地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA
ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

北京黄庄—高丽营断裂土壤气体地球化学特征及其对地震活动的指示

刘兆飞 何鸿毅 陈志 李营 路畅 邵俊杰 高梓涵

Geochemical characteristics of soil gases on the Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing and their indications for seismic activity

Liu Zhaofei, He Hongyi, Chen Zhi, Li Ying, Lu Chang, Shao Junjie, Gao Zihan

引用本文:
刘兆飞, 何鸿毅, 陈志, 李营, 路畅, 邵俊杰, 高梓涵. 2023. 北京黄庄—高丽营断裂土壤气体地球化学特征及其对地震活动的指示. 地震学报[J], 45(4): 727–746. DOI: 10.11939/jass.20220036
Liu Z F, He H Y, Chen Z, Li Y, Lu C, Shao J J, Gao Z H. 2023. Geochemical characteristics of soil gases on the Huangzhuang–Gaoliying fault in Beijing and their indications for seismic activity. *Acta Seismologica Sinica*[J], 45(4): 727–746. DOI: 10.11939/jass.20220036

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11939/jass.20220036

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

首都圈地区土壤气Rn， Hg， CO_2地球化学特征及其成因
Geochemical characteristics of soil gases Rn， Hg and CO_2 and their genesis in the capital area of China
地震学报. 2017, 39(1): 85–101 https://doi.org/10.11939/jass.2017.01.008

吉兰泰断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
Gas emission from active fault zones around the Jilantai faulted depression basin and its implications for fault activities
地震学报. 2019, 41(5): 613–632 https://doi.org/10.11939/jass.20190025

汤东活动断裂带气体地球化学特征
Geochemical characteristics of soil gas in Tangdong active fault zone
地震学报. 2019, 41(4): 524–535 https://doi.org/10.11939/jass.20180131

安宁河断裂带土壤汞的分布特征
Distribution characteristics of soil mercury in Anninghe fault zone
地震学报. 2019, 41(2): 249–258 https://doi.org/10.11939/jass.20180141

辽宁省地震监测站地下水化学类型及成因分析
Hydrochemical types and origins analysis of groundwater at the seismic monitoring stations in Liaoning Province
地震学报. 2020, 42(1): 79–90 https://doi.org/10.11939/jass.20190091

依据地热井资料探讨北京八宝山断裂北段的基本特点
Characteristics of northern section of Beijing Babaoshan fault based on the stratigraphic data of geothermal drillings
地震学报. 2018, 40(5): 646–653 https://doi.org/10.11939/jass.20180018

第 45 卷　第 4 期　　地　震　学　报　　Vol. 45, No. 4
2023 年 7 月　(727-746)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Jul., 2023

刘兆飞，何鸿毅，陈志，李营，路畅，邵俊杰，高梓涵. 2023. 北京黄庄—高丽营断裂土壤气体地球化学特征及其对地震活动的指示. 地震学报，**45**(4)：727-746. doi：10.11939/jass.20220036.
Liu Z F, He H Y, Chen Z, Li Y, Lu C, Shao J J, Gao Z H. 2023. Geochemical characteristics of soil gases on the Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing and their indications for seismic activity. *Acta Seismologica Sinica*, **45**(4): 727-746. doi: 10.11939/jass.20220036.

北京黄庄—高丽营断裂土壤气体地球化学特征及其对地震活动的指示*

刘兆飞[1,2,3)]　何鸿毅[1,2)]　陈　志[1,2),†]　李　营[1,2)]
路　畅[1,2,4)]　邵俊杰[1,2)]　高梓涵[1,2)]

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所
2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测重点实验室
3) 中国北京 100083 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院
4) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要　通过对 2017 年 5 月土壤气 CO_2，Rn 和 Hg 的野外流动测量以及 2020 年 9 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日期间土壤气监测站 Rn 的连续监测，利用残差法和地震指数 K_S 方法对黄庄—高丽营断裂南北段的活动差异和区域地震活动进行了分析. 结果表明，与首都圈地区其它断裂相比，黄庄—高丽营断裂是首都圈地区活动性相对较强的活动断裂，断裂北段的土壤气体浓度和通量较南段更高，且北段上盘的 CO_2 和 Rn 浓度明显高于下盘，指示断裂北段具有更强的活动性. 对土壤气连续监测站数据进行分析，结果显示监测站的 Rn 浓度与气温、土壤温度和气压之间无明显相关性. 2021 年 3 月 25 日北京顺义 M_L3.0 地震前 6 天，监测站记录到 Rn 浓度出现异常升高，增加了一倍，且震后异常持续了一个月. 顺义 M_L3.0 地震前后 Rn 浓度的异常变化表明监测站的土壤气 Rn 浓度对 $K_S>0.1$ 的地震有很好的响应.

关键词　土壤气　地球化学　地震监测　黄庄—高丽营断裂
doi：10.11939/jass.20220036　　**中图分类号**：P315.78　　**文献标识码**：A

Geochemical characteristics of soil gases on the Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing and their indications for seismic activity

Liu Zhaofei[1,2,3)]　He Hongyi[1,2)]　Chen Zhi[1,2),†]　Li Ying[1,2)]
Lu Chang[1,2,4)]　Shao Junjie[1,2)]　Gao Zihan[1,2)]

* **基金项目**　国家重点研发计划项目(2019YFC1509203)、中国地震局现代化建设试点项目(30222640403)、国家自然科学基金(41402298，42073063，41704060)、中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(CEAIEF20220504，2021IEF1205，2021IEF0707，2020IEF0704)和高压物理与地震科技联合实验室开放基金(2021IEF0101)联合资助.
收稿日期　2022-03-22 收到初稿，2022-05-17 决定采用修改稿.
作者简介　刘兆飞，在读博士研究生，主要从事断裂带土壤气体地球化学特征与构造活动的相关研究，e-mail：liuzhaofei0@163.com；†陈志，博士，研究员，主要从事断裂带流体地球化学特征与构造活动的相关研究，e-mail：dugu_830822@163.com

1) *Institute of Earthquake Forecasting*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100036, *China*
2) *Key Laboratory of Earthquake Prediction*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100036, *China*
3) *School of Earth Science and Resources*, *China University of Geosciences* (*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*
4) *Institute of Geophysics*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100081, *China*

Abstract: Based on the field flow observation of soil gas (CO_2, Rn and Hg) in May of 2017 and continuous monitoring of soil gas Rn from September 1, 2020 to June 30, 2021, the residual signal and seismic index K_S are used to study the activity difference between the south and north segments of Huangzhuang-Gaoliying fault and their regional seismicity. The results indicate that this fault is a relatively active fault compared with other faults in the capital circle region of China. The concentrations and fluxes of the soil gases in the north segment of the fault are higher than those in the south segment. And the CO_2 and Rn concentrations in the hanging wall of the northern segment are significantly higher than those in the footwall. These indicate that the northern segment of the fault has stronger activity. Analyses on the continuous monitoring station data of soil gas Rn show there is no significant correlation between Rn concentration and air temperature, soil temperature, and air pressure. The Rn concentration at the monitoring station, six days prior to the Shunyi M_L3.0 earthquake on March 25, 2021, was recorded to significantly increase, which doubled and persisted for a month after the earthquake. The anomalous variations of Rn concentration before and after the Shunyi M_L3.0 earthquake indicate that the soil gas Rn concentration at the monitoring station exhibits a strong response to earthquakes with $K_S>0.1$.

Key words: soil gas; geochemistry; seismicity monitoring; Huangzhuang-Gaoliying fault

引言

活动断裂带是地球内部物质和能量交换的主要地带，因其贯通了地球深部系统(岩石圈)和地表系统(土壤圈—生物圈—水圈—大气圈)而成为地球强烈脱气的重要通道(Wakita *et al*, 1980; 陶明信等, 2005). 已有研究认为，构造演化和地震孕育过程中，地球内部物质迁移、能量释放及应力变化均可能导致活动断裂带出现气体地球化学异常(陈志等, 2014; Yuce *et al*, 2017; 刘兆飞, 2020). 因此，这些经由活动断裂带释放的气体必然携带着丰富的反映地球内部动力学过程及孕震介质物理、化学演化等的重要信息，这些气体的地球化学特征及异常变化可为地球内部地震孕育及断裂活动监测提供重要的科学依据(Zheng *et al*, 2013; Chen *et al*, 2018).

近年来，随着气体地球化学流动观测技术及相关学科基础研究的飞速发展，活动断裂带土壤气体地球化学流动观测技术发展迅猛(周晓成, 2011; Miklyaev *et al*, 2020). 大量观测研究显示，活动断裂带土壤气体(Rn, Hg, CO_2 等)的释放强度常与区域构造演化及地震活动密切相关(郭正府等, 2017; Shukla *et al*, 2020)，且断裂带的活动性越强，其土壤气体释放强度就越大(王江等, 2017; Yang *et al*, 2018)，因此借由活动断裂带土壤气体(Rn, Hg, CO_2 等)的地球化学特征变化能够识别隐伏断裂(Chiodini *et al*, 1999; Li *et al*, 2013; Fu *et al*, 2017b). 在新疆北天山活动构造带，土壤气体 CH_4 和 CO_2 的释放强度与各断裂带的活动强度及破裂程度呈正相关(Chen *et al*, 2019). 唐山地区土壤气 Rn, Hg 和 CO_2 浓度高值沿唐山断裂带的集中分布，进一步表明活动断裂带为地球深部气体的逸出通道(李营等, 2009; Li *et al*, 2013; 李静等, 2018)；且随该区域地震活动强度的增大，唐山断裂带土壤气 CO_2, Rn 和 He 浓度明显

上升(Han *et al*, 2014). 此外，唐山大地震等强震形成的构造破碎区，至今仍是地球脱气的重要通道(Zhou *et al*, 2016; Chen *et al*, 2018).

北京市作为我国的政治、经济和文化中心，市区及其周边地区的地震活动情况一直是全社会关注的焦点. 黄庄—高丽营断裂为北京市及其周边地区活动性较强的断裂之一，规模较大，跨越北京市南北，并且该断裂历史上曾发生过多次较强烈的地震. 自 2019 年 4 月至 2021 年 3 月，研究区内连续发生 5 次 M_L3.0—3.5 地震. 然而，目前关于黄庄—高丽营断裂仅见少数构造地质、大地测量和地球物理探测方面的报道(徐锡伟等, 2002; 张磊等, 2017a)，构造活动性方面的分析较为欠缺. 鉴于此，本文拟对断裂带土壤气体地球化学进行分析研究，深入剖析黄庄—高丽营断裂及其不同段的构造活动性特征，并通过建立土壤气 Rn 连续监测站对区域内的地震活动进行监控，以期揭示黄庄—高丽营断裂的活动性以及周边的地震活动，为北京市及其周边地区未来地震活动研判及跟踪观测部署提供参考.

1 地震地质概况

北京市地处地震设防烈度Ⅶ度以上地区，自公元 1 000 年以来，影响该地区的强震(M_S≥6.0)达 25 次之多(吴清, 高孟潭, 2018). 自 1967 年以来，北京地区小震震中主要沿黄庄—高丽营断裂和南口—孙河断裂分布，且多数地震发生于黄庄—高丽营断裂北部(杨景春等, 1981). 自公元 438 年至 2021 年，黄庄—高丽营断裂附近发生 *M*5.0 地震 12 次，*M*6.0 地震 5 次，1679 年 9 月 2 日发生 *M*8.0 地震 1 次(图 1).

黄庄—高丽营断裂北起北京市密云西田各庄，向南至河北省涞水附近，全长约 145 km，总体走向北东，倾向南东，倾角为 70°—80°，为新近纪隐伏断裂，是北京凹陷西界的主控断裂(图 1; 徐锡伟等, 2002; 张磊等, 2017a). 该断裂主要表现为正断倾滑性质，在大灰厂等地显示出右旋逆走滑分量. 断裂基岩深度附近垂直断距较大，向上延伸至第四系地层，产状逐渐变陡，呈“铲式”断裂的特点(汪良谋等, 1990). 根据黄庄—高丽营断裂的构造特点，以永定河为界，将其分成南北两段，南段大部分出露地表，北段则隐伏于平原之下，断裂活动强度总体表现为北强南弱(徐杰等, 1992). 断裂北段在全新世以来的强烈蠕滑变形过程中，沿断裂上盘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，局部表现为“Y”字形断裂组合特征，断裂两侧第四系地层落差在高丽营附近达 140—208 m，北段第四系地层的平均垂直位移速率为 0.11—0.17 mm/a (焦青等, 2005; 张磊等, 2017a, b). 而南段为晚更新世早期活动断裂，在芦井一带中更新统底界断距为 14 m，上更新统底界断距为 0.9 m，可能是 1658 年涞水 *M*6.0 地震的发震构造(周永恒等, 2021). 黄庄—高丽营断裂附近上部地层为第四系松散堆积层，沉积物成因类型较简单，以河流相冲积物为主体，下覆地层主要为古新世页岩或泥岩，断裂两端少量出露侏罗系晚期二长花岗岩、中生代砂岩及古生代白云岩(冯利斌, 2011).

2 土壤气体地球化学测量方法

2.1 土壤气体流动测量

在黄庄—高丽营断裂的北段西王路(XWL)剖面(剖面中心位置：116.5°E, 40.2°N)和南段大灰厂(DHC)剖面(剖面中心位置：116.1°E, 39.9°N)上，垂直断裂走向分别布置一条 NW-SE 方向的测线(图 1)，测线的中心尽量布设在该断裂附近. 在测线上布置 14—16 个浓

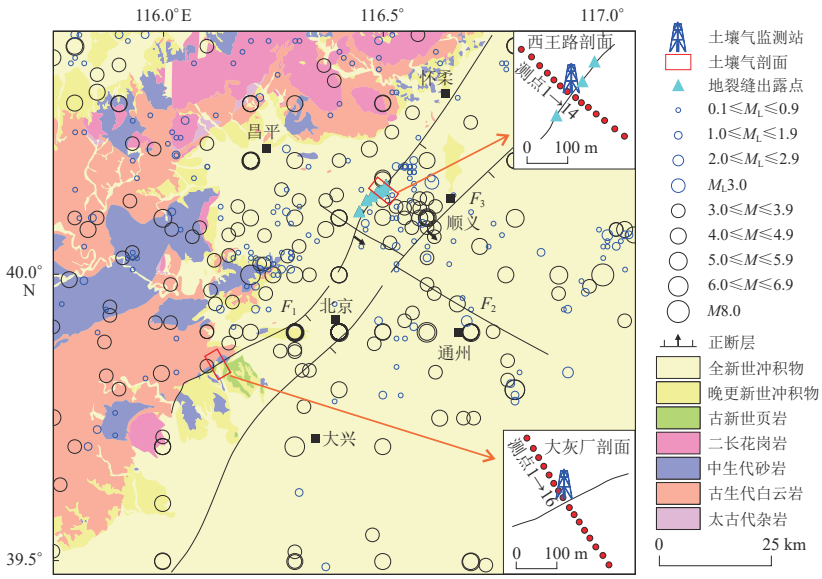

图 1 研究区地质图(改自马丽芳，2002)及地震分布图

F_1：黄庄—高丽营断裂；F_2：南口—孙河断裂；F_3：顺义—良乡断裂．黑色圆圈代表公元 438 年 12 月 24 日至 2020 年 5 月 26 日的地震事件，蓝色圆圈代表 2020 年 9 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日的地震事件(国家地震科学数字中心，2021a，b)；地裂缝位置引自刘明坤等(2014)、张磊等(2017a，b)和赵帅等(2018)；断裂数据引自邓起东等(2002)

Fig. 1 Schematic geological map (modified from Ma, 2002) and earthquakes in this study

F_1: Huangzhuang-Gaoliying fault; F_2: Nankou-Sunhe fault; F_3: Shunyi-Liangxiang fault. Black circles stand for the earthquakes from December 24, AD 438 to May 26, 2020, and blue circles for those from September 1, 2020 to June 30, 2021 (National Earthquake Data Center, 2021a, b). The locations of ground fissures are cited from Liu *et al* (2014), Zhang *et al* (2017a, b) and Zhao *et al* (2018). Fault data are cited from Deng *et al* (2003)

度测点，沿测线 NW 方向第一个测点记为点 1，测点间距介于 10—40 m 不等，其间距随距断裂面距离的增加而逐渐增大(图 2a)．另外，在断裂上、下盘各布设两个通量测量点，使其与断裂的距离分别为 15 m 和 45 m．为降低土壤结构、生物干扰及气象变化对测量结果的影响，均选取土壤结构类似、远离人为活动、植被少且单一的地区布设测线，且均在一天之内完成每条测线的测量工作．

土壤气野外流动测量采用与李营等(2009)和 Chen 等(2018)相同的方法．流动测量于 2017 年 5 月完成，该时段华北地区的气温相对稳定，且降雨较少，可以有效地避免整个野外测量期间气候因素带来的干扰和影响．土壤气 Hg 浓度和通量测量采用俄罗斯 LUMEX 公司生产的 RA-915＋型塞曼效应(Zeeman effect)测汞仪，设定流速为 10 L/min，检测限为 2 ng/m^3，标定误差为±3%．土壤气 CO_2 浓度和通量测量采用北京华云分析仪器研究所有限公司生产的 GXH-3010E 型便携式红外 CO_2 分析仪，设定流速为 0.5 L/min，检测限为 10^{-5}，标定误差为±2%．土壤气 Rn 浓度测量采用德国 SARAD 公司生产的 RTM2200 检测仪，设定流速为 0.5 L/min，检测分析限为 67 Bq/m^3，标定误差＜10%．土壤气 Rn 通量测量采用美国 Durridge 公司生产的 RAD7 检测仪，设定流速为 1 L/min，检测限为 4 Bq/m^3，标定误差为±5%．

土壤气浓度测量流程如下：首先在测量点处用钢钎打一个深约 80 cm 的孔洞，再将空心采样杆放置于孔内，密封后连接仪器进行测量(图 2b)．为了保证测量结果的准确性，对测值

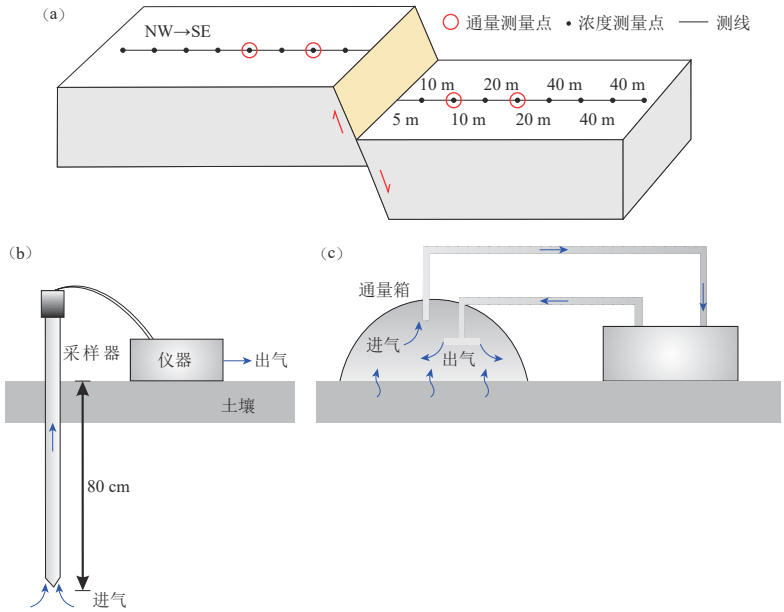

图 2　土壤气测点布设（a）、浓度测量方法（b）及通量测量方法（c）示意图

Fig. 2　Schematic diagrams for layout of measuring sites of soil gas (a) and measurement methods of soil gas concentration (b) and flux (c)

异常点至少进行两次复测．土壤气通量测量采取密闭气室法（图 2c），该方法是目前国际公认的测量土壤气释放通量的最佳方法（Chiodini *et al*，1999；Kitto，2005）．土壤气通量测量是通过将半径为 0.2 m 的通量箱与仪器相连，而后记录密闭气室内气体的累积浓度值与时间之间的变化关系而得到．测量过程中，记录土壤温度和大气压力，并采集地下 20 cm 处的土壤样品．

土壤气通量 F 的计算公式如下（Chiodini *et al*，1999）：

$$F=\frac{T_{\mathrm{std}}}{P_{\mathrm{std}}}\cdot\frac{V_{\mathrm{c}}P_{\mathrm{c}}}{T_{\mathrm{c}}A_{\mathrm{c}}}\cdot\frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t},\tag{1}$$

式中：P_{std} 为标准大气压强（101.325 kPa），T_{std} 为标准温度 0℃（273.15 K），V_{c} 为通量箱的体积（单位为 m^3），P_{c} 为通量箱内的气压（单位为 Pa），T_{c} 为通量箱内的温度（单位为 K），A_{c} 为通量箱覆盖的土壤面积（单位为 m^2），$\mathrm{d}c/\mathrm{d}t$ 为通量箱里的浓度增加速率．

2.2　土壤气体 Rn 连续监测

土壤气 Rn 连续监测是在断裂附近野外测量结果高值点的位置开挖一个 5 m 深的井（图 3），为便于气体循环，在集气孔底部铺设 20 cm 厚的砾石层，然后将北京赛睿环仪科技有限公司的 NRSM-D01 型地埋式土壤氡在线检测仪的探头置于井底，用黄土回填以便保持密封性．之后将在线监测仪与探头、太阳能供电系统、信号发射装置相连，每一小时记录一次土壤气体 Rn 浓度、气象数据和地下 5 m 处的土壤温度，并通过互联网传输至服务器．NRSM-D01 型地埋式土壤氡在线监测仪的测量范围为 200—5×10^7 $\mathrm{Bq/m^3}$，灵敏度≥0.02 cph/（$\mathrm{Bq\cdot m^{-3}}$）；该仪器使用能谱法测量 Rn 浓度，可以区分土壤中的 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn，且该仪器为被动采样，避免主动采样对氡扩散的影响．

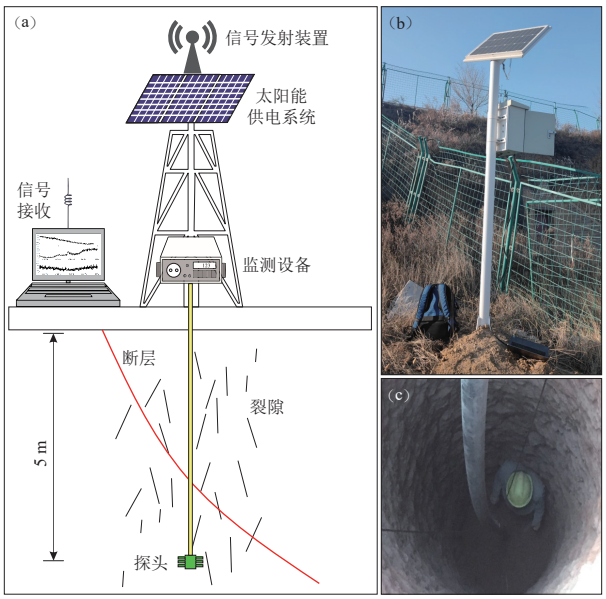

图 3 土壤气 Rn 连续监测站的示意图(a)和实际施工图(b)以及探头安装图(c)

Fig. 3 Schematic diagram (a) and actual construction drawing (b) of continuous monitoring station of soil gas Rn and probe installation (c)

3 土壤气地球化学测量结果

在黄庄—高丽营断裂现场测量土壤气体组分 CO_2，Rn 和 Hg 的浓度和通量，共获得 90 个浓度有效数据(表 1)以及 24 个通量有效数据(表 2)．由表 1 和表 2 可见本研究中，黄庄—高

表 1 黄庄—高丽营断裂土壤气体浓度

Table 1 The concentration of soil gases in the Huangzhuang-Gaoliying fault

点位	CO_2浓度	Rn浓度/(kBq·m^{-3})	Hg浓度/(ng·m^{-3})	点位	CO_2浓度	Rn浓度/(kBq·m^{-3})	Hg浓度/(ng·m^{-3})
DHC-1	0.71%	14.99	4	XWL-1	2.01%	26.21	5
DHC-2	0.68%	13.85	2	XWL-2	2.14%	20.77	4
DHC-3	0.42%	9.22	2	XWL-3	1.19%	17.88	5
DHC-4	1.19%	**33.68**	5	XWL-4	1.24%	19.69	4
DHC-5	0.64%	19.29	5	XWL-5	2.15%	28.37	4
DHC-6	**1.63%**	23.66	3	XWL-6	1.91%	**33.07**	5
DHC-7	0.55%	6.45	**6**	XWL-7	**2.84%**	22.86	3
DHC-8	0.81%	6.25	3	XWL-8	1.16%	23.32	3
DHC-9	0.94%	7.26	2	XWL-9	1.58%	29.92	**8**
DHC-10	0.42%	3.28	0	XWL-10	1.32%	20.84	1
DHC-11	0.71%	4.28	2	XWL-11	1.78%	27.36	5
DHC-12	0.83%	10.49	1	XWL-12	1.74%	28.57	4
DHC-13	0.17%	4.91	2	XWL-13	2.79%	22.99	2
DHC-14	0.50%	6.03	3	XWL-14	2.47%	31.12	4
DHC-15	0.54%	5.51	3	平均值	1.88%	25.21	4
DHC-16	0.32%	2.76	3				
平均值	0.69%	10.74	3				

表 2　黄庄—高丽营断裂土壤气体通量

Table 2　The flux of soil gases in the Huangzhuang-Gaoliying fault

点位	CO_2通量 /(g·m^{-2}·d^{-1})	Rn通量 /(mBq·m^{-2}·s^{-1})	Hg通量 /(ng·m^{-2}·h^{-1})	点位	CO_2通量 /(g·m^{-2}·d^{-1})	Rn通量 /(mBq·m^{-2}·s^{-1})	Hg通量 /(ng·m^{-2}·h^{-1})
DHC-1	**26.03**	**24.25**	**28.89**	XWL-1	**48.56**	54.01	0
DHC-2	25.29	16.46	0	XWL-2	29.95	45.32	**15.81**
DHC-3	13.05	0	0	XWL-3	17.55	50.20	0.27
DHC-4	0	1.01	0	XWL-4	24.59	**107.90**	0
平均值	16.09	10.43	7.22	平均值	30.16	64.36	4.02

丽营断裂土壤气 CO_2，Rn 和 Hg 浓度分别为 0.17%—2.84%，2.76—33.68 kBq/m^3 和 0—8 ng/m^3；土壤气 CO_2，Rn 和 Hg 通量分别为 0—48.56 g/(m^2·d)，0—107.90 mBq/(m^2·s)和 0—28.89 ng/(m^2·h)．

本文使用的土壤气 Rn 连续监测站数据的时段为 2020 年 9 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日，期间内 XWL 站 Rn 浓度为 29 531.10—78 218.80 Bq/m^3，平均值为 53 112.71 Bq/m^3；DHC 站 Rn 浓度为 1 241.56—18 278.80 Bq/m^3，平均值为 8 803.89 Bq/m^3．

4 分析与讨论

4.1 黄庄—高丽营断裂活动性分析

4.1.1 与首都圈其它断裂的活动性对比

首都圈地区为中国大陆地区的主要地震活动带之一，区域内大多数断裂为全新世以来的活动断裂，这些断裂活动性强，脱气强度大，自公元前 231 年以来共发生 M5.0 以上地震(包括 1679 年三河 M_S8.0 地震、1976 年唐山 M_S7.8 地震)200 余次(徐锡伟等，2002)，部分活动断裂带的 CO_2 通量最大值超过北方农田土壤 CO_2 通量最大值的 14 倍(李静等，2018)．近年来，为了满足首都圈地震重防区地震活动监测工作的重大需求，地震系统相关部门已陆续在首都圈地区的主要活动断裂带开展了土壤气体的地球化学流动测量(Li *et al*，2013；Han *et al*，2014；李静等，2018；赵建明等，2018；Chen *et al*，2018)，其中，王喜龙等(2017)通过野外流动测量系统地获取了首都圈地区 18 条主要活动断裂 35 个剖面上的土壤气体 CO_2 和 Rn 浓度和通量测值．

随着断裂活动性的增强，岩石中通常会产生新的破裂，这会增强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．因此，活动性较强的断裂，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)．将黄庄—高丽营断裂 DHC 剖面和 XWL 剖面的土壤气体 CO_2 和 Rn 浓度和通量的平均值与首都圈地区 18 条主要活动断裂上 35 个剖面的结果(所用仪器型号与本文一致，测量时间同为 5 月)进行对比，结果如图 4 所示，可见：黄庄—高丽营断裂 XWL 剖面上的 CO_2 和 Rn 浓度平均值分别高于首都圈地区 97% 和 92% 的测量剖面(图 4a)，其 CO_2 和 Rn 通量平均值分别高于首都圈地区 46% 和 89 % 的测量剖面(图 4b)；DHC 剖面上的 CO_2 和 Rn 浓度平均值分别高于首都圈地区 76% 和 73% 的测量剖面，其 CO_2 和 Rn 通量平均值分别高于首都圈地区 19% 和 22% 的测量剖面．夏垫断裂和唐山断裂是首都圈地区的两条超壳断裂，分别为 1679 年三河 M_S8.5 地震和 1976 年唐山 M_S7.8 地震的发震断裂．相较于这两条断裂，黄庄—高丽营断裂 XWL 剖面上的 CO_2 浓度平均值高于夏垫断裂的三个测量剖面和唐山断裂的两个测量剖面，

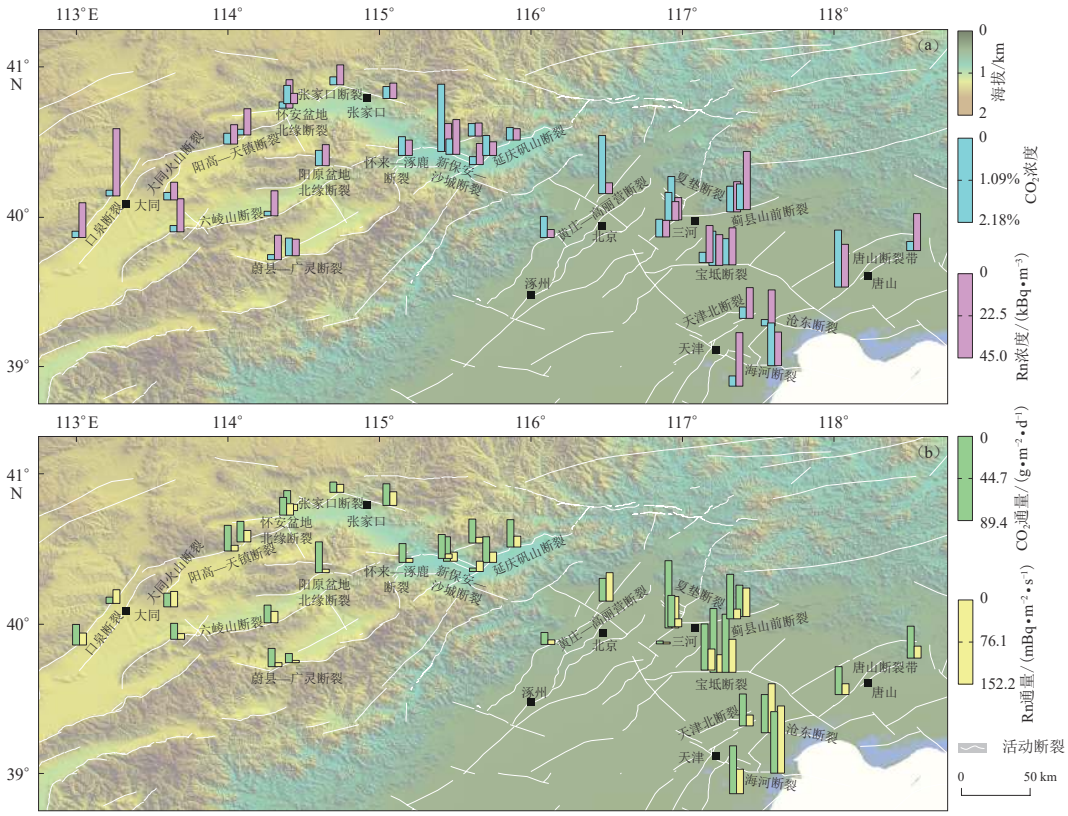

图 4 首都圈地区主要活动断裂带土壤气体 CO_2 和 Rn 的浓度(a)和通量(b)的平均值对比图

首都圈其它剖面数据引自王喜龙等(2017)；断裂数据引自邓起东等(2002)；DEM 数据来自 Bigemap 软件

Fig. 4 Comparison of the mean values of the soil gas (CO_2 and Rn) concentrations (a) and fluxes (b) in the fault zones in the capital area

The data of other profiles in the capital circle region of China are cited from Wang *et al* (2017).

Fault data are taken from Deng *et al* (2003), and DEM data are from Bigemap software

Rn 浓度平均值高于夏垫断裂的一个测量剖面和唐山断裂的两个测量剖面，Rn 通量平均值高于夏垫断裂的两个测量剖面和唐山断裂的两个测量剖面，CO_2 通量平均值高于夏垫断裂的一个测量剖面．上述对比分析表明，黄庄—高丽营断裂为目前首都圈地区活动性相对较强的活动断裂，可能存在一定的地震危险性．

4.1.2 土壤气体地球化学特征的影响因素

在非火山区，除断裂活动因素外，断裂带土壤气体地球化学特征还可能会受到季节(İnan *et al*，2012；Moreno *et al*，2016；Miklyaev *et al*，2020)、气象条件(Winkler *et al*，2001；Kitto，2005)、基岩类型(Baixeras *et al*，2001；Papp *et al*，2008)、植被及土壤化学组成(Lehmann *et al*，2000；Han *et al*，2014)等因素的影响．XWL 和 DHC 剖面为同一断裂的不同段，直线距离约为 46 km，这两条剖面均在同一天内完成测量，且测量期间无降雨．在测线布设时已选择植被相对较少的地区进行测量，以减少植被的影响．因此，气象条件和植被因素对土壤气体地球化学特征南北段差异的影响均可忽略不计．

在 XWL 剖面上，黄庄—高丽营断裂附近地层为第四系沉积物；在 DHC 剖面上，断裂上盘是震旦系灰岩，下盘为石炭—二叠系砂页岩(徐平，2006)．通常区域地层为花岗岩和酸性岩脉时，土壤气 Rn 浓度最高，其次为页岩、石灰岩和砂岩(Baixeras *et al*，2001)；此外，地下岩石中碳酸盐岩的分解也会导致土壤气 CO_2 浓度的增加(王云等，2015)．但是本研究土壤气测量结果反而是 XWL 剖面的 Rn 和 CO_2 浓度和通量均高于 DHC 剖面(表 1 和表 2)，因此岩石类型也不是影响区域土壤气体地球化学特征的主要因素．

对黄庄—高丽营断裂 DHC 剖面和 XWL 剖面地下 20 cm 土壤样品中的总碳(TC)，Hg，U 和 Ra 含量进行分析，结果显示两剖面的 U 和 Ra 含量相近，而 DHC 剖面土壤样品的 TC 和 Hg 含量远高于 XWL 剖面，分别为 XWL 剖面的 5.5 倍和 1.7 倍(表 3)．但是，XWL 剖面除了 Hg 通量平均值低于 DHC 剖面外，CO_2 和 Rn 浓度和通量的平均值以及 Hg 浓度平均值均高于 DHC 剖面(表 1 和表 2)，故土壤化学组成对地球化学特征的影响同样相对较小．

表 3　DHC 和 XWL 剖面土壤样品中的 TC，Hg，U 和 Ra 的含量

Table 3　The content of TC，Hg，U and Ra in the soil samples from the DHC and XWL profiles

剖面	TC含量	Hg含量 /(ng·g^{-1})	U含量 /(Bq·kg^{-1})	Ra含量 /(Bq·kg^{-1})
DHC	2.2%	91.0	25.2	20.0
XWL	0.4%	53.2	24.0	25.6

注：样品由核工业北京地质研究院分析测试中心进行检测

另外，土壤气体 CO_2 浓度与 Rn 浓度呈强相关性，CO_2 通量与 Rn 通量也呈中等相关性，而 Hg 浓度与 CO_2 浓度、Rn 浓度和通量之间，除了 Hg 浓度与 Rn 浓度呈中等相关性外，其它均为极弱相关或无相关(图 5)．由于 CO_2 为 Rn 从地下向上运移的载气，CO_2 浓度与 Rn 浓度之间的强相关性表明，黄庄—高丽营断裂 DHC 剖面和 XWL 剖面上 CO_2 和 Rn 气体主要受断裂活动的控制，断裂的活动增强了断裂带的渗透性，更有利于深部 CO_2 和 Rn 气体的集中释放(Yuce *et al*，2017；Chen *et al*，2018)．

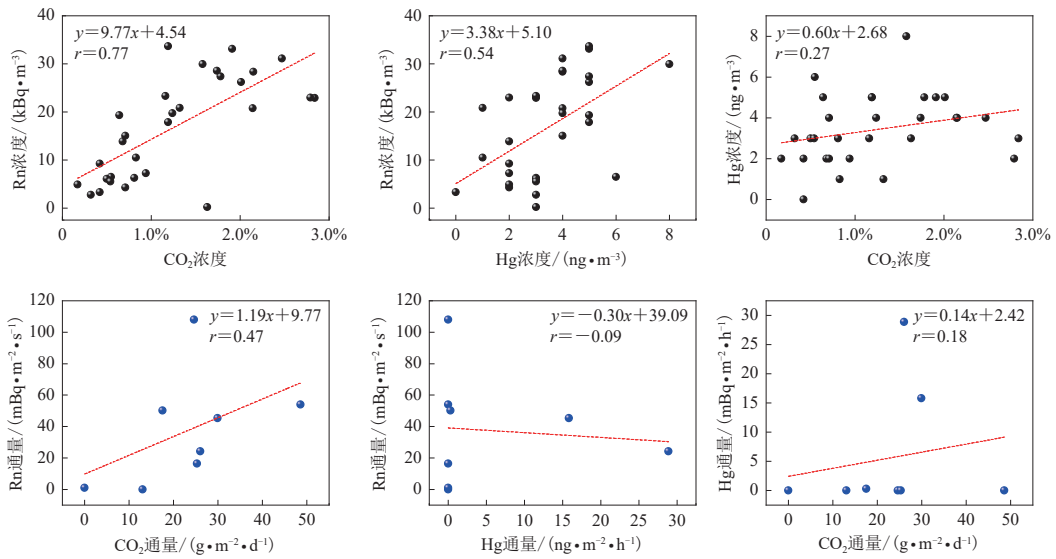

图 5　黄庄—高丽营断裂土壤气体 CO_2，Rn 和 Hg 浓度及通量相关性

Fig. 5　The correlativity among concentrations and fluxes of the soil gases CO_2，Rn and Hg on Huangzhuang-Gaoliying fault

因此，气象条件、基岩类型、植被及土壤化学组成均不是影响黄庄—高丽营断裂 DHC 剖面和 XWL 剖面土壤气地球化学特征差异的主要因素，两剖面的土壤气 Rn，Hg 和 CO_2 的排放可能主要受断裂活动的控制．

4.1.3 南、北段的土壤气地球化学特征对比

由于活动断裂是地下深部气体向上运移的良好通道，借由该通道来自地下深部的气体富集于断裂上方的土壤中．但由于断裂的活动性不同，地下岩石的破碎程度不同，同一条断裂的不同段通常会呈现不同的土壤气地球化学特征，并且断裂带土壤气的浓度和通量越高，断裂的活动性越强．因此，断裂带土壤气体地球化学特征是评估断裂活动的良好指标（Yang *et al*，2018；刘兆飞等，2019）．

据已有研究成果，在断裂带土壤气体浓度分布剖面中，高于异常上限的测值通常被视为与断裂活动有关的异常值，本研究将剖面土壤气体浓度平均值 $\overline{M}$ 加上一倍标准偏差 σ 作为异常上限（张慧等，2010；赵振燊等，2011；刘永梅等，2016）．此外，由于断裂带内部裂隙发育不连续性，异常区域通常涵括连续异常区域之间较小的非异常区域（Seminsky *et al*，2013，2014；刘兆飞，2020）．

从黄庄—高丽营断裂南段 DHC 剖面土壤气体 CO_2，Rn 和 Hg 浓度曲线图（图 6a）中可以观察到，断裂下盘土壤气体 CO_2，Rn 和 Hg 浓度出现异常，异常区域集中分布于距离断裂位

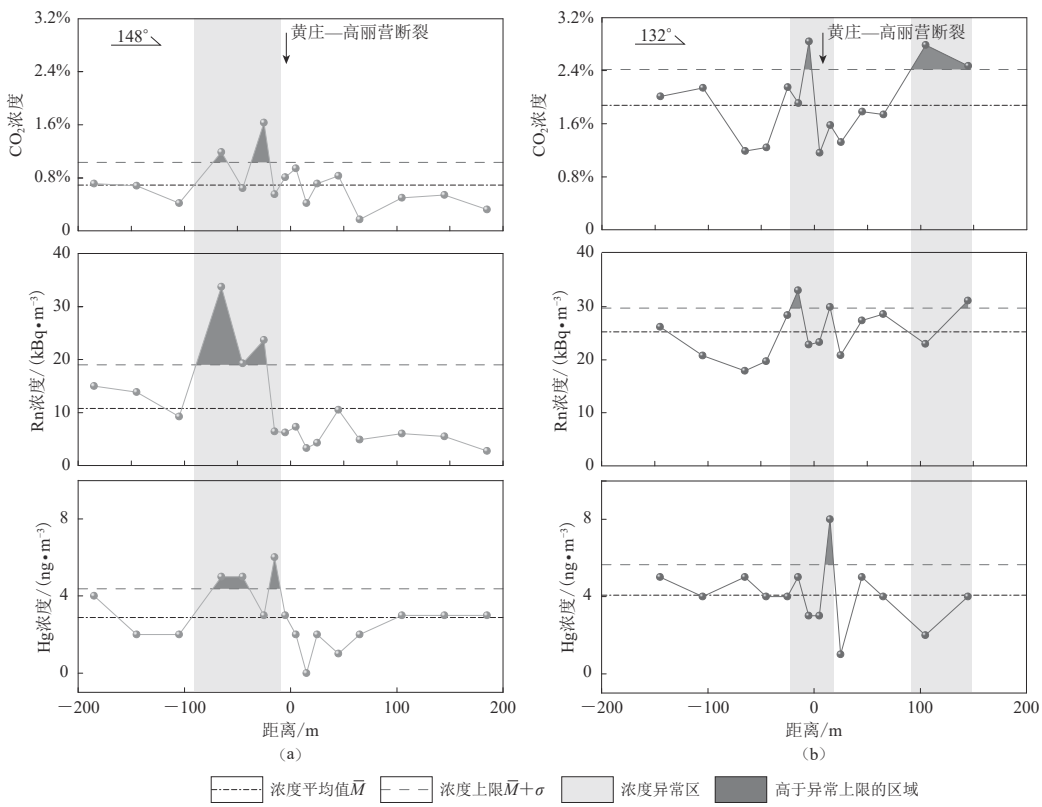

图 6 DHC 剖面(a)和 XWL 剖面(b)土壤气体 CO_2，Rn 和 Hg 浓度分布图

Fig. 6 Distribution of concentrations of soil gases CO_2，Rn and Hg on the DHC profile (a) and XWL profile (b)

置 100 m 的范围内，上盘土壤气体浓度略低于下盘．黄庄—高丽营断裂北段 XWL 剖面(图 6b)中，在断裂附近出现了一个土壤气体 CO_2，Rn 和 Hg 浓度异常区域．此外，在断裂上盘距断裂约 100 m 处也出现了一个土壤气体 CO_2 和 Rn 浓度异常区域．整体上，上盘土壤气体 CO_2 和 Rn 浓度明显高于下盘．张磊等(2017a，b)获取的浅层人工地震勘探资料揭示，黄庄—高丽营断裂北段为主断裂和次级断裂组成的“Y”字型断裂组合．该地震勘探剖面距离 XWL 剖面仅约 2 km，故推断 XWL 剖面土壤气浓度曲线呈双峰形态是由于断裂上盘存在一个反向次级断裂．

对比黄庄—高丽营断裂南段 DHC 剖面与北段 XWL 剖面的土壤气浓度和通量结果显示，北段 CO_2，Rn 浓度和通量以及 Hg 浓度明显高于南段，仅 Hg 通量低于南段，其中：XWL 剖面土壤气体 CO_2，Rn 和 Hg 浓度平均值分别为 DHC 剖面的 2.7 倍、2.3 倍和 1.4 倍，XWL 剖面土壤气体 CO_2 和 Hg 浓度最大值分别为 DHC 剖面的 1.7 倍和 1.3 倍，XWL 剖面的 Rn 浓度最大值接近于 DHC 剖面；XWL 剖面 CO_2 和 Rn 通量平均值分别为 DHC 剖面的 1.9 倍和 6.2 倍，CO_2 和 Rn 通量最大值分别为 DHC 剖面的 1.9 倍和 4.4 倍，Hg 通量平均值和最大值仅为 DHC 剖面的 0.6 倍和 0.5 倍(表 1 和表 2)．整体上，黄庄—高丽营断裂北段 XWL 剖面土壤气体浓度和通量均高于南段 DHC 剖面．

北京地区主应力方向和区域构造活动研究表明，黄庄—高丽营断裂的活动性具有明显的分段性，第四纪期间活动性由南向北逐渐增强，其南段第四纪活动不明显，北段第四纪活动强烈，平均滑移速率为 0.11—0.17 mm/a，且北段近年来断裂活动持续增强(徐锡伟等，2002；焦青等，2005)．1967 年以来发生在黄庄—高丽营断裂附近的地震，大多数集聚于断裂北部区段(杨景春等，1981)．另外，野外测量过程中，在黄庄—高丽营断裂北段地表可见规模性、集丛性的地裂缝(图 1)，多处有建筑墙体开裂和变形，裂缝宽度可达 50 m，活动速率介于 3.5—13.3 mm/a 之间(刘明坤等，2014；张磊等，2017a)，地裂缝的总体走向与所在位置断裂的走向一致，并存在持续向 NE 方向发展的趋势(赵帅等，2018)．郭萌等(2013)通过对探槽、物化探成果和地表裂缝监测数据的综合分析认为，黄庄—高丽营断裂北段形成的这些地裂缝为构造地裂缝，其形成和发育的控制因素和主要动力源于该断裂北段的构造活动．以上分析结果全面地揭示了黄庄—高丽营断裂北段的强构造活动，因此，本文推断黄庄—高丽营断裂活动北强南弱的特征是北段 XWL 剖面的土壤气体浓度和通量高于南段 DHC 剖面的主要原因．

4.2　土壤气连续监测站 Rn 浓度变化与地震活动的关系

为了更好地监测北京黄庄—高丽营断裂附近的地震活动，选取 XWL 剖面和 DHC 剖面土壤气 Rn 浓度最高的位置布设了两个土壤气体连续监测站，观测时间为 2020 年 9 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日，共计 303 天，每小时记录一个数据．期间研究区发生了 203 个地震事件，其中 $M0$—0.9 地震事件 155 个，$M1.0$—1.9 地震事件 44 个，$M2.0$ 地震事件 3 个，$M3.0$ 地震事件 1 个(图 1)．

由于土壤气 Rn 的时间序列常呈日周期性变化(Barbosa *et al*，2010)，因此本文采用连续监测站每日 24 小时的平均值，即日均值，来减小日周期性的影响(图 7a)．从 DHC 连续监测站的日均值变化可以观察到，DHC 站的 Rn 浓度日均值变化相对平缓，整体上呈“W”型，为下降—上升—下降—上升的趋势．两个低谷时间大致在 2020 年 10 月和 2021 年 5 月左右，最高峰大约出现在 2021 年 1 月．从 XWL 连续监测站的日均值变化可以观察到，XWL 站的

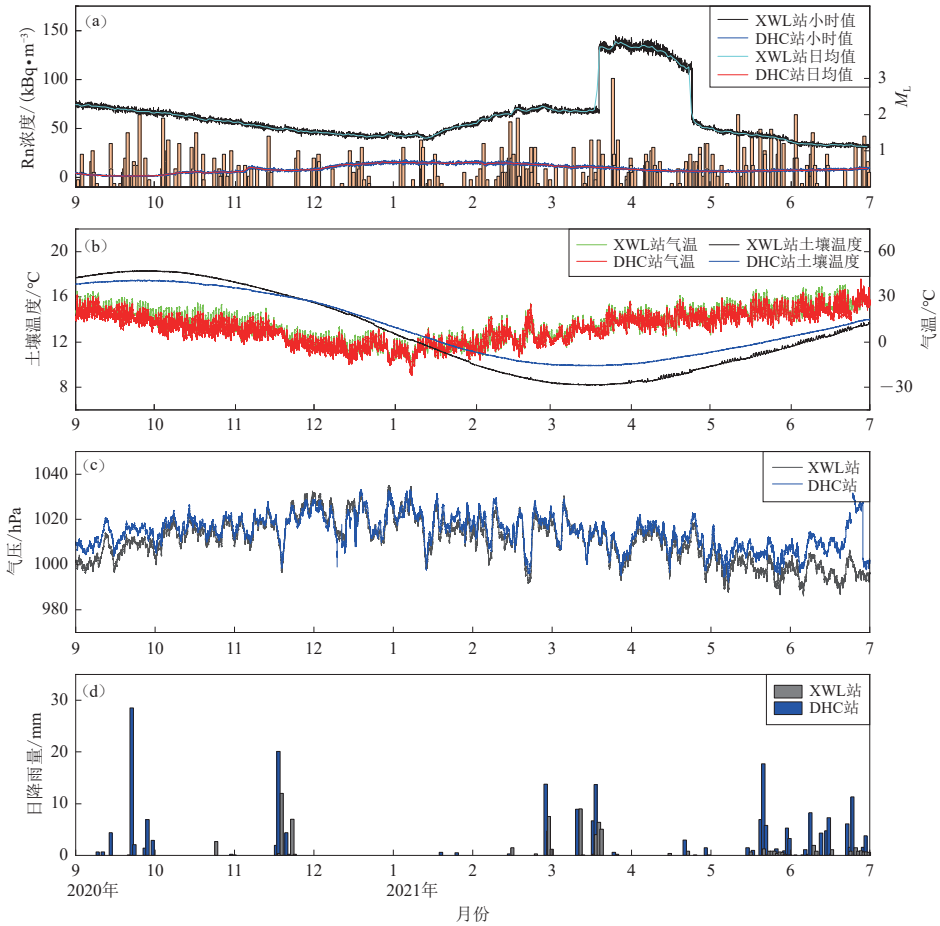

图 7 土壤气连续监测站的 Rn 浓度小时值、日均值变化和研究区内的地震事件(a)以及土壤温度、气温(b)、气压(c)和日降雨量(d)

Fig. 7 Hourly variation and daily mean variation of Rn concentration at continuous monitoring stations of soil gas and earthquake events in the study area (a), as well as soil temperature, atmospheric temperature (b), atmospheric pressure (c) and daily rainfall (d)

Rn 浓度日均值整体呈下降—上升—下降的趋势，在 2021 年 1 月左右达到一个低谷后上升，于 2021 年 4 月到达最高峰，然后持续下降．土壤 Rn 浓度的时间序列也常呈现夏高冬低的季节变化特征(İnan *et al*, 2012; Moreno *et al*, 2016; Miklyaev *et al*, 2020)，由图 7b 可以发现 XWL 连续监测站受到季节的影响程度高于 DHC 连续监测站．然而，这并不是导致 XWL 连续监测站 Rn 浓度曲线在 2021 年 4 月明显变化的原因．

图 7 为连续监测站 Rn 浓度与气象条件之间的关系，可以看出，XWL 和 DHC 连续监测站的气温、土壤温度以及气压变化曲线基本一致，相关系数分别为 1.00，0.99 和 0.87．虽然 XWL 和 DHC 剖面连续监测站的日降雨量有所差异(相关系数为 0.55)，但两站的降雨季节、降雨时间基本相同，仅降雨量存在差异．因此，若降雨量影响 Rn 浓度的变化，则 XWL 和 DHC 连续监测站的 Rn 浓度曲线应同步变化，仅变化幅度不同．综上所述，XWL 和 DHC 连续监测站所处的气象条件基本一致，因此气象条件不是导致 XWL 和 DHC 连续监测站 Rn 浓度

差异的主要因素．

此外，固体潮（周期为 14—15 d）对连续监测站 Rn 浓度的周期性影响同样不可忽视（Crockett *et al*，2006；Richon *et al*，2012；Barberio *et al*，2018），本文使用残差信号（residual signal）来消除固体潮的周期效应（Fu *et al*，2017a，b），Rn 浓度的残差信号 $R(t)$ 表示为：

$$R(t)=R_{\mathrm{Rn}}(t)-\overline{M}_{\mathrm{Rn}}(t), \tag{2}$$

式中 $R_{\mathrm{Rn}}(t)$ 为某一时刻 t 的 Rn 浓度日均值，$\overline{M}_{\mathrm{Rn}}(t)$ 为 t 时刻之前 14 天 Rn 浓度的滑动平均值，即：

$$\overline{M}_{\mathrm{Rn}}(t)=\frac{1}{14}\sum_{t-13}^{t}R_{\mathrm{Rn}}(t). \tag{3}$$

地震活动也是影响土壤气连续监测站 Rn 浓度变化的一个重要因素，从图 8a 中可见：地震的时间序列和周频次与 XWL 连续监测站 Rn 浓度曲线呈现出相同的变化趋势．2021 年 3 月至 5 月 Rn 浓度日均值出现明显的阶梯状突跳，明显偏离了正常浓度曲线，而在此时段内，

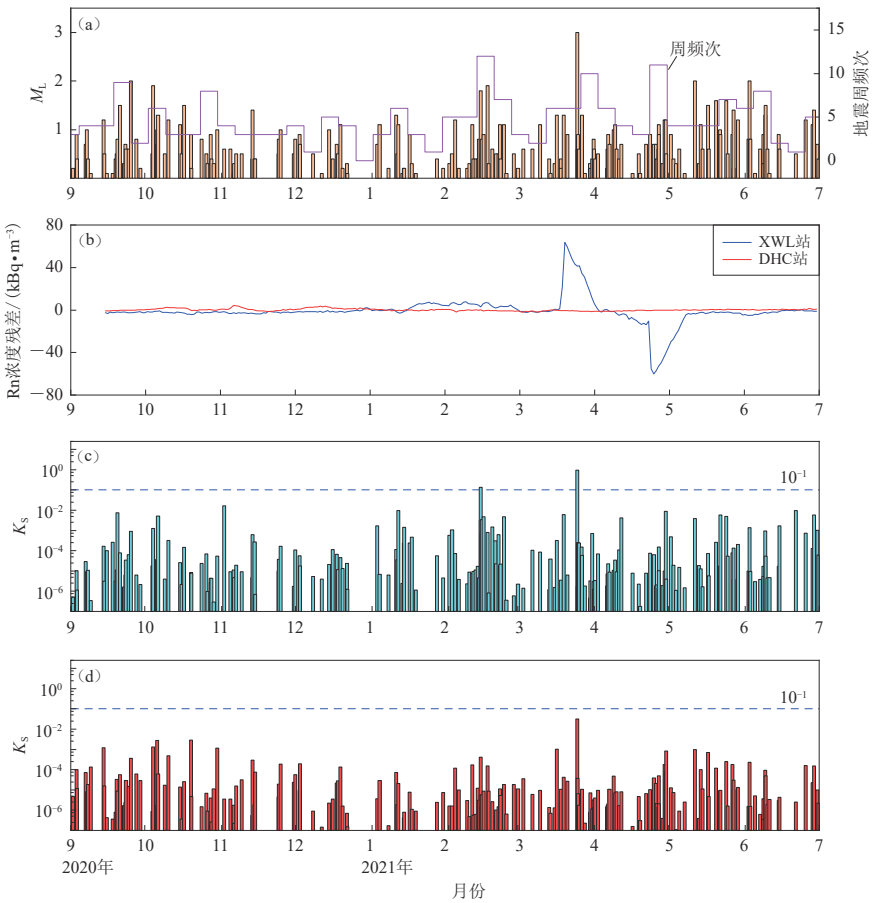

图 8　土壤气连续监测站地震事件和地震周频次（a）、Rn 浓度残差变化（b）以及 XWL 站（c）和 DHC 站（d）的 K_S 值变化

Fig. 8　Earthquake events and their weekly frequency (a), variations of residual of Rn concentrations at continuous monitoring stations of soil gases (b), and K_S variation at the stations XWL (c) and DHC (d)

2021 年 3 月 25 日北京顺义发生了一次 M_L3.0 地震，该地震距离 XWL 连续监测站仅约 10 km，因此，该突跳极有可能是该地震所致．M_L3.0 地震发生前 6 天 Rn 浓度突然增高了 1 倍，且在震后一天达到了峰值，为 144.81 kBq/m^3；震后 30 天 Rn 浓度持续稳定在一个较高的水平；直至 4 月 24 日，Rn 浓度才下降并恢复至正常水平，约 67 kBq/m^3．对于 2021 年 3 月 25 日 M_L3.0 地震，XWL 连续监测站的 Rn 浓度震前和震后异常持续时间总共约 36 天．

各地震事件的震级和震中距不同，其对连续监测站的影响也不同，为此本文使用地震指数 K_S 来评估地震活动对连续监测站的影响（Molchanov *et al*，2003；Schekotov *et al*，2007），即

$$K_S=(1+10^{-0.5M}R)^{-2.33}\frac{10^{0.75M}}{10R}, \tag{4}$$

式中，R 为震中距，M 为震级．

由式(4)可见，地震指数 K_S 可以有效地评估地震释放能量随震中距的衰减，地震指数与连续监测站处的地震能量成正比（Molchanov *et al*，2003；Schekotov *et al*，2007）．Biagi 等（2003，2006）通过地震指数和水文地球化学方法相结合研究了地震发生前后泉水中离子浓度、逸出气浓度和流速等异常变化的特征，并发现这些异常变化随着 K_S 值的增大而增强．Shukla 等（2020）通过地震指数和 2009—2017 年土壤气 Rn 连续监测数据对喜马拉雅加尔瓦尔地区中强地震的前兆异常进行了研究，结果显示 86% 的地震前土壤气 Rn 浓度出现异常．

DHC 连续监测站的 Rn 浓度残差曲线相对稳定，在−2.13—4.13 kBq/m^3 之间波动（图 8b），同时该监测站的 K_S 值相对较低（图 8d），且该站所处断裂位置的活动性较弱．因此，DHC 连续监测站并未对地震活动呈明显的响应．而 XWL 连续监测站的 Rn 浓度残差从 2021 年 3 月 19 日开始增加，并在 3 月 20 日达到最高值，为 63.71 kBq/m^3；随后持续下降，在 4 月 25 日达到最低值，为−60.19 kBq/m^3，并于 5 月 7 日恢复到正常水平（图 8b）．从 XWL 连续监测站 K_S 值（图 8c）可以观察到，2021 年 3 月 25 日 M_L3.0 地震和 2 月 16 日 M_L1.8 地震的 K_S 值均高于 0.1，但由于 M_L1.8 地震震级过小，XWL 连续监测站的 Rn 浓度并未出现明显的变化．因此，M_L3.0 地震的发生是导致 XWL 连续监测站 Rn 浓度变化的可能原因．综上所述，黄庄—高丽营断裂上的 XWL 连续监测站能够对该断裂附近的地震事件进行有效的监控．

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，这使得 Rn 浓度保持在背景值或较低水平，但随着应力的不断累积，岩石微裂隙发展、连通和破碎，进而导致 Rn 浓度不断升高（Girault *et al*，2017）．顺义 M_L3.0 地震前，XWL 连续监测站的 Rn 浓度曲线一直保持在一个相对稳定的水平（图 7a），这可能意味着地震前监测站周围的应力水平较低．此外，距 XWL 连续监测站 SW 向 830 m 处有一条方世渠，距离 4 km 处有一条温榆河，这两条水体的存在使得 XWL 监测站附近地层中的孔隙水含量相对较高．由于孔隙水的阻碍，^{226}Ra 衰变释放 α 粒子时的反冲能量难以让 Rn 从孔隙水中逃离，降低了 Rn 的扩散系数，从而抑制了 Rn 的运移（Phong Thu *et al*，2020）．因此低应力条件和孔隙水的共同作用，使地表观测到的 Rn 浓度并没有呈现明显变化．根据 Martinelli（1991）提出的膨胀-扩散模型可知：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快速地沿着断裂缝隙向上运移．在顺义地震发生前的孕震阶段，应力挤压导致微裂隙逐渐定向扩展和贯通，使孔隙和微裂隙中的气体沿黄庄—高丽营断裂释放，因此在震前 6 天形成了 Rn 浓度高峰．在地震发生过程中，由于震中距仅为 10 km，地震波的传播会导致孔隙和微裂

隙的振动（Zafrir *et al*，2009），促进了 Rn 的释放，使 Rn 浓度在震后一天达到了最高峰．由于应力的释放，微裂缝逐渐闭合，这也导致震后 Rn 浓度逐渐降低．当微裂缝与断裂不再贯通时，孔隙水的阻碍使 Rn 浓度迅速降低，最终恢复至正常状态．

5 结论

断裂带土壤气体地球化学是研究断裂活动性和地震活动监测的有效手段之一，本文在土壤气 CO_2，Rn 和 Hg 野外流动测量的基础上，对比了黄庄—高丽营断裂南北段的活动差异，并确定了土壤气 Rn 连续监测站的建设位置；通过土壤气监测站 2020 年 9 月 1 日至 2021 年 6 月 30 日的监测数据，利用残差法和地震指数 K_S 方法，对断裂附近的区域地震活动进行了分析．

土壤气流动测量结果表明，黄庄—高丽营断裂为首都圈地区活动性相对较强的活动断裂．与首都圈地区 18 条活动断裂土壤气体 CO_2，Rn 和 Hg 浓度和通量相比，黄庄—高丽营断裂土壤气体 CO_2，Rn 的浓度和通量以及 Hg 通量的最大值明显高于首都圈地区 60% 以上的断裂．

此外，在研究过程中发现，黄庄—高丽营断裂南北段存在活动性差异，断裂北段的活动性明显强于南段．断裂南段仅断裂附近存在土壤气体浓度异常区，断裂上盘土壤气浓度略低于下盘；而断裂北段在断裂附近和断裂上盘均出现土壤气体浓度异常区，且断裂上盘土壤气浓度明显高于下盘．整体上，断裂北段的土壤气体浓度和通量均高于南段．

与之前的研究相比，本文对黄庄—高丽营断裂的土壤气体地球化学特征进行了详细的研究，并首次在国内建立了土壤气体 Rn 连续观测站进行地震监测．本文结合残差法、地震指数 K_S 以及 XWL 和 DHC 土壤气连续监测站的 Rn 浓度数据，对黄庄—高丽营断裂附近的地震进行了研究．研究显示监测站的土壤气 Rn 浓度与土壤温度和土壤压力无明显相关性．此外，对于 2021 年 3 月 25 日北京顺义发生的 $M_L3.0$ 地震，震中距 10 km 的 XWL 监测站 Rn 浓度震前和震后异常总共持续了 36 天，并在震前 6 天出现异常，Rn 浓度增加了一倍．这表明监测站的土壤气 Rn 浓度对 $K_S>0.1$ 的地震有很好的响应．

本文的研究结果对于监测北京市及其周边地区未来地震活动具有重要现实意义．但由于北京地区震例较少，且土壤气 Rn 浓度连续监测站布设时间较短，暂时无法系统地建立区域地震活动与 Rn 浓度之间的经验公式．因此，在黄庄—高丽营断裂以及其它地区还需进行更多的实地考察和监测，以进一步揭示土壤气体与断裂活动、地震活动之间的关系机制，并探索更准确有效的地震监测方法．

参　考　文　献

陈志，杜建国，周晓成，崔月菊，刘雷，李营，张文来，高小其，许秋龙，王海涛．2014．2012 年 6 月 30 日新源 $M_S6.6$ 地震前后北天山泥火山及温泉的水化学变化[J]．地震，**34**(3)：97–107．

Chen Z，Du J G，Zhou X C，Cui Y J，Liu L，Li Y，Zhang W L，Gao X Q，Xu Q L，Wang H T．2014．Hydrogeochemical changes of mud volcanoes and springs in North Tianshan related to the June 30，2012 Xinyuan $M_S6.6$ earthquake[J]．*Earthquake*，**34**(3)：97–107（in Chinese）．

邓起东，张培震，冉勇康，杨晓平，闵伟，楚全芝．2002．中国活动构造基本特征[J]．中国科学：地球科学，**32**(12)：1020–1030．

Deng Q D，Zhang P Z，Ran Y K，Yang X P，Min W，Chu Q Z．2003．Basic characteristics of active tectonics of China[J]．*Sci-*

ence in China: *Series D*, **46**(4): 356–372.

冯利斌. 2011. 北京未来科技城地裂缝成因机理及其防治对策研究[D]. 西安: 长安大学: 1–80.

Feng L B. 2011. *The Study on Formation Mechanism and Prevention Countermeasures of Ground Fissures in the Future Science and Technology City of Beijing*[D]. Xi'an: Chang'an University: 1–80 (in Chinese).

国家地震科学数字中心. 2021a. 中国历史地震目录[EB/OL]. [2021-07-01]. https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=earthquake_lsdz.

National Earthquake Data Center. 2021a. Catalogue of Chinese historical earthquakes[EB/OL]. [2021-07-01]. https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=earthquake_lsdz (in Chinese).

国家地震科学数字中心. 2021b. 中国台网正式地震目录[EB/OL]. [2021-07-01]. https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=earthquake_zhengshi.

National Earthquake Data Center. 2021b. Formal earthquakes catalogue of Chinese Seismic Networks[EB/OL]. [2021-07-01]. https://data.earthquake.cn/datashare/report.shtml?PAGEID=earthquake_zhengshi (in Chinese).

郭萌, 王荣, 王海刚, 姜媛, 刘明坤, 田芳. 2013. 北京土沟—高丽营地裂缝成因分析[J]. 城市地质, **8**(2): 5–8.

Guo M, Wang R, Wang H G, Jiang Y, Liu M K, Tian F. 2013. Discussion on the origin of Tugou-Gaoliying ground fissure[J]. *Urban Geology*, **8**(2): 5–8 (in Chinese).

郭正府, 郑国东, 孙玉涛, 张茂亮, 张丽红, 成智慧. 2017. 中国大陆地质源温室气体释放[J]. 矿物岩石地球化学通报, **36**(2): 204–212.

Guo Z F, Zheng G D, Sun Y T, Zhang M L, Zhang L H, Cheng Z H. 2017. Greenhouse gases emitted from geological sources in China[J]. *Bulletin of Mineralogy*, *Petrology and Geochemistry*, **36**(2): 204–212 (in Chinese).

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.

Jiao Q, Qiu Z H, Fan G S. 2005. Analysis on recent tectonic activity and seismicity of Babaoshan-Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(4): 50–54 (in Chinese).

李静, 陈志, 陆丽娜, 周晓成, 李营. 2018. 夏垫活动断裂CO_2、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.

Li J, Chen Z, Lu L N, Zhou X C, Li Y. 2018. Degassing of CO_2, Rn and Hg from the Xiadian active fault and their environmental significance[J]. *Bulletin of Mineralogy*, *Petrology and Geochemistry*, **37**(4): 629–638 (in Chinese).

李营, 杜建国, 王富宽, 周晓成, 盘晓东, 魏汝庆. 2009. 延怀盆地土壤气体地球化学特征[J]. 地震学报, **31**(1): 82–91.

Li Y, Du J G, Wang F K, Zhou X C, Pan X D, Wei R Q. 2009. Geochemical characteristics of soil gas in Yanqing-Huailai basin, North China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(1): 82–91 (in Chinese).

刘明坤, 贾三满, 陈柘舟, 郭高轩. 2014. 北京平原区高丽营地裂缝带活动性及灾害特征研究[J]. 上海国土资源, **35**(4): 53–57.

Liu M K, Jia S M, Chen Z Z, Guo G X. 2014. Study of the activity and impact of the Gaoliying ground fissure on the Beijing plain[J]. *Shanghai Land and Resources*, **35**(4): 53–57 (in Chinese).

刘永梅, 王华林, 王纪强, 周晓成, 孙玉涛, 陈志. 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.

Liu Y M, Wang H L, Wang J Q, Zhou X C, Sun Y T, Chen Z. 2016. Geochemical characteristics of soil gas (Rn, CO_2 and Hg) in the Shandong section of Tanlu fault zone[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **37**(1): 63–69 (in Chinese).

刘兆飞, 李营, 陈志, 崔月菊, 路畅, 杨江, 赵元鑫. 2019. 吉兰泰断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.

Liu Z F, Li Y, Chen Z, Cui Y J, Lu C, Yang J, Zhao Y X. 2019. Gas emission from active fault zones around the Jilantai faulted depression basin and its implications for fault activities[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **41**(5): 613–632 (in Chinese).

刘兆飞. 2020. 鄂尔多斯西缘断裂带土壤气体地球化学特征[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所: 1–76.

Liu Z F. 2020. *Soil Gas Geochemistry Characteristics in the Western Margin of the Ordos Block*[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration: 1–76 (in Chinese).

马丽芳. 2002. 中国地质图集 [M]. 北京：地质出版社：1–348.

Ma L F. 2002. *Geological Atlas of China*[M]. Beijing：Geology Publishing House：1–348（in Chinese）.

苏鹤军，张慧，李晨桦，伍剑波，周慧玲. 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.

Su H J，Zhang H，Li C H，Wu J B，Zhou H L. 2013. Geochemical features of fault gas on northern margin fault of Xiqinling and its seismic hazard analysis[J]. *China Earthquake Engineering Journal*，**35**(3)：671–676（in Chinese）.

陶明信，徐永昌，史宝光，蒋忠惕，沈平，李晓斌，孙明良. 2005. 中国不同类型断裂带的地幔脱气与深部地质构造特征 [J]. 中国科学：地球科学，**35**(5)：441–451.

Tao M X，Xu Y C，Shi B G，Jiang Z T，Shen P，Li X B，Sun M L. 2005. Characteristics of mantle degassing and deep-seated geological structures in different typical fault zones of China[J]. *Science in China*：*Series D*，**48**(7)：1074-1088.

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.

Wang J，Li Y，Chen Z. 2017. Gas geochemistry and activity of the Kouquan fault in Shanxi Province[J]. *Earthquake*，**37**(1)：39–51（in Chinese）.

汪良谋，徐杰，黄秀铭，方仲景，张裕明，王辉. 1990. 北京拗陷构造活动性分析 [J]. 中国地震，**6**(2)：27–38.

Wang L M，Xu J，Huang X M，Fang Z J，Zhang Y M，Wang H. 1990. An analysis on the tectonic activities in Beijing down-warped basin[J]. *Earthquake Research in China*，**6**(2)：27–38（in Chinese）.

王喜龙，李营，杜建国，陈志，周晓成，李新艳，崔月菊，王海燕，张志宏. 2017. 首都圈地区土壤气 Rn，Hg，CO_2 地球化学特征及其成因 [J]. 地震学报，**39**(1)：85–101.

Wang X L，Li Y，Du J G，Chen Z，Zhou X C，Li X Y，Cui Y J，Wang H Y，Zhang Z H. 2017. Geochemical characteristics of soil gases Rn，Hg and CO_2 and their genesis in the capital area of China[J]. *Acta Seismologica Sinica*，**39**(1)：85–101（in Chinese）.

王云，赵慈平，冉华，陈坤华. 2015. 地壳流体 CO_2 的释放与地震关系：回顾与展望 [J]. 地震研究，**38**(1)：119–130.

Wang Y，Zhao C P，Ran H，Chen K H. 2015. The relationship between the release of crustal fluid CO_2 and earthquake：Retrospect and prospect[J]. *Journal of Seismological Research*，**38**(1)：119–130（in Chinese）.

吴清，高孟潭. 2018. 北京地区与雄安新区地震危险性相关性初探 [J]. 地震地质，**40**(4)：935–943.

Wu Q，Gao M T. 2018. A preliminary study on the correlativity of seismic hazard between Beijing area and Xiong'an new area[J]. *Seismology and Geology*，**40**(4)：935–943（in Chinese）.

徐杰，汪良谋，方仲景，张裕明，王辉，黄秀铭，杨主恩，计凤桔. 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.

Xu J，Wang L M，Fang Z J，Zhang Y M，Wang H，Huang X M，Yang Z E，Ji F J. 1992. Preliminary analysis of the tectonic activities of Babaoshan and Huangzhuang-Gaoliying faults in Beijing area[J]. *North China Earthquake Sciences*，**10**(3)：1–11（in Chinese）.

徐平. 2006. 北京市地震监测志 [M]. 北京：地震出版社：1–335.

Xu P. 2006. *Earthquake Monitoring Records in Beijing*[M]. Beijing：Seismological Press：1–335（in Chinese）.

徐锡伟，吴卫民，张先康，马胜利，马文涛，于贵华，顾梦林，江娃利. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震 [M]. 北京：科学出版社：1–376.

Xu X W，Wu W M，Zhang X K，Ma S L，Ma W T，Yu G H，Gu M L，Jiang W L. 2002. *Latest Crustal Tectonic Change and Earthquakes in the Capital Area of China*[M]. Beijing：Science Press：1–376（in Chinese）.

杨景春，林伟凡，蒋铭，李格平. 1981. 北京八宝山断裂带近期构造活动及其和地震的关系 [J]. 地震学报，**3**(4)：390–398.

Yang J C，Lin W F，Jiang M，Li G P. 1981. Recent tectonic movement of the Babaoshan fault near Beijing and its relation to earthquake occurrences[J]. *Acta Seismologica Sinica*，**3**(4)：390–398（in Chinese）.

张慧，张新基，苏鹤军，刘旭宙. 2010. 兰州市活动断层土壤气汞、氡地球化学特征场地试验 [J]. 西北地震学报，**32**(3)：273–278.

Zhang H，Zhang X J，Su H J，Liu X Z. 2010. Field test on the geochemical features of radon and mercury from soil gas on the active faults in Lanzhou[J]. *Northwestern Seismological Journal*，**32**(3)：273–278（in Chinese）.

张磊，白凌燕，赵勇，张晓亮，杨天水，蔡向民，何付兵. 2017a. 北京南口—孙河断裂与黄庄—高丽营断裂交会区沉积速率差异对断裂活动性的响应[J]. 地震地质，**39**(5)：1048–1065.

Zhang L，Bai L Y，Zhao Y，Zhang X L，Yang T S，Cai X M，He F B. 2017a. The difference of deposition rate in the boreholes at the junction between Nankou-Sunhe fault and Huangzhuang-Gaoliying fault and its response to fault activity in the Beijing area[J]. *Seismology and Geology*，**39**(5)：1048–1065（in Chinese）.

张磊，张晓亮，白凌燕，杨天水，蔡向民，梁亚南. 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.

Zhang L，Zhang X L，Bai L Y，Yang T S，Cai X M，Liang Y N. 2017b. Activity study and disaster effect analysis of the north section of Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing[J]. *Journal of Geomechanics*，**23**(4)：548–557（in Chinese）.

赵建明，李营，陈志，刘兆飞，赵荣琦，荣伟健. 2018. 蔚县—广灵断裂和口泉断裂气体排放和断裂活动性关系[J]. 地震地质，**40**(6)：1402–1416.

Zhao J M，Li Y，Chen Z，Liu Z F，Zhao R Q，Rong W J. 2018. Correlation between gas geochemical emission and fault activity of the Yuxian-Guangling and Kouquan faults[J]. *Seismology and Geology*，**40**(6)：1402–1416（in Chinese）.

赵帅，孟勇琦，孙佳珺. 2018. 基于S波波速变化的北京市高丽营地区地裂缝发展趋势研究[J]. 地球科学前沿，**8**(7)：1123–1130.

Zhao S，Meng Y Q，Sun J J. 2018. Research in the trend of ground rupture development in Gaoliying of Beijing based on the variation of the S wave velocities[J]. *Advances in Geosciences*，**8**(7)：1123–1130（in Chinese）.

赵振燊，张慧，苏鹤军. 2011. 玛曲断裂带土壤气汞、氡地球化学特征[J]. 西北地震学报，**33**(4)：376–379.

Zhao Z S，Zhang H，Su H J. 2011. The geochemical features of mercury and radon on Maqu active fault[J]. *Northwestern Seismological Journal*，**33**(4)：376–379（in Chinese）.

周晓成. 2011. 汶川M_S8.0地震后川西地区的气体地球化学[D]. 合肥：中国科学技术大学：1–79.

Zhou X C. 2011. *Gas Geochemistry in Western Sichuan Related to* 12 *May* 2008 *Wenchuan* M_S8.0 *Earthquake*[D]. Hefei：University of Science and Technology of China：1–79（in Chinese）.

周永恒，杨肖肖，丰成君，张鹏，孟静，谭成轩，邓亚虹，宋焱勋，王继明. 2021. 北京平原区黄庄—高丽营断裂(房山—涞水段)第四纪活动特征的浅层综合探测证据[J]. 地球学报，**42**(5)：677–689.

Zhou Y H，Yang X X，Feng C J，Zhang P，Meng J，Tan C X，Deng Y H，Song Y X，Wang J M. 2021. Evidence of shallow synthetic exploration of Quaternary activity characteristics along Fangshan-Laishui section of Huangzhuang-Gaoliying fault in Beijing plain[J]. *Acta Geoscientica Sinica*，**42**(5)：677–689（in Chinese）.

Baixeras C，Erlandsson B，Font L，Jönsson G. 2001. Radon emanation from soil samples[J]. *Radiat Meas*，**34**(1/2/3/4/5/6)：441–443.

Barberio M D，Gori F，Barbieri M，Billi A，Devoti R，Doglioni C，Petitta M，Riguzzi F，Rusi S. 2018. Diurnal and semidiurnal cyclicity of Radon（^{222}Rn）in groundwater，Giardino Spring，central Apennines，Italy[J]. *Water*，**10**(9)：1276.

Barbosa S M，Zafrir H，Malik U，Piatibratova O. 2010. Multiyear to daily radon variability from continuous monitoring at the Amram tunnel，southern Israel[J]. *Geophys J Int*，**182**(2)：829–842.

Biagi P F，Molchanov O，Piccolo R，Minafra A，Ermini A，Capozzi V，Khatkevich Y M，Gordeev E I. 2003. Co-postseismic hydrogeochemical anomalies in a volcanic environment[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*，**3**(3/4)：263–267.

Biagi P F，Castellana L，Minafra A，Maggipinto G，Maggipinto T，Ermini A，Molchanov O，Khatkevich Y M，Gordeev E I. 2006. Groundwater chemical anomalies connected with the Kamchatka earthquake（M=7.1）on March 1992[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*，**6**(5)：853–859.

Chen Z，Li Y，Liu Z F，Wang J，Zhou X C，Du J G. 2018. Radon emission from soil gases in the active fault zones in the Capital of China and its environmental effects[J]. *Sci Rep*，**8**(1)：16772.

Chen Z，Li Y，Liu Z F，Zheng G D，Xu W，Yan W，Yi L. 2019. CH_4 and CO_2 emissions from mud volcanoes on the southern margin of the Junggar basin，NW China：Origin，output，and relation to regional tectonics[J]. *J Geophys Res：Solid Earth*，**124**(5)：5030–5044.

Chiodini G，Frondini F，Kerrick D M，Rogie J，Parello F，Peruzzi L，Zanzari A R. 1999. Quantification of deep CO_2 fluxes from Central Italy. Examples of carbon balance for regional aquifers and of soil diffuse degassing[J]. *Chem Geol*，

159(1/2/3/4)：205–222.

Crockett R G M，Gillmore G K，Phillips P S，Denman A R，Groves-Kirkby C J. 2006. Tidal synchronicity of built-environment radon levels in the UK[J]. *Geophys Res Lett*，**33**(5)：L05308.

Fu C C，Walia V，Yang T F，Lee L C，Liu T K，Chen C H，Kumar A，Lin S J，Lai T H，Wen K L. 2017a. Preseismic anomalies in soil-gas radon associated with 2016 *M*6.6 Meinong earthquake，southern Taiwan[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*，**28**(5)：787–798.

Fu C C，Yang T F，Tsai M C，Lee L C，Liu T K，Walia V，Chen C H，Chang W Y，Kumar A，Lai T H. 2017b. Exploring the relationship between soil degassing and seismic activity by continuous radon monitoring in the Longitudinal Valley of eastern Taiwan[J]. *Chem Geol*，**469**：163–175.

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 Planet Sci Lett*，**474**：409–418.

Han X，Li Y，Du J，Zhou X，Xie C，Zhang W. 2014. Rn and CO_2 geochemistry of soil gas across the active fault zones in the capital area of China[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*，**14**(10)：2803–2815.

İnan S，Kop A，Çetin H，Kulak F，Pabuçcu Z，Seyis C，Ergintav S，Tan O，Saatçılar R，Bodur M N. 2012. Seasonal variations in soil radon emanation：Long-term continuous monitoring in light of seismicity[J]. *Nat Hazards*，**62**(2)：575–591.

Kitto M E. 2005. Interrelationship of indoor radon concentrations，soil-gas flux，and meteorological parameters[J]. *J Radioanal Nucl Chem*，**264**(2)：381–385.

Lehmann B E，Lehmann M，Neftel A，Tarakanov S V. 2000. Radon-222 monitoring of soil diffusivity[J]. *Geophys Res Lett*，**27**(23)：3917–3920.

Li Y，Du J G，Wang X，Zhou X C，Xie C，Cui Y J. 2013. Spatial variations of soil gas geochemistry in the Tangshan area of northern China[J]. *Terr Atmos Ocean Sci*，**24**(3)：323–332.

Martinelli G. 1991. Fluidodynamical and chemical features of radon 222 related to total gases：Implications for earthquake predictions[C]//*Isotopic and Geochemical Precursors of Earthquakes and Volcanic Eruptions*. Vienna：International Atomic Energy Agency：48–62.

Miklyaev P S，Petrova T B，Marennyy A M，Shchitov D V，Sidyakin P A，Murzabekov M A，Lopatin M N. 2020. High seasonal variations of the radon exhalation from soil surface in the fault zones (Baikal and North Caucasus regions)[J]. *J Environ Radioact*，**219**：106271.

Molchanov O，Schekotov A，Fedorov E，Belyaev G，Gordeev E. 2003. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*，**3**(3/4)：203–209.

Moreno V，Bach J，Font L，Baixeras C，Zarroca M，Linares R，Roqué C. 2016. Soil radon dynamics in the Amer fault zone：An example of very high seasonal variations[J]. *J Environ Radioact*，**151**：293–303.

Papp B，Deák F，Horváth Á，Kiss Á，Rajnai G，Szabó C. 2008. A new method for the determination of geophysical parameters by radon concentration measurements in bore-hole[J]. *J Environ Radioact*，**99**(11)：1731–1735.

Phong Thu H N，Van Thang N，Hao L C. 2020. The effects of some soil characteristics on radon emanation and diffusion[J]. *J Environ Radioact*，**216**：106189.

Richon P，Moreau L，Sabroux J C，Pili E，Salaün A. 2012. Evidence of both M_2 and O_1 Earth tide waves in radon-222 air concentration measured in a subglacial laboratory[J]. *J Geophys Res*：*Solid Earth*，**117**(B12)：B12404.

Schekotov A Y，Molchanov O A，Hayakawa M，Fedorov E N，Chebrov V N，Sinitsin V I，Gordeev E E，Belyaev G G，Yagova N V. 2007. ULF/ELF magnetic field variations from atmosphere induced by seismicity[J]. *Radio Sci*，**42**(6)：RS6S90.

Seminsky K Z，Demberel S，Tugarina M A，Ganzorig D，Bornyakov S A. 2013. First estimates of soil radon activity in the fault zones of central Mongolia[J]. *Dokl Earth Sci*，**448**(1)：21–24.

Seminsky K Z，Bobrov A A，Demberel S. 2014. Variations in radon activity in the crustal fault zones：Spatial characteristics[J]. *Izv-Phys Solid Earth*，**50**(6)：795–813.

Shukla V，Chauhan V，Kumar N，Hazarika D. 2020. Assessment of Rn-222 continuous time series for the identification of anomalous changes during moderate earthquakes of the Garhwal Himalaya[J]. *Appl Radiat Isot*，**166**：109327.

Wakita H，Nakamura Y，Kita I，Fujii N，Notsu K. 1980. Hydrogen release：New indicator of fault activity[J]. *Science*，

210(4466): 188–190.

Winkler R, Ruckerbauer F, Bunzl K. 2001. Radon concentration in soil gas: A comparison of the variability resulting from different methods, spatial heterogeneity and seasonal fluctuations[J]. *Sci Total Environ*, **272**(1/2/3): 273–282.

Yang Y, Li Y, Guan Z J, Chen Z, Zhang L, Lü C J, Sun F X. 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]. *Appl Geochem*, **89**: 23–33.

Yuce G, Fu C C, D'Alessandro W, Gulbay A H, Lai C W, Bellomo S, Yang T F, Italiano F, Walia V. 2017. Geochemical characteristics of soil radon and carbon dioxide within the Dead Sea fault and Karasu fault in the Amik Basin (Hatay), Turkey[J]. *Chem Geol*, **469**: 129–146.

Zafrir H, Steinitz G, Malik U, Haquin G, Gazit-Yaari N. 2009. Response of Radon in a seismic calibration explosion, Israel[J]. *Radiat Meas*, **44**(2): 193–198.

Zheng G D, Xu S, Liang S Y, Shi P L, Zhao J. 2013. Gas emission from the Qingzhu River after the 2008 Wenchuan earthquake, Southwest China[J]. *Chem Geol*, **339**: 187–193.

Zhou X C, Chen Z, Cui Y J. 2016. Environmental impact of CO_2, Rn, Hg degassing from the rupture zones produced by Wenchuan M_S8.0 earthquake in western Sichuan, China[J]. *Environ Geochem Health*, **38**(5): 1067–1082.