

李静,周贺,陈志,等. 2023. 北京西部活动断裂 CO<sub>2</sub> 与 Rn 脱气特征及其环境影响[J]. 地震研究, 46(1): 49–57, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0011.

Li J, Zhou H, Chen Z, et al. 2023. Degassing characteristics of CO<sub>2</sub> and Rn from active fault in western Beijing and their environmental impact[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(1): 49–57, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0011.

# 北京西部活动断裂 CO<sub>2</sub> 与 Rn 脱气特征及其环境影响\*

李 静<sup>1,4</sup>, 周 贺<sup>2♣</sup>, 陈 志<sup>3</sup>, 陆丽娜<sup>1,4</sup>, 杜建国<sup>3</sup>

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 中国石油冀东油田公司, 河北 唐山 063000;  
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;  
4. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 廊坊 065201)

**摘要:** 利用跨断层土壤气测量方法, 连续两年对北京西部黄庄—高丽营断裂、八宝山断裂和南口山前断裂 CO<sub>2</sub> 与 Rn 的脱气浓度与通量进行了测量, 分析了研究区断裂带脱气特征及产生的环境影响。结果表明: 黄庄—高丽营断裂北段的西王路测区土壤气浓度平均值及  $KQ$  值最大, 反映了该断裂北段构造活动性较强; 研究区 3 条断裂的土壤气浓度均值及构造活动性呈现东高西低的特征, 与首都圈土壤气地球化学背景场特征一致。3 条断裂脱气对大气 CO<sub>2</sub> 的年贡献量约为  $0.45 \times 10^6$  t。西王路测区土壤气 Rn 平均浓度高于 20 kBq/m<sup>3</sup>, 其附近建筑物应采取相应的底层地面抗开裂措施, 部分测点浓度高于 30 kBq/m<sup>3</sup> 及 50 kBq/m<sup>3</sup>, 其附近建筑应采取防水处理或综合防氡措施。

**关键词:** 土壤气; 活动断裂; 脱气; 北京西部; CO<sub>2</sub>; Rn

**中图分类号:** P315.72      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2023)01-0049-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0011

## 0 引言

地球脱气作用是岩石圈和大气圈进行物质能量交换的重要形式。地下气体作为地壳运动和地球物理、化学场变化的产物不仅携带了大量地球内部的信息, 其大量逸出也可能直接改变局部大气的物理化学状态, 产生一定的环境效应(朱宏任, 汪成民, 1990)。活动断裂带是地壳相对薄弱的地带, 构造裂隙的发育以及断层活动为深部气体的运移提供了通道, 是大陆地区发生脱气作用的重要场所之一。

测量断裂带附近土壤气浓度的变化, 是研究断裂脱气的主要手段, 对探讨断裂活动性及开展地震监测预测研究具有一定意义。国内已有大量研究表明, 断裂附近土壤气地球化学特征与活动

断裂的分布、构造活动性以及区域地震活动密切相关(周晓成等, 2011; 蔡仲琼, 2000; 盛艳蕊等, 2015; 王喜龙等, 2017)。此外, 活动断裂脱出的气体不仅包括 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、某些烃类等具有温室效应的气体, 还包括 Rn、Hg 等有害气体, 这些脱出的气体会对区域环境产生一定的影响, 例如 Zhou 等(2016)通过野外实测, 估算汶川地震破裂带 CO<sub>2</sub> 的排放量为  $0.57 \times 10^6$  t/a, 与世界上部分火山及泥火山区温室气体释放量相当(黄华谷等, 2011; 马向贤等, 2012; 郭正府等, 2015); 周晓成等(2017a, b)讨论了首都圈西北部主要断裂带及汶川地震破裂带土壤气 H<sub>2</sub> 释放的浓度变化及环境效应; 一些学者(Chen et al., 2018; 周志华等, 2014)研究了首都圈部分断裂带土壤气 Rn 释放造成的环境影响, 提出部分区域需采取防氡措施。

\* 收稿日期: 2022-08-03.

基金项目: 廊坊市科技支撑计划项目(2019013090)资助.

第一作者简介: 李 静(1982-), 讲师, 主要从事流体地球化学研究. E-mail: 102lij@163.com.

♣ 通讯作者简介: 周 贺(1983-), 工程师, 主要从事地质工程研究. E-mail: zhouhe2008@petrochina.com.cn.

黄庄—高丽营断裂、八宝山断裂和南口山前断裂是北京市西部3条主要的NE向活动断裂,目前关于上述3条断裂脱气情况及环境影响的研究鲜见报道。本文基于这3条断裂释放的 $\text{CO}_2$ 和Rn的浓度与通量连续两期测量结果,分析了区域断裂脱气特征,并估算了断裂带的年脱气规模,探讨了断裂带脱气对区域环境造成的影响,以期为更好地开展区域土壤气监测以及区域地震监测及环境保护提供参考。

## 1 地质概况

北京市位于华北盆地北缘,大地构造上处于中朝准地台北部,横跨燕山台褶带和华北断坳2个二级构造单元,受燕山运动影响,区域内断裂发育,NE向及NW向断裂相互交汇,造就了北京“两隆一凹”(即京西隆起、北京凹陷和大兴隆起)地堑式盆地的前第四纪基底格架(徐倩华,2010)。黄庄—高丽营断裂、八宝山断裂和南口山前断裂是北京市西部3条主要的NE向活动断裂(图1),是北京山区和平原区的主要分界构造(张磊等,2017a;黄秀铭等,1991;刘广平等,2001)。

黄庄—高丽营断裂是北京地区规模最大的一条NE向断裂,形成于燕山运动末期,是北京凹陷和西山隆起的分界构造(张磊,2017a),也是古近纪以来北京凹陷西界的主控断裂。断裂北起北京密云西岭庄,向南经怀柔、高丽营、丰台至河北涞水附近,全长约130 km,倾向SE,倾角 $55^\circ \sim 75^\circ$ ,主要表现为正断倾滑性质(焦青等,2005)。有研究表明该断裂北段全新世以来存在强烈的蠕滑变形,其北段高丽营地区产生了地裂缝、地面塌陷、墙体路面开裂等地质灾害现象(张磊,2017b)。测区第四纪沉积物厚度可达300~500 m,地表覆盖层以松散的砂质及粉砂质黏土为主。

八宝山断裂紧邻黄庄—高丽营断裂呈波弯状展布于北京西山山麓,形成于中侏罗世晚期。断裂南起涞水,向北东经大灰厂、八宝山止于南口孙河断裂,全长约80 km,属逆断层,倾向SE,倾角 $25^\circ \sim 35^\circ$ (徐杰等,1992)。断裂两侧主要出露有蓟县系雾迷山组灰岩和石炭二叠系砂页岩,测区地表覆盖层以松散砂质及砂砾石为主。

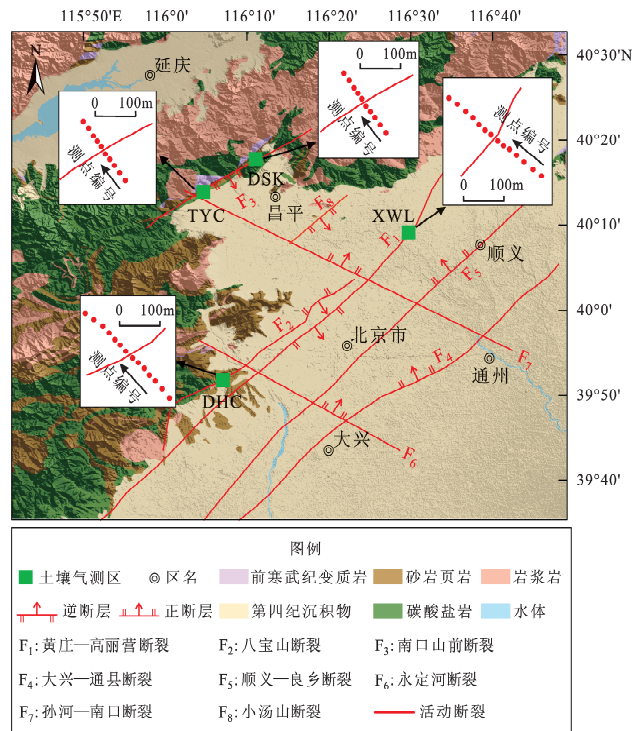


图1 北京西部活动断裂区域地质概况及土壤气测区分布

Fig. 1 Geological structure of the main active faults and the survey areas for soil gas in western Beijing

南口山前断裂位于昌平南口山前地带,是军都山隆起与京西丘陵平原区的分界断裂,形成于燕山运动早期,燕山早期断裂为逆冲性质,晚期转变为张性正断层。断裂自白羊城经南口村至虎峪一带,全长约60 km,走向NE,倾向SE,倾角 $50^\circ \sim 80^\circ$ (冉洪流等,1996)。断裂主要发育在中元古界白云岩、灰岩地层中,测区地表覆盖层以砂砾石、粗砂以及粉质黏土为主。

## 2 土壤气测量方法

为调查活动断裂脱气情况,项目组于2017年5月和2018年5月重复测量了北京西部3条活动断裂的土壤气 $\text{CO}_2$ 和Rn的浓度以及通量,该时段北京地区气温相对稳定,且降雨少,可有效避免野外测量期间因气候因素带来的干扰和影响。在黄庄—高丽营断裂的西王路(XWL)、八宝山断裂的大灰厂(DHC)、南口山前断裂的德胜口(DSK)和檀峪村(TYC)分别设置了测区(图1,表1),各测区跨断

表 1 土壤气测区基本信息及测点数

Tab. 1 Basic information of the survey areas and the number of measuring points for soil gas

测区	测线 编号	测点位置		所在断裂	2017 年		2018 年	
		λ <sub>E</sub> /(°)	φ <sub>N</sub> /(°)		浓度测点数	通量测点数	浓度测点数	通量测点数
西王路	XWL	116. 49	40. 15	黄庄—高丽营断裂	14	4	14	2
大灰厂	DHC	116. 11	39. 86	八宝山断裂	14	3	14	1
德胜口	DSK	116. 18	40. 29	南口山前断裂	10	4	10	2
檀峪村	TYC	116. 07	40. 23	南口山前断裂	10	4	10	2

裂布置一条测线，测线上布置 10 ~ 14 个浓度测点，测点间距 10 ~ 40 m（图 2）。两期测量中土壤气浓度测点共计 96 个，通量测点共计 22 个。

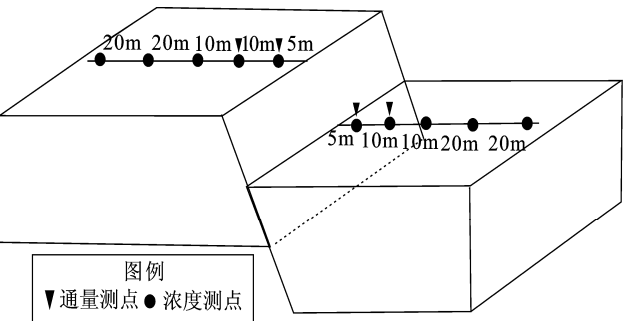


图 2 跨断层测点布置示意图

Fig. 2 Sketch of arrangement of measuring sites across the fault

本文土壤气野外流动测量方法与 Zhou 等 (2016) 采用的方法相同，在测点处用钢钎打下直径 30 cm、深度约 80 cm 的取样孔，再将空心取样器插于孔内，密封孔口后开始取样、测量（图 3a）。采用 VEGA - GC 型便携式气相色谱仪测量

CO<sub>2</sub> 浓度，检测限为 2 μL/L，仪器的标定误差为 5%；采用 RTM2200 测氡仪测定 Rn 浓度，检测限为 7.14 Bq/m<sup>3</sup>，仪器的标定误差小于 10%。浓度测量结束后，选择靠近断裂的 2 ~ 4 个测点进行土壤气逸散通量测量，采用静态暗箱法（图 3b）（Chiodini *et al*, 1998；Evans *et al*, 2001）。通量箱为半径 20 cm 的聚四氟乙烯半球壳，使用 GXH - 3010 便携式 CO<sub>2</sub> 分析仪连续循环抽气测量 CO<sub>2</sub> 通量，抽气时间 30 min，采样间隔为 15 s；使用 RAD7 测氡仪连续循环抽气 1 h 测量 Rn 通量，采样间隔 5 min，仪器与取样器间装有干燥管，避免土壤湿度影响。土壤气通量的计算公式如下：

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{\rho V_0 P_0 T_s}{A_0 P_s T_0} \times \frac{dC_{\text{CO}_2}}{dt} = \frac{1.98 \times 10^3 \times \frac{2}{3} \times 0.2^3 \times 273.13 \pi P_0}{1.01 \times 10^5 \times 0.2^2 \pi T_0} \times \frac{dC_{\text{CO}_2}}{dt} \quad (1)$$

$$F_{\text{Rn}} = \frac{V_0 P_0 T_s}{A_0 P_s T_0} \times \frac{dC_{\text{Rn}}}{dt} = \frac{\frac{2}{3} \times 0.2^3 \times 273.13 \pi P_0}{1.01 \times 10^5 \times 0.2^2 \pi T_0} \times \frac{dC_{\text{Rn}}}{dt} \quad (2)$$

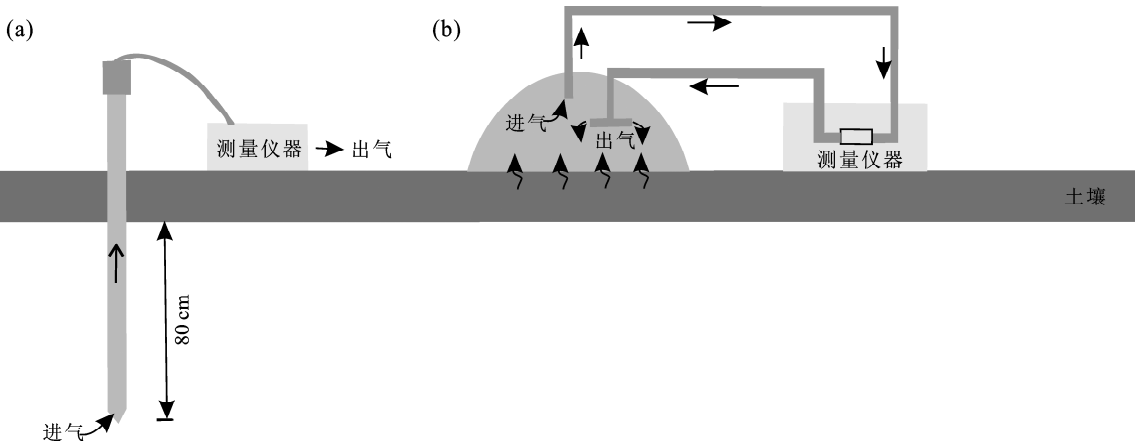


图 3 土壤气浓度 (a) 和通量 (b) 测量示意图

Fig. 3 Sketch of measurements of soil gas concentration (a) and flux (b)

式中： $F_{\text{CO}_2}$ 和 $F_{\text{Rn}}$ 分别代表土壤气 $\text{CO}_2$ 和 $\text{Rn}$ 的  
通量，单位分别为 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $\text{mBq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ；  
 $\rho$ 为常温常压下 $\text{CO}_2$ 的标准密度； $V_0$ 为通量箱体  
积； $P_0$ 为箱内大气压； $T_0$ 为箱内温度； $A_0$ 为通  
量箱底面积； $P_s$ 为标准大气压； $T_s$ 为标准温度；  
 $\text{d}C/\text{d}t$ 为通量箱内气体浓度的变化率，由野外测  
量获得。

3 结果与讨论

3.1 脱气特征

综合分析北京市西部两条活动断裂两期土壤  
气测量结果见表2。因样本数量有限，且各测区土  
壤气数据在 $K-S$ 检验中均符合正态分布，因此采  
用了平均值 $+n$ 倍标准差的方法确定各测区土壤气  
浓度正异常下界值，高于此异常界的值视为异常值。

参考前人研究（李营等，2009；刘永梅等，  
2016），并结合本文测量数据，取平均值加1倍标  
准差作为土壤气浓度异常界。

综合各测区两期的土壤气浓度数据（以断裂  
陡坎处为测线0位置，东侧盘取负值，西侧盘取正  
值）可见，西王路测区所在的黄庄—高丽营断裂  
为正断层，测线剖面上土壤气浓度异常主要位于  
断层上盘（东侧盘），且 $\text{CO}_2$ 和 $\text{Rn}$ 浓度最大值均  
出现在断层上盘，空间位置一致；第二期 $\text{CO}_2$ 和  
 $\text{Rn}$ 的浓度均表现出上盘相对较高、下盘相对较低  
的趋势（图4a），推断其与黄庄—高丽营断裂倾向  
SE，上盘为新生代断陷盆地，其北段张性活动明  
显，造成断裂上盘裂隙更为发育有关。大灰厂测线  
剖面上 $\text{CO}_2$ 和 $\text{Rn}$ 浓度异常主要集中在 $-60 \sim 0 \text{ m}$   
断裂附近，且异常空间位置一致（图4b）。大灰厂测  
线所在的八宝山断裂为倾向SE的逆断层，因此该

表 2 研究区活动断裂土壤气浓度和通量测量结果

Tab. 2 Statistics of soil gas  $\text{CO}_2$  and  $\text{Rn}$  concentrations and flux of active faults in research area

测区	$\text{CO}_2$ 浓度 (%)					$\text{Rn}$ 浓度 / ( $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ )					$\text{CO}_2$ 通量 / ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )			$\text{Rn}$ 通量 / ( $\text{mBq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )		
	最小值	最大值	均值	标准差	异常界	最小值	最大值	均值	标准差	异常界	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值
西王路	0.32	4.07	1.64	0.80	2.44	2.33	62.42	22.17	11.55	33.72	17.55	48.56	33.15	20.92	107.9	50.9
大灰厂	0.17	1.63	0.69	0.31	1	1.22	33.68	9.68	6.87	16.55	13.05	55.6	29.99	1.01	24.25	13.91
得胜口	0.22	0.5	0.31	0.06	0.37	1.55	12.64	4.73	2.60	7.33	19.02	32.79	26.11	4.67	94.78	26.9
檀峪村	0.55	1.42	0.82	0.25	1.07	5.54	17.07	9.95	3.44	13.39	11.8	43.43	30.93	12.03	150.45	52.77

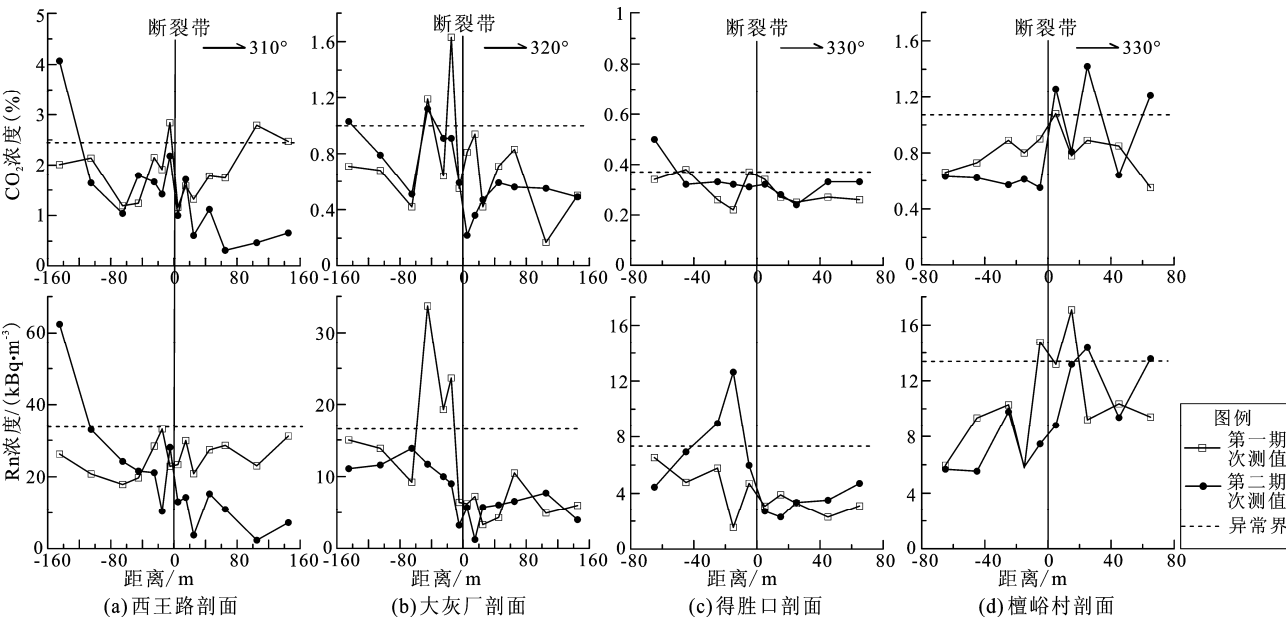


图 4 各测区剖面土壤气浓度分布

Fig. 4 Distribution of soil gas concentrations in each survey area profile

区断裂的集中破碎带位于断裂中央上盘 -60 ~ 0 m, 由于断裂挤压作用致使该区域裂隙更为发育, 连通性好, 有利于断裂内部气体的逸出。得胜口与檀峪村测区所在的南口山前断裂为倾向东南的张性正断层, 得胜口测线上 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度异常出现于断层中央和上盘, 异常空间位置不一致; 檀峪村测线上 Rn 和 CO<sub>2</sub> 浓度异常出现于断层中央和下盘, 两条测线上 Rn 和 CO<sub>2</sub> 的浓度异常主要集中于断裂中央 -20 ~ 40 m (图 4c, d), 此区域应为断裂集中破碎地带。

从各测区土壤气平均浓度可见, 西王路测区土壤气 CO<sub>2</sub> 和 Rn 平均浓度最高, 得胜口测区最低 (图 5a)。各测区土壤气 CO<sub>2</sub> 和 Rn 的平均浓度呈现出明显的正相关变化趋势, 两期平均浓度的相关系数为 0.987 (图 5b), 反映了断裂脱气过程中土壤气 CO<sub>2</sub> 对土壤气 Rn 的逸出具有明显的载气作用, 前人研究也表明 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 等地球内部逸出气体, 可作为载气将地球深部的 Rn 运移至地表, 造成土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度和 Rn 浓度相关性较高 (Yang *et al*, 2003; Fu *et al*, 2008; 刘永梅等, 2016; 王喜龙等, 2017)。

Rn 浓度高低与断层活动性具有密切关系 (Seminsky, Demberdl, 2013; Seminsky, Bobrov, 2009; 杨江等, 2019), 本文采用 Seminsky 和 Demberdl (2013) 建立的方法计算了土壤气 Rn 相对指数  $KQ$ :

$$KQ = Q_{\max}/Q_{\min} \quad (3)$$

式中:  $Q_{\max}$  为测线剖面上浓度最大值;  $Q_{\min}$  为断层两盘外侧非异常区域的浓度最小值。本次计算综合了各测区两期数据, 并选取断裂两侧  $\pm 40$  m 范围外非异常区的最小浓度为  $Q_{\min}$ , 相对指数  $KQ$  能有效排除岩土放射性、覆盖层厚度、气象条件等区域背景因素的影响, 可用于评价断裂构造活动性,  $KQ$  值越大, 则断层的构造活动性越强 (Seminsky, Demberdl, 2013; Seminsky, Bobrov, 2009)。

由各测区 Rn 的  $KQ$  值可见 (图 5c), 西王路测区  $KQ$  值最大, 说明其所在的黄庄高丽营断裂北段构造活动较强, 该地区确实存在规模性、丛丛性的地裂缝以及建筑墙体开裂和变形等地质灾害现象。张磊等 (2017b) 指出黄庄—高丽营北

段全新世以来表现出强烈蠕滑变形, 垂直活动速率较强, 断裂两盘差异性沉降明显, 断裂上盘在断面附近受到牵引力向下拖拽, 在纵弯作用下产生张裂, 因此诱发了线性分布的地裂缝、地面塌陷、墙体路面开裂等地质灾害现象, 且这些地质灾害均集中发育在断裂上盘 (即东南侧的下降盘)。因此, 西王路测区断裂活动性强, 地裂缝发育, 有利于断裂内部气体脱出, 是导致该测区土壤气平均浓度高的主要原因。大灰厂测区的  $KQ$  值低于西王路测区, 说明八宝山断裂的构造活动性弱于黄庄—高丽营断裂, 徐杰等 (1992) 研究也表明新生代黄庄—高丽营断裂的构造活动性强于八宝山断裂, 且具有北强南弱的特征。位于同一断裂带的得胜口测区和檀峪村测区  $KQ$  值较小, 说明南口山前断裂构造活动性相对最弱, 断裂北部得胜口测区  $KQ$  值与南部檀峪村测区相比略显偏高, 可能说明断裂北段活动性较南段略强, 也呈现出北强南弱的特点, 而北部测区表现出的 CO<sub>2</sub> 和 Rn 浓度偏低, 可能由测区地表砾石出露较多, 渗透性强, 造成更多地表空气与土壤气混合稀释所致。总体而言, 研究区各断裂的  $KQ$  值及土壤气平均浓度呈现东高西低的趋势, 与前人 (王喜龙等, 2017; 李营等, 2009) 的研究结论“首都圈土壤气浓度整体具有东高西低的变化趋势”一致, 王喜龙等 (2017) 指出此种变化趋势可能与首都圈地区自西向东应力水平增高、沉积层厚度增加、地震活动逐渐增强等因素有关。

各测区两期土壤气浓度和通量均值相关性不明显, 与通量测点较少有关。西王路测区和檀峪村测区土壤气平均通量较高, 前者主要与断裂构造活动较强有关, 后者可能与下伏基岩为碳酸盐岩或其它背景因素相关。

### 3.2 脱气环境效应

CO<sub>2</sub> 是典型的温室气体, 能够吸收地面辐射中的红外线, 产生温室效应, 造成全球变暖 (胡祖恒等, 2020), CO<sub>2</sub> 对增强温室效应的贡献率约占温室气体的 56% (Nakicenovic *et al*, 2000), 因此 CO<sub>2</sub> 排放量及其在大气中的浓度变化一直备受关注 (Joos *et al*, 1999; 李楠, 2020; 刘强等, 2005)。土壤是自然界中重要的“碳储库”, 也是大气 CO<sub>2</sub> 的主要来源之一 (Jenkinson *et al*,

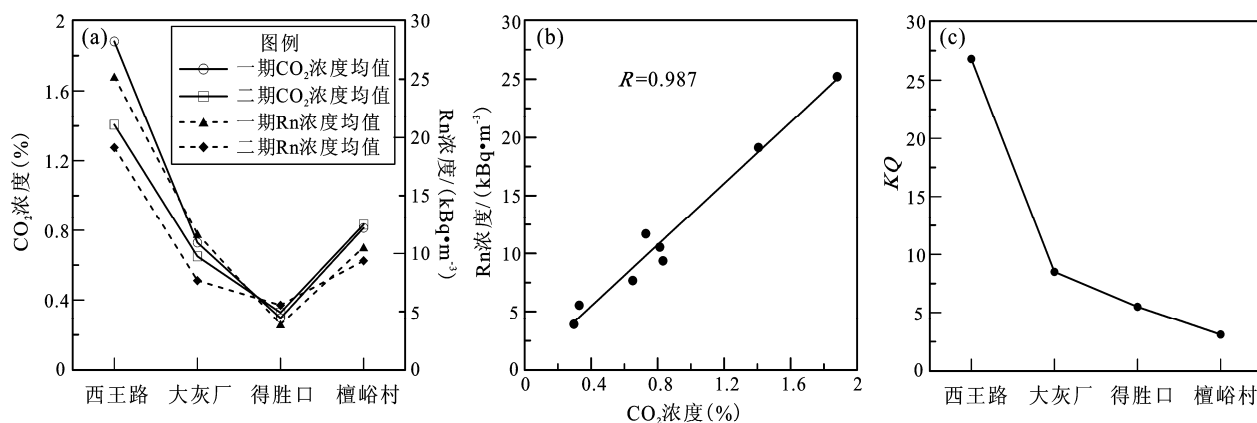


图5 各测区土壤气平均浓度 (a)、CO<sub>2</sub> 与 Rn 平均浓度相关性 (b) 及测区 KQ 值 (c)

Fig. 5 Soil gas average concentration (a), the correlation between average concentration of CO<sub>2</sub> and Rn (b), and KQ value (c) in each survey area

1991; Schlesinger, Andrews, 2000), 断裂带土壤气 CO<sub>2</sub> 来源包括地球深部脱气、碳酸盐岩变质作用、有机质分解、土壤生物活动及土壤呼吸作用等 (Ciotoli *et al*, 2007; 高程达, 2008)。常温常压下 CO<sub>2</sub> 密度是空气的 1.5 倍, 地下脱出或地质储存泄露的 CO<sub>2</sub> 在地下空间累积至高浓度时会对人体健康造成危害, 工业卫生所接受的 CO<sub>2</sub> 安全浓度为 0.5%; CO<sub>2</sub> 浓度达到 3% ~ 5% 时, 会出现气闷和头痛感; 长期处于 CO<sub>2</sub> 浓度高于 5% 的环境中, 会导致缺氧性窒息死亡 (Metz *et al*, 2005)。Baxter 等 (1999) 按照 70 cm 处土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度将地下空间 CO<sub>2</sub> 的风险水平划分为 5 个等级 (表 3), CO<sub>2</sub> 浓度低于 5% 时属于无窒息风险或无风险区域, 本文研究区断裂 CO<sub>2</sub> 脱气的浓度范围为 0.17% ~ 4.07%, 大灰厂、得胜口和檀峪村 3 个测区绝大多数测点的 CO<sub>2</sub> 浓度小于 1.5%, 属无风险区; 西王路测区半数以上的测点 CO<sub>2</sub> 高于 1.5% 但均小于 5%, 属土壤脱气较弱

地区, 地下空间无窒息风险。

研究区断裂带 CO<sub>2</sub> 通量变化范围为 11.8 ~ 55.63 g/(m<sup>2</sup> · d), 明显高于温带干旱区 0 ~ 70 cm 深土壤剖面 CO<sub>2</sub> 通量平均值 660.43 μmol/(m<sup>2</sup> · h), 约 0.7 g/(m<sup>2</sup> · d) (高程达, 2008), 77% 的通量值高于华北农田土壤 CO<sub>2</sub> 通量的峰值 20 g/(m<sup>2</sup> · d) (孟凡桥等, 2006), 说明断裂构造的存在有利于土壤内部 CO<sub>2</sub> 的释放。用研究区各条断裂 CO<sub>2</sub> 通量均值乘以估算的活动断裂脱气面积, 计算得到 3 条活动断裂脱气对大气 CO<sub>2</sub> 的年贡献量约为 0.45 × 10<sup>6</sup> t (表 4), 小于汶川地震破裂带 CO<sub>2</sub> 年释放量 (约 0.95 × 10<sup>6</sup> t) (周晓成等, 2017c), 高于腾冲新生代火山区温泉 CO<sub>2</sub> 年排放通量 (约 3.58 × 10<sup>3</sup> t) (成智慧等, 2012), 约占中国典型火山区温室气体年贡献总量 (约 8.13 × 10<sup>6</sup> t) (郭正府等, 2014) 的 5.5%, 北京地区有 13 条第四纪断裂带 (玄月, 2011), 其向大气圈排放的温室气体总量值得关注。

表 3 土壤气 CO<sub>2</sub> 风险水平分级 (Baxter 等, 1999)

Tab. 3 Risk levels of concentration of CO<sub>2</sub> in soil gas (Baxter *et al*, 1999)

风险水平	70 cm 深度土壤气 CO <sub>2</sub> 浓度 C (%)	影响	描述
I	$C < 1.5$	任何时刻均无风险	非火山区 CO <sub>2</sub> 浓度
II	$1.5 < C \leq 5$	无窒息风险	土壤气弱脱气区, 室内或地下空间 CO <sub>2</sub> 浓度无风险
III	$5 < C \leq 25$	低窒息风险	室内底板存在 CO <sub>2</sub> 污染, 不通风的地下空间中 CO <sub>2</sub> 可累积至致死浓度
IV	$25 < C \leq 50$	中窒息风险	室内底板 CO <sub>2</sub> 浓度通常大于 1%, CO <sub>2</sub> 在地下空间将不断累积至致死浓度
V	$50 < C$	高窒息风险	室内地面 CO <sub>2</sub> 可达到致死浓度 (>15%), 所有地下空间 CO <sub>2</sub> 可在几小时内累积至致死浓度

表 4 研究区断裂带 CO<sub>2</sub> 脱气平均通量和对大气的贡献量  
Tab. 4 Average flux and output of CO<sub>2</sub> from active faults in research area

断裂	CO <sub>2</sub> 平均通量/ (g · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> )	断裂长度/ km	剖面长度/ m	面积/ ( × 10 <sup>7</sup> m <sup>2</sup> )	日贡献量/ (t · d <sup>-1</sup> )	年贡献量/ ( × 10 <sup>6</sup> t · a <sup>-1</sup> )
黄庄—高丽营	33. 15	110	145	1. 60	530. 4	0. 19
八宝山	29. 99	74	145	1. 07	320. 89	0. 12
南口山前断裂	28. 52	100	130	1. 3	370. 76	0. 14
合计	—	—	—	—	1 222. 05	0. 45

Rn 是具有放射性的惰性气体，其天然放射性同位素包括 219Rn、220Rn 和 222Rn，半衰期分别为 3.92 s、54.5 s 和 3.82 d，前两者半衰期短，其产生的环境效应可忽略，本文土壤 Rn 测量对象主要为 222Rn。Rn 被人体吸入后衰变产生的氦子体（如 218Po、214Pb、214Po 等）及 α 粒子可对人体呼吸系统造成辐射损伤（程业勋，2008），是除吸烟外引发肺癌的第二大危险因素（Sheen *et al.*, 2016）。土壤 Rn 是环境空气中氡的主要来源（孙凯南等，2004；周晓成等，2007）。土壤 Rn 主要来源于土壤或岩石中铀、钍等放射性矿物的衰变，地质断裂构造有利于地下深部 Rn 在载气作用下迁移至地表（Etiope, Martinelli, 2002）。工程地土壤 Rn 对建筑物室内氡浓度有直接影响，《民用建筑工程室内环境污染控制标准》（GB 50325—2020）规定，当土壤 Rn 浓度大于 20 kBq/m<sup>3</sup> 且小于 30 kBq/m<sup>3</sup> 或土壤表面 Rn 析出率大于 50 mBq/(m<sup>2</sup> · s) 且小于 100 mBq/(m<sup>2</sup> · s) 时，应采取建筑物底层地面抗开裂措施；当土壤 Rn 浓度不小于 30 kBq/m<sup>3</sup> 且小于 50 kBq/m<sup>3</sup> 或土壤表面 Rn 析出率不小于 100 mBq/(m<sup>2</sup> · s) 且小于 300 mBq/(m<sup>2</sup> · s) 时，需采取底层地面抗开裂及一级防水处理；当土壤 Rn 浓度平均值不小于 50 kBq/m<sup>3</sup> 或土壤表面 Rn 析出率平均值不小于 300 mBq/(m<sup>2</sup> · s) 时，应采取建筑物综合防氡措施。

研究区活动断裂土壤气 Rn 浓度为 1.22 ~ 62.42 kBq/m<sup>3</sup>，Rn 浓度高于 20 kBq/m<sup>3</sup> 的测点出现在西王路和大灰厂测区，大灰厂测区仅 2 个测点 Rn 浓度高于 20 kBq/m<sup>3</sup>，Rn 平均浓度小于 20 kBq/m<sup>3</sup>，可不采取防氡工程措施；西王路测区 64% 的测点 Rn 浓度均高于 20 kBq/m<sup>3</sup>，其附近建筑物应采取相应的底层地面抗开裂措施，西王路测区 14% 的测点 Rn 浓度高于 30 kBq/m<sup>3</sup>，其附近建筑还需采取一级防水处理，个别测点 Rn 浓度高于 50 kBq/m<sup>3</sup>，其附近建筑应采取综合防氡措施。研究

区断裂带 Rn 通量平均值为 39.91 mBq/(m<sup>2</sup> · s)，略高于全国土壤 Rn 平均通量范围 (27.7 ± 9.4) mBq/(m<sup>2</sup> · s) (Zhuo *et al.*, 2008)，与唐山断裂带土壤 Rn 平均通量 40.58 mBq/(m<sup>2</sup> · s) 相当（路畅等，2022），低于夏垫断裂带的土壤 Rn 平均通量 69.12 mBq/(m<sup>2</sup> · s)（李静等，2018）。研究区 Rn 通量高于 100 mBq/(m<sup>2</sup> · s) 的测点出现在西王路和檀峪村测区，应持续开展对上述测区活动断裂附近的土壤 Rn 调查。

4 结论

通过对北京西部黄庄—高丽营断裂、八宝山断裂和南口山前断裂 CO<sub>2</sub> 与 Rn 脱气情况进行分析和研究，得到以下结论：

(1) 各测区土壤气异常主要集中在断裂上盘或断裂中央附近，与断裂内部集中破碎带位置及裂隙发育情况有关；黄庄—高丽营断裂北段的西王路测区土壤气浓度平均值、异常界及 Rn 的 KQ 值最大，说明该断裂北段构造活动性较强；研究区 3 条断裂的土壤气浓度均值及构造活动性呈现东高西低的特征，与首都圈土壤气地球化学背景场特征一致。

(2) 3 条断裂土壤气 CO<sub>2</sub> 浓度均小于 5%，其地下空间属无窒息风险或无风险区域。估算得到 3 条断裂脱气对大气 CO<sub>2</sub> 的年贡献量约为 0.45 × 10<sup>6</sup> t，约占中国典型火山区温室气体年贡献总量的 5.5%。

(3) 西王路测区土壤气 Rn 平均浓度均高于 20 kBq/m<sup>3</sup>，其附近建筑物应采取相应的底层地面抗开裂措施。部分测点 Rn 浓度高于 30 kBq/m<sup>3</sup> 及 50 kBq/m<sup>3</sup>，其附近建筑应采取防水处理或综合防氡措施。

本文修改过程中得到了审稿专家的热心指导及帮助，在此表示衷心感谢！



## 参考文献:

- 蔡仲琼. 2000. 富蕴地震断裂带的气体地球化学探测[J]. 内陆地震, 14(4):297-301.
- 成智慧, 郭正府, 张茂亮, 等. 2012. 腾冲新生代火山区温泉 CO<sub>2</sub> 气体排放通量研究[J]. 岩石学报, 28(4):1217-1224.
- 程业勋. 2008. 环境中氡及其子体的危害与控制[J]. 现代地质, 22(5):857-868.
- 高程达. 2008. 温带干旱地区近地层 CO<sub>2</sub> 浓度和土壤 CO<sub>2</sub> 通量[D]. 北京: 北京林业大学.
- 郭正府, 张茂亮, 成智慧, 等. 2014. 中国大陆新生代典型火山区温室气体释放的规模及其成因[J]. 岩石学报, 30(11):3467-3480.
- 郭正府, 张茂亮, 孙玉涛, 等. 2015. 火山温室气体释放通量与观测研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(4):690-700.
- 胡祖恒, 李永华, 胡跃文, 等. 2020. 西南地球持续性气候事件的未来变化预估[J]. 气象科学, 40(6):829-837.
- 黄华谷, 邱鹏飞, 陈多福. 2011. 泥火山的全球分布和研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 30(2):189-195.
- 黄秀铭, 汪良谋, 徐杰, 等. 1991. 北京地区新构造运动特征[J]. 地震地质, 13(1):43-51.
- 焦青, 邱泽华, 范国胜. 2005. 北京地区八宝山—黄庄—高丽营断裂的活动与地震[J]. 大地测量与地球动力学, 25(4):50-54.
- 李静, 陈志, 陆丽娜, 等. 2018. 夏垫活动断裂 CO<sub>2</sub>、Rn、Hg 脱气对环境的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(4):629-638.
- 李楠. 2020. 中国主要温室气体变化及其对全球辐射强迫的贡献研究[D]. 河南: 河南大学.
- 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.
- 刘广平, 辛鑫, 侯建军, 等. 2001. 北京南口山前活动断层的分段性研究[J]. 东北地震研究, 17(4):9-16.
- 刘强, 王跃思, 王明星, 等. 2005. 北京大气中重要温室气体近 10 年变化趋势[J]. 大气科学, 29(2):267-271.
- 刘永梅, 王华林, 王纪强, 等. 2016. 郯庐断裂带山东段土壤气体地球化学特征[J]. 地震地磁观测与研究, 37(1):63-69.
- 路畅, 李营, 胡乐, 等. 2022. 唐山地区土壤气 Rn 通量及其与地震活动的关系[J]. 地震研究, 45(2):241-248.
- 马向贤, 郑国东, 梁收运, 等. 2012. 地质甲烷对大气甲烷源与汇的贡献[J]. 矿物岩石地球化学通报, 31(2):139-145.
- 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 2006. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报, 26(6):992-999.
- 冉洪流, 董瑞树, 冯荣梅. 1996. 昌平南口山前断裂断层分段的地震学特征[J]. 山西地震, 86(3):45-48.
- 盛艳蕊, 张子广, 周晓成, 等. 2015. 新保安—沙城断裂带土壤气地球化学特征分析[J]. 地震, 35(4):90-98.
- 孙凯南, 郭秋菊, 程建平. 2004. 我国部分地区土壤氡析出率的理论模型[J]. 中华放射医学与防护杂志, 24(6):581-584.
- 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.
- 徐杰, 汪良谋, 方仲景, 等. 1992. 北京八宝山断裂和黄庄—高丽营断裂构造活动性的初步分析[J]. 华北地震科学, 10(3):1-11.
- 徐倩华. 2010. 北京平原地区第四纪地层与新构造运动[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 玄月. 2011. 北京市断裂活动性研究及地震危险性分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 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.
- 张磊, 王继明, 张晓亮, 等. 2017a. 北京平原区新构造运动研究[J]. 城市地质, 12(4):6-15.
- 张磊, 张晓亮, 白凌燕, 等. 2017b. 北京地区黄庄—高丽营断裂北段活动性研究与灾害效应分析[J]. 地质力学学报, 23(4):548-557.
- 周晓成, 陈超, 吕超甲, 等. 2017a. 首都圈西北部主要活动断裂土壤气中氢气(H<sub>2</sub>)地球化学特征[J]. 环境化学, 36(5):977-983.
- 周晓成, 杜建国, 王传远, 等. 2007. 西藏拉萨市土壤气中氡、汞环境地球化学特征[J]. 环境科学, 28(3):659-663.
- 周晓成, 石宏宇, 陈超, 等. 2017b. 汶川 M<sub>s</sub>8.0 地震破裂带土壤气中 H<sub>2</sub> 浓度时空变化[J]. 地球科学进展, 32(8):818-827.
- 周晓成, 孙凤霞, 陈志, 等. 2017c. 汶川 M<sub>s</sub>8.0 地震破裂带 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、Rn 和 Hg 脱气强度[J]. 岩石学报, 33(1):291-302.
- 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. 首都圈土壤气中氡环境地球化学特征[J]. 生态学杂志, 33(7):1729-1733.
- 朱宏任, 汪成民. 1990. 地球的脱气过程及对人类生活环境的影响[J]. 灾害学, 5(4):84-88.
- Baxter P J, Baubron J, Coutinho R. 1999. Health hazards and disaster potential of ground gas emissions at Furnas volcano, São Miguel, Azores [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 92(1):95-106.
- 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.
- Chiodini G, Cioni R, Guidi M, et al. 1998. Soil CO<sub>2</sub> flux measurements in volcanic and geothermal areas [J]. Applied Geochemistry, 13(5):543-552.
- 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, 112(B05407):1-23.
- Etiopio G, Martinelli G. 2002. Migration of carrier and trace gases in geosphere: an overview [J]. Physics of Earth and Planetary Interiors, 129(3):185-204.
- Evans W C, Sorey M L, Kennedy B M, et al. 2001. High CO<sub>2</sub> emissions through porous media: Transport mechanisms and implications for flux measurement and fractionation [J]. Chemical Geology, 177:15-29.
- Fu C C, Yang T F, Du J. 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.
- Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. 1991. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming [J]. Nature, 351(6324):304-306.
- Joos F, Plattner G K, Stocker T F, et al. 1999. Global warming and marine carbon cycle feedbacks on future atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. Science, 284



- (5413):464–467.
- Metz B, Davidson O, Coninck H D, *et al.* 2005. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage[R]. Cambridge:Cambridge University.
- Nakicenovic, Nebojsa, Swart R. 2000. IPCC special report on emissions scenarios: A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge:Cambridge University.
- Schlesinger W H, Andrews J A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 48(1):7–20.
- Seminsky K Z, Bobrov A A. 2009. Radon activity of faults(western Baikal and southern Angara areas)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 50(8):682–692.
- Seminsky K Z, Demberdl S. 2013. The first estimations of soil – radon activity near faults in Central Mongolia[J]. *Radiation Measurements*, 49(1):19–34.
- Sheen S, Lee K S, Chung W Y, *et al.* 2016. An updated review of case – control studies of lung cancer and indoor radon – Is indoor radon the risk factor for lung cancer? [J]. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 28(1):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 X C, Chen Z, Cui Y J. 2016. Environmental impact of CO<sub>2</sub>, Rn, Hg degassing from the rupture zones produced by Wenchuan M<sub>s</sub>8.0 earthquake in western Sichuan, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 38:1067–1082.
- Zhuo W, Guo Q, Chen B, *et al.* 2008. Estimating the amount and distribution of radon flux density from the soil surface in China[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(7):1143–1148.
- GB 50325—2020, 民用建筑工程室内环境污染控制标准[S].

## Degassing Characteristics of CO<sub>2</sub> and Rn from the Active Fault in Western Beijing and Their Environmental Impact

LI Jing<sup>1,4</sup>, ZHOU He<sup>2</sup>, CHEN Zhi<sup>3</sup>, LU Lina<sup>1,4</sup>, DU Jianguo<sup>3</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

(2. Petro China Jidong Oilfield Company, Tangshan 063000, Hebei, China)

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

(4. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Langfang 065201, Hebei, China)

### Abstract

The concentrations and fluxes of CO<sub>2</sub> and Rn degassing from the Huangzhuang-Gaoliying fault, the Babaoshan fault and the Nankou piedmont fault in western Beijing were measured in two consecutive years using the cross-fault soil gas measurement method, and the fault degassing characteristics in the study area and their environmental impact were analyzed. The results indicated that: The average soil gas concentration and *KQ* value of the Xiwanglu survey area in the northern section of the Huangzhuang-Gaoliying fault are the largest, which indicated the strong tectonic activity in the northern segment of the fault. The average soil gas concentration and tectonic activity of the three faults in the study area characterized higher in the East and lower in the West which are consistent with the geochemical background characteristics of the soil gas in the capital area. The total annual output of CO<sub>2</sub> from the three active fault are approximately  $0.45 \times 10^6$  t. The average concentration of Rn in soil gas in the Xiwanglu survey area is higher than  $20 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ , the ground floor anti-cracking measures should be taken for nearby buildings, and in some measured points which the concentration of Rn in soil gas are higher than  $30 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$  or  $50 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ , waterproof treatment or comprehensive radon prevention measures are required to prevent Rn diffusing into the buildings.

**Keywords:** soil gas; active fault; degassing; western Beijing; CO<sub>2</sub>; Rn