65	2.31	2.83	0.82
Hg/(ng·m <sup>-3</sup> )	F <sub>1</sub>	1	6.4	2.2	11	5.9	1.86
		2	9.8	3.4	16	5.9	2.71
		3	6.8	2	10	5.9	1.69
	F <sub>3</sub>	4	7	1.6	8	5.9	1.36
		5	7.1	3.2	13	5.9	2.2
	F <sub>2</sub>	6	6.1	2.7	13	5.9	2.2

图 3 雄安新区 6 条土壤气体测线 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度分布Fig. 3 Distribution of the concentration of soil gas Rn, CO<sub>2</sub>, and Hg in 6 survey profiles in Xiong'an New Area

## 4 讨论

### 4.1 雄安新区活动断裂带空间展布分析

笔者使用 Kriging 方法对雄安新区内 542 个土壤气体测点的 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度测值进行 Grid 处理和插值,并绘制了气体浓度等值线图(图4)。为突出不同气体来源的空间分布特征,按照各土壤气体组分浓度 Q-Q 图统计结果设置浓度等值线图的色标,分别将断裂来源 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 气体的下限值(31.80 kBq/m<sup>3</sup>、9.45% 和 20.0 ng/m<sup>3</sup>)和空气来源为主的 Rn 和 CO<sub>2</sub> 气体的上限值(1.20 kBq/m<sup>3</sup> 和 0.28%)作为色差变化明显处的分界限。

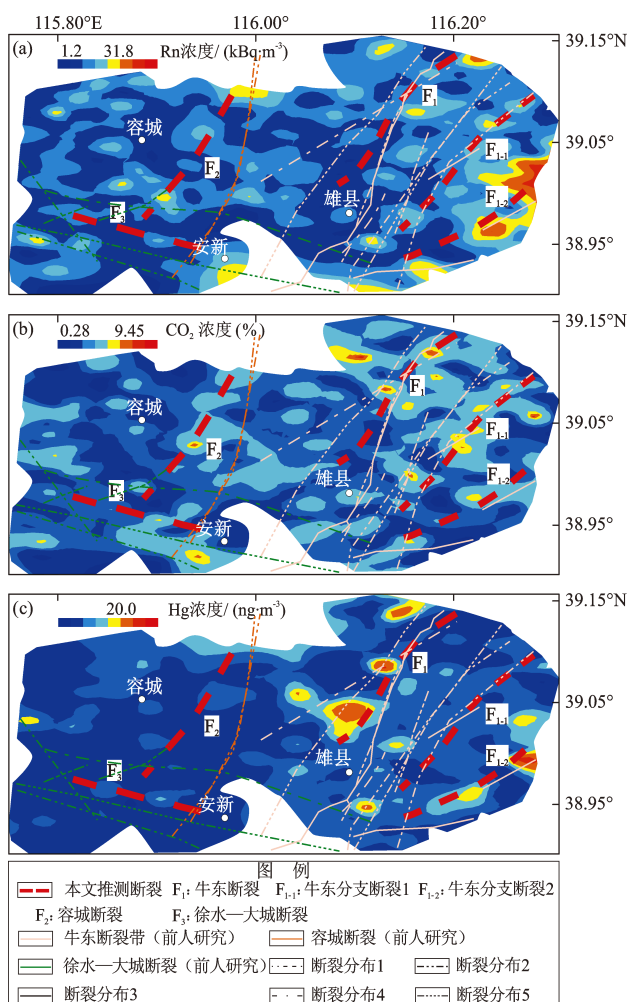


图4 雄安新区土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度等值线图(断裂分布说明同图1)

Fig. 4 Contour plot of the concentration of soil gas Rn, CO<sub>2</sub> and Hg in Xiongan New Area (the illustration of fault distribution is the same as Fig. 1)

雄安新区土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度空间分布一致性较高,其高浓度值主要呈串珠状聚集于雄安新区的牛东断裂、牛东分支断裂1、牛东分支断裂2、容城断裂和徐水—大城断裂沿线。这表明这5条断裂为雄安新区的主要活动断裂带。而且,各气体组分浓度高值在新区东部区域的牛东断裂、牛东分支断裂1和牛东分支断裂2的聚集特征较为显著,尤其在雄县东部靠近霸州、文安地区存在NE走向的土壤气体浓度最高值条带(图4),这进一步说明,新区东部区域的牛东断裂、牛东分支断裂1和牛东分支断裂2可能具有较高的破碎程度。然而,位于新区西部的容城断裂和徐水—大城断裂,仅隐约可见土壤气体浓度高值沿断裂带走向聚集的现象,可能表明这2条断裂相对较低的破碎程度。

尽管牛东断裂及其分支断裂土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度高值的空间展布态势与其它断裂的走向基本一致,但是高值分布也存在小幅偏离推测断裂体系的现象,如牛东断裂的 Rn 和 Hg 浓度(图4a、c),牛东分支断裂1的 Hg 浓度(图4c)及牛东分支断裂2的 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度(图4a)。上述3条断裂位置与根据地震剖面(何登发等, 2018; 彭远黔, 孟立朋, 2017)、电磁航测(于长春等, 2017)等地球物理手段及地质构造(Guo *et al*, 2015; 徐锡伟等, 2016)背景资料研究得出的断裂位置存在不同程度的偏移,这种现象可能是研究技术手段不同所致。地球物理探测及地质调查主要研究区域深部的大型构造特征及演化,其空间上的断裂位置为上断点(切层线)在地表的垂向投影。而土壤气体地球化学技术手段采集并分析地表土壤中的气体,直接反映采样点附近土壤脱气强弱,受作为气体运移通道的深部断裂及近地表浅层裂隙控制。因此,基于土壤气体地球化学推测的断裂位置在水平空间上表现为大致沿深部断裂走向的带状分布。

李弘等(2017)的研究表明雄县附近存在明显磁力高值异常,且与区域重力异常结果高度吻合,指示雄县附近可能存在高磁性岩体。区域石油勘探资料揭示牛东断裂是一条贯穿了古近系(T<sub>g</sub>)和新近系(T<sub>2</sub>)的深大隐伏断裂,且为多条走向一致的分支断裂组合而成的断裂体系(何登

发等, 2018)。本文观测结果进一步显示, 新区东部的牛东断裂、牛东分支断裂 1 和牛东分支断裂 2 附近可能均发育多条分支隐伏断裂, 3 条断裂带的宽度约为 500 ~ 1 200 m。

#### 4.2 雄安新区活动断裂带的活动性研讨

对比中国大陆部分主要活动断裂带, 雄安新区具有较高的土壤气体浓度特征, 土壤气体  $R_n$ 、 $CO_2$  和  $Hg$  浓度最高值 ( $83.50 \text{ kBq/m}^3$ 、 $11.66\%$  和  $43.0 \text{ ng/m}^3$ ) 均明显高于首都圈地区 18 条主要活动断裂带的 35 条剖面 ( $45.00 \text{ kBq/m}^3$ 、 $2.18\%$  和  $24.9 \text{ ng/m}^3$ , 王喜龙等, 2017)。雄安新区土壤气体  $R_n$  浓度最高值高于唐山老震区土壤气体  $R_n$  浓度最高值 ( $38.47 \text{ kBq/m}^3$ , Li *et al.*, 2013)、延怀盆地土壤气体  $R_n$  浓度最高值 ( $57.81 \text{ kBq/m}^3$ , 李营等, 2009)、蓟县断层土壤气体  $R_n$  浓度最高值 ( $58.65 \text{ kBq/m}^3$ , 周志华等, 2014)、夏垫断裂土壤气体  $R_n$  浓度最高值 ( $63.38 \text{ kBq/m}^3$ , 韩晓昆等, 2013) 和海原断裂土壤气体  $R_n$  浓度最高值 ( $38.30 \text{ kBq/m}^3$ , 周晓成等, 2011)。以上对比分析初步显示了雄安新区主要活动断裂的较强活动性特征。

雄安新区土壤气体浓度等值线空间展布已初步揭示了牛东断裂、牛东分支断裂 1 和牛东分支断裂 2 的较强断层活动性, 为进一步研讨这 3 条断裂

及其不同段的断层活动性, 本文布设了垂直推测断裂的土壤气体剖面, 由于雄安新区建设工地较多, 断层气体长剖面布设受到限制, 导致各断层气体测线布线长度及测点数难以统一, 且测线测点可能仍然主要分布于断裂带内部。另外, 除了各活动断裂带  $R_n$ 、 $CO_2$  和  $Hg$  浓度高值外, 整个研究区土壤气体  $R_n$ 、 $CO_2$  和  $Hg$  浓度背景较为均一 (图 4), 这可能与研究区范围较小, 且地层岩性较单一有关。鉴于以上情况, 本文采用了断层气体浓度相对强度法 (测线最高值与新区浓度平均值的比值) 对牛东断裂、牛东分支断裂 1 和牛东分支断裂 2 及其不同段的断层活动性进行分析研究。

浓度相对强度计算结果 (表 2) 显示, 新区牛东分支断裂 1 和牛东分支断裂 2 的土壤气体测线 3 ~ 6 的  $R_n$  和  $CO_2$  浓度相对强度较高, 其中  $CO_2$  和  $R_n$  浓度相对强度最高值 (1.40 和 4.16) 分别出现在牛东分支断裂 2 上的测线 3 和测线 4 上。雄安新区构造地质研究结果表明, 新近纪以来新区大部分区域处于较为稳定状态, 而其东南及东部邻霸县凹陷等地区具有较明显的活动性 (何登发等, 2018); 地震探测结果 (图 5) 发现位于新区西北角的牛东断裂深部构造稳定, 而其东南方向的分支断裂活动时间较新, 且浅部次级断裂的应力集中程度较高 (范玉璐等, 2020)。

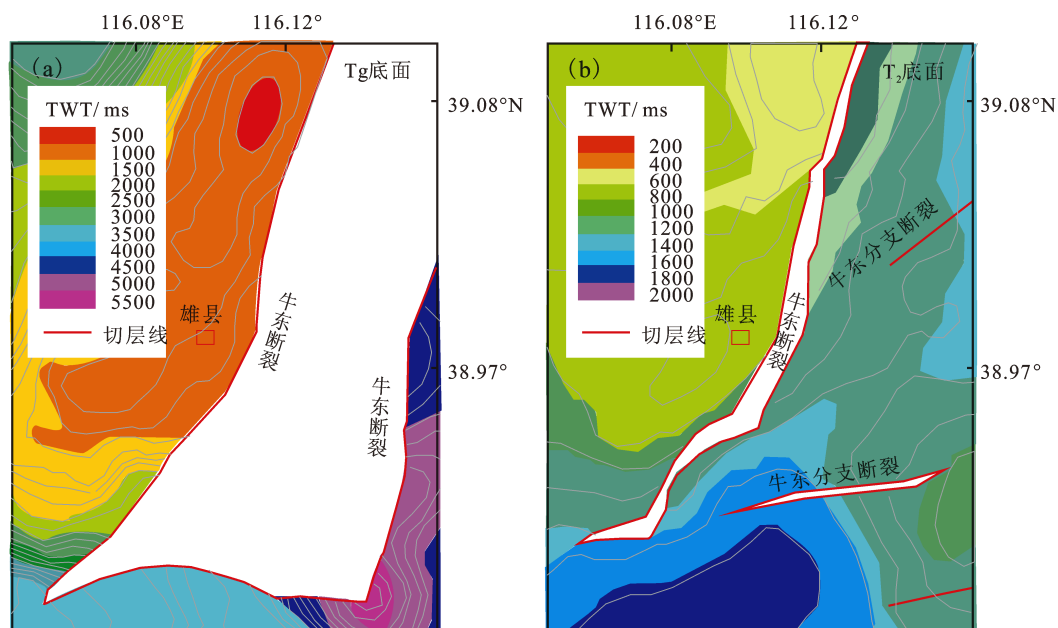


图 5 牛东断裂附近  $T_g$  和  $T_2$  底面构造图 (据何登发等, 2018)

Fig. 5 Structures at the bottom of the strata  $T_g$  and  $T_2$  near the NIUDong Fault (according to He *et al.*, 2018)

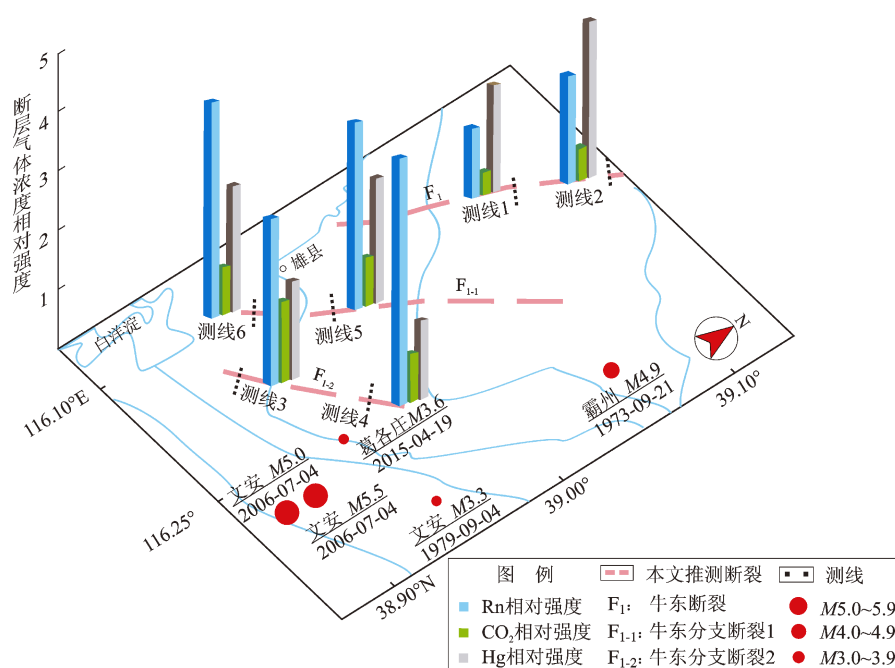


图6 雄安新区断层土壤气体浓度测线及相对强度

Fig. 6 Survey profiles of the soil gas concentration and its relative strength in Xiongan New Area

自有历史记载以来，雄县附近共发生3.0级以上地震5次，其中4次地震发生于新区东南角，且仅有的2次5.0级以上地震发生在新区东南（徐锡伟等，2016）。因此，雄安新区3条断裂带土壤气体浓度相对强度空间分布特征，与区域构造、地球物理和地震学的观测研究成果共同表明，雄安新区断裂活动性由东南向西北方向递减，即位于新区东南的牛东分支断裂2 > 牛东分支断裂1 > 新区西北的牛东断裂（图6）。而且，对比首都圈地区的19条活动断裂带，牛东分支断裂1和牛东分支断裂2的Rn浓度相对强度仅略低于唐山断裂带丰南段的Rn浓度相对强度（3.9），而高于其它18条（Chen *et al.*, 2018），这表明雄安新区的牛东分支断裂1与牛东分支断裂2可能为首都圈区域内活动性较高的断裂带，需要进一步对其活动性开展跟踪研究。

对雄安新区牛东断裂、牛东分支断裂1和牛东分支断裂2不同段的土壤气体Rn、CO<sub>2</sub>和Hg浓度相对强度对比分析发现，牛东分支断裂1的测线5和测线6的土壤气体Rn、CO<sub>2</sub>和Hg浓度相对强度相似；虽然牛东分支断裂2的测线3的土壤气体CO<sub>2</sub>浓度相对强度高于测线4，但测线4的土壤气体Rn浓度相对强度高于测线3；牛东断裂测线2

的土壤气体Rn、CO<sub>2</sub>和Hg浓度相对强度均高于测线1，但差异较小，且2条测线土壤气体浓度相对强度均不高（图6）。因此，据本文观测结果，新区3条断裂带不同段的断层活动性可能并无明显差异。但是，受观测点覆盖空间范围的局限，本文对3条断裂不同段活动性的对比研究结果并不能完全反映3条断裂活动性的分段特征，未来需进一步扩大土壤气体地球化学观测网的空间范围，更客观地揭示雄安新区主要活动断裂的活动分段特征。

## 5 结论

本文采用土壤气体野外流动探测技术系统地调查分析了雄安新区土壤气体地球化学特征，并基于观测数据和已有研究成果开展了分析和研讨，主要得到以下结论：

（1）通过高密度土壤气体地球化学野外流动观测，获取了雄安新区土壤气体地球化学背景场，土壤气体Rn、CO<sub>2</sub>和Hg浓度范围分别为0.98 ~ 83.50 kBq/m<sup>3</sup>、0.23% ~ 11.66%和1.0 ~ 43.0 ng/m<sup>3</sup>，均值分别为12.52 kBq/m<sup>3</sup>、2.83%和5.9 ng/m<sup>3</sup>。

（2）雄安新区542个土壤气体Rn、CO<sub>2</sub>和Hg浓度测值Q-Q图频率统计分析结果显示，土壤气

体 Rn 和 CO<sub>2</sub> 可能均存在 3 种主要来源, 而 Hg 可能只存在 2 种主要来源。新区断裂来源土壤气体 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度高值呈串珠状聚集于牛东断裂、牛东分支断裂 1、牛东分支断裂 2、容城断裂和徐水—大城断裂沿线, 表明该 5 条断裂带可能是新区的主要活动断裂带, 并根据气体浓度高值优势方向及城市活断层探测结果, 进一步勾画了各断裂带的空间展布态势。

(3) 雄安新区 6 条土壤气体测线的 Rn、CO<sub>2</sub> 和 Hg 浓度曲线变化趋势基本重合, 且均呈多峰形态特征, 可能是深部气体经由新区隐伏花状构造正断层向上覆较厚沉积物发散式逸散所致。土壤气体测线浓度相对强度的计算结果表明, 新区主要活动断裂活动性由东南向西北方向递减。其中, 位于新区东南的牛东分支断裂 2 的活动性最强, 与首都圈地区 18 条活动断裂带 Rn 浓度强度的对比分析揭示, 雄安地区的牛东分支断裂 1 与牛东分支断裂 2 可能是首都圈区域内活动性较高的断裂带。

(4) 受观测点覆盖空间范围的局限, 新区东部牛东断裂、牛东分支断裂 1 和牛东分支断裂 2 不同段土壤气体测线气体浓度相对强度结果并无明显差异, 表明该区域内各断裂的活动性分段性不强, 但是并不能完全代表此 3 条断裂带活动性的分段特征。

## 参考文献:

程鉴基. 1997. 汞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.

丁政, 谢瑞征, 张大其, 等. 1991. 用地球化学方法对郯庐断裂带江苏段隐伏断裂的测量研究[J]. 地震学刊, (4): 32-38.

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.

杜乐天. 2005. 地球排气作用的重大意义及研究进展[J]. 地质论评, 51(2): 174-180.

范玉璐, 谭成轩, 张鹏, 等. 2020. 雄安新区现今地应力环境及其对构造稳定性影响研究[J]. 地球学报, 41(4): 481-491.

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.

何登发, 崔永谦, 张煜颖, 等. 2017. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型[J]. 岩石学报, 33(4): 1338-1356.

何登发, 单帅强, 张煜颖, 等. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. 中国科学: 地球科学, 48(9): 1207-1222.

姜大庸, 阎贤臣. 1990. 海原活动断裂流体地球化学场初探[J]. 地震地质, 12(1): 63-68.

李德生. 1980a. 渤海湾含油气盆地的地质和构造特征[J]. 石油学

报, (1): 6-20.

李德生. 1980b. 渤海湾及沿岸盆地的构造格局[J]. 海洋学报(中文版), 2(4): 93-101.

李弘, 俞建宝, 吕慧, 等. 2017. 雄县地热田重磁响应及控热构造特征研究[J]. 物探与化探, 41(2): 242-248.

李营, 杜建国, 王富宽, 等. 2009. 延怀盆地土壤气体地球化学特征[J]. 地震学报, 31(1): 82-91.

刘菁华, 王祝文, 刘树田, 等. 2006. 城市活动断裂带的土壤氡、汞气评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), (2): 295-297.

刘兆飞, 李营, 陈志, 等. 2019. 吉林泰顺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[J]. 地震学报, 41(5): 613-632.

孟广魁, 何开明, 班铁, 等. 1997. 氡、汞测量用于断裂活动性和分段的研究[J]. 中国地震, 13(1): 45-50.

彭远黔, 孟立朋. 2017. 河北地震构造特征[M]. 石家庄: 河北人民出版社.

商世杰, 丰成君, 谭成轩, 等. 2019. 雄安新区附近主要隐伏断裂第四纪活动性研究[J]. 地球学报, 40(6): 836-846.

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汞测量及其结果[J]. 地震地质, 29(3): 627-636.

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.

孙冬胜, 刘池阳, 杨明慧, 等. 2004. 渤海湾盆地冀中坳陷中区中新代复合伸展构造[J]. 地质论评, 50(5): 484-491.

滕吉文. 2001. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害[J]. 地学前缘, 8(3): 1-8.

汪成民, 李宣珊. 1991. 我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): 21-32.

王广才, 王基华, 刘成龙, 等. 2002. 福州市隐伏断层地球化学试验探测及研究[J]. 地震地质, 24(4): 593-600.

王华林, 陈锦太, 耿杰, 等. 1991. 胜利油田及邻近地区断裂活动性研究[J]. 西北地震学报, 13(1): 78-84.

王基华, 王亮, 孙凤民, 等. 1996. 隐伏断层活动性分段的汞地球化学标志初探[J]. 地震地质, 18(4): 409-412.

王江, 李营, 陈志. 2017. 口泉断裂断层气地球化学变化特征及断层活动性[J]. 地震, 37(1): 39-51.

王喜龙, 李营, 杜建国, 等. 2017. 首都圈地区土壤气 Rn、Hg、CO<sub>2</sub> 地球化学特征及其成因[J]. 地震学报, 39(1): 85-101.

徐锡伟, 郭婷婷, 刘少卓, 等. 2016a. 活动断层避让相关问题的讨论[J]. 地震地质, 38(3): 477-502.

徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平. 2016b. 中国及邻近地区地震构造图(GB 18306—2015 中国地震动参数区划图编制基础图件)[M]. 北京: 中国地图出版社.

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<sub>2</sub> 浓度特征[J]. 地震, 39(3): 61-70.

于长春, 乔日新, 张迪硕. 2017. 雄安新区航磁推断的三维基底构造特征[J]. 物探与化探, 41(3): 385-391.

张必放, 何跟巧, 廖元模, 等. 1987. 阿尔金断裂东北段断层气体的初步研究[J]. 西北地震学报, 9(2): 26-32.

张慧, 张新基, 苏鹤军, 等. 2005. 金城关活动断裂带土壤气氡、汞地球化学特征[J]. 西北地震学报, 27(2): 150-153.

赵红梅. 1996. 广东平冈断裂断层气测试结果分析[J]. 地震地质, 18(4): 413-416.

周晓成, 柴焯章, 雷启云, 等. 2013. 银川隐伏断层带土壤气中 H<sub>2</sub> 的

- 地球化学特征[J]. 物探与化探, 33(1): 147–149.
- 周晓成, 杜建国, 王传远, 等. 2007a. 西藏拉萨市土壤中氦、汞环境地球化学特征[J]. 环境科学, 38(3): 659–663.
- 周晓成, 郭文生, 杜建国, 等. 2007b. 呼和浩特地区隐伏断层土壤气氦、汞地球化学特征[J]. 地震, 27(1): 70–76.
- 周晓成, 王传远, 柴焱章, 等. 2011. 海原断裂带东南段土壤气体地球化学特征[J]. 地震地质, 33(1): 123–132.
- 周志华, 赵烽帆, 李营, 等. 2014. 首都圈土壤中氦环境地球化学特征[J]. 生态学杂志, 33(7): 1729–1733.
- Amponsah P, Banoeng – Yakubu B, Andam A, *et al.* 2008. Soil radon concentration along with fault systems in parts of southeastern Ghana [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 51(1): 39–48.
- Chen Z, Li Y, Liu Z, *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: 1–12.
- Chen Z, Li Y, Liu Z, *et al.* 2019a. Evidence of multiple sources of soil gas in the Tangshan Fault Zone, North China [J]. *Geofluids*, (3): 1–12.
- Chen Z, Li Y, Liu Z, *et al.* 2019b. CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from mud volcanoes on the southern margin of the Junggar Tasin, Nw China: origin, output, and relation to regional tectonics [J]. *Journal of Geophysical Research – solid Earth*, 124: 1–15.
- Ciotoli G, Bigi S, Tartarello C, *et al.* 2014. Soil gas distribution in the main coseismic surface rupture zone of 1980,  $M_s = 6.9$ , Irpinia earthquake (Southern Italy) [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3): 2440–2461.
- Ciotoli G, Etiope 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): 321–332.
- 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]. *Journal of Geophysical Research – solid Earth*, 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]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112 (112): 2637–2655.
- Etiope G, Martinelli G. 2002. Migration of carrier and trace gases in the geosphere; an overview [J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 129(3–4): 185–204.
- Fu C C, Yangt F, Du J, *et al.* 2008. Variations of helium and radon concentrations in soil gases from an active fault zone in Southern Taiwan [J]. *Radiation Measurements*, 43(1): S348–S352.
- Fu C C, Yangt 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(5): 427–439.
- Guo L, Li S, Suo Y, *et al.* 2015. Experimental study and active tectonics on the Zhangjiakou – Penglai Fault zone across North China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114(1): 18–27.
- King C Y, King B S, Evansw C, *et al.* 1996. Spatial radon anomalies on active faults in California [J]. *Applied Geochemistry*, 11(4): 497–510.
- Li Y, Du J, Wang X, *et al.* 2013. Spatial variations of soil gas geochemistry in the Tangshan area of Northern China [J]. *Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences*, 24(3): 323–332.
- Lombardi S, Voltattorni N. 2010. Rn, He and CO<sub>2</sub> soil gas geochemistry for the study of active and inactive faults [J]. *Applied Geochemistry*, 25(8): 1206–1220.
- Seminsky K Z, Bobrov A A. 2009. Radon activity of faults (Western Baikal and Southern Angara Areas) [J]. *Russian Geology & Geophysics*, 50(8): 682–692.
- Seminsky K Z, Demberel S. 2013. The first estimations of soil – radon activity near faults in Central Mongolia [J]. *Radiation Measurements*, 49(1): 19–34.
- Sinclair A J. 1974. Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 3(2): 129–149.
- Toutain J P, Baubron J C. 1999. Gas geochemistry and seismotectonics: a review [J]. *Tectonophysics*, 304(1): 1–27.
- Voltattorni N, Cinti D, Pizzino L, *et al.* 2014. Statistical approach for the geochemical signature of two active normal faults in the Western Corinth Gulf Rift (Greece) [J]. *Applied Geochemistry*, 51: 86–100.
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, *et al.* 1980. Hydrogen release: new indicator of fault activity [J]. *Science*, 210(4466): 188–190.
- Yang Y, Li Y, Guan Z, *et al.* 2017. 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.
- Yang Y, Li Y, Li Y, *et al.* 2021. Present – day activity of the Anninghe fault and Zemuhe Fault, Southeastern Tibetan Plateau, derived from soil gas CO<sub>2</sub> emissions and locking degree [J]. *Earth, Planetary, and Space Sciences*, 8(10): 1029–1050.
- Zhou X, Du J, Chen Z, *et al.* 2010. Geochemistry of soil gas in the seismic fault zone produced by the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake, Southwestern China [J]. *Geochemical Transactions*, 11(1): 68–82.

## Spatial Distribution and Movement of Active Faults in Xiong'an New Area: Insights from Geochemical Soil Gas

WANG Jiang<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi<sup>3</sup>, ZHANG Fan<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhixiang<sup>1,2</sup>, LIU Zhaofei<sup>3</sup>,  
HE Hongyi<sup>3</sup>, TANG Jie<sup>1,2</sup>, DING Zhihua<sup>1,2</sup>, ZHANG Suxin<sup>1,2</sup>

(1. Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 054000, Hebei, China)

(2. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

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

### Abstract

The geochemical observation of the soil gas in the fault zone is one of the most important means of detecting buried faults and analyzing fault activity. The spatial distribution of the concentration of soil gases Rn, CO<sub>2</sub>, and Hg are obtained by field measurement at 542 equispaced points and on 6 profiles across 5 active faults in Xiong'an New Area. Clustered distribution of the soil gas Rn, CO<sub>2</sub>, and Hg with high concentration along the Niudong fault, Branch 1 of the Niudong fault, Branch 2 of the Niudong fault, Rongcheng fault and Xushui – dacheng fault are presented in the geochemical background using Kriging interpolation. This indicates that the five faults are more active. The fault outlines are further delineated according to the distribution of the soil gas concentration and the results from urban active fault detection. In addition, the relative intensity of the soil gas concentration in the 5 active faults decreases from the southeast to the northwest in Xiong'an New Area, suggesting the weakening of faults' activity from the southeast to the northwest, and the Niudong fault in the southeast of Xiong'an New Area could be the most active; the relative – intensity value of Rn concentration in this fault is higher than those in the other 18 major active faults in the Capital area. There is little difference between the movement of the sections of the 5 active faults in Xiong'an New Area.

**Keywords:** Xiong'an New Area; soil gas; geochemistry; gas concentration; buried fault; fault activity