

李瑞刚, 李晨桦, 苏鹤军, 等. 临潭—宕昌断裂带跨断层土壤气地球化学空间分布特征研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(6): 1462-1474. DOI:10.20000/j.1000-0844.20240113001

LI Ruigang, LI Chenhua, SU Hejun, et al. Geochemical spatial distribution characteristics of soil gas along the Lintan—Tanchang fault zone[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1462-1474. DOI:10.20000/j.1000-0844.20240113001

临潭—宕昌断裂带跨断层土壤气 地球化学空间分布特征研究

李瑞刚¹, 李晨桦^{1,2,3}, 苏鹤军^{1,2,3}, 周慧玲^{1,2,3}, 王岩鸿³, 万悦¹

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测野外研究站, 甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 活动断裂带气体地球化学空间分布特征分析是区域构造和断裂活动性分区(分段)及其地震危险性分析的重要方法之一。通过临潭—宕昌断裂带9条测线剖面的土壤气Hg、Rn浓度观测, 结合断裂带分段活动特性与大地热流背景数据, 开展不同分段气体浓度空间分布特征分析, 深入探讨土壤气地球化学空间分布的特征及成因。结果表明: 断层土壤气在临潭—宕昌断裂带具有明显的分段特征, 根据其活动特性可将断裂带分为东、西两段, 且断层土壤气地球化学空间分布与大地热流和地震活动之间存在良好的相关关系; 在断裂西段高热流区域, 中强地震频发, 但小震活动较弱, Hg、Rn浓度强度较低; 东段低热流区域, 中强地震较少, 但小震活动活跃, Hg、Rn浓度强度较高。研究结果作为区域地球化学背景特征, 可为今后地下流体异常活动分析提供重要依据, 对进一步跟踪未来可能发生地震的断层及其活动段具有重要意义。

关键词: 断层土壤气; 气体地球化学; 临潭—宕昌断裂带; 地震活动

中图分类号: P315.724

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)06-1462-13

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240113001

Geochemical spatial distribution characteristics of soil gas along the Lintan—Tanchang fault zone

LI Ruigang¹, LI Chenhua^{1,2,3}, SU Hejun^{1,2,3}, ZHOU Huiling^{1,2,3}, WANG Yanhong³, WAN Yue¹

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The study on geochemical spatial distribution characteristics of gas along the fault zone is an important method for analyzing the regional structure, activity segmentation, and seismic

收稿日期: 2024-01-13

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH2404A, XH21033); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务项目(2021IESLZ05)

第一作者简介: 李瑞刚(1998—), 男, 新疆库尔勒人, 硕士研究生, 主要从事构造地球化学及同位素地球化学研究。

E-mail: l1243240119@outlook.com.

通信作者: 李晨桦(1990—), 女, 甘肃庆阳人, 博士, 副研究员, 主要从事构造地球化学及同位素地球化学研究。

E-mail: lichdzj@163.com.

risk of the fault. In this study, we took the Lintan—Tanchang fault zone as study area and observed the soil gas Hg and Rn concentrations in 9 survey lines. We analyzed the spatial distribution characteristics of gas concentration in different fault sections by combining the characteristics of fault activity and the heat flow density. The study show results that the Lintan—Tanchang fault zone has obvious segmentation features. Base on the fault activity characteristics, the Lintan—Tanchang fault could be divided into two segments: east and west. And the spatial distribution of soil gas geochemistry is correlated with heat flow and seismic activity; The western section of the fault is an area of high heat flow, and strong seismic occur frequently in this section, but small seismic activity is weak, with lower Hg and Rn concentration intensity. While in areas with lower heat flow in eastern segment of fault, there are fewer strong seismic but intense small seismic activity, with higher Hg and Rn concentrations intensity. This study provides evidence of subsurface fluid activity in the study area, which is vital in tracing the faults and active segments with seismic risk.

Keywords: fault soil gas; gas geochemistry; Lintan—Tanchang fault; seismic activity

0 引言

地下流体是较为活跃的地球物质之一,深大断裂是地球深部热能和流体释放的主要通道之一^[1]。气体作为一种移动性和压缩性较强的流体,可沿活动断裂带逸出,导致断裂带附近土壤气地球化学浓度异常^[2-4]。国内外学者研究发现 Hg、H₂、Rn 与 CO₂ 等断层土壤气在地震发生前后常出现较为明显的浓度异常^[5-8]。深入研究发现这些异常特征与地震强度有关,通常地震震级越大土壤气异常幅度越大,震中距越近气体异常浓度越高,这为断裂活动性的空间分布特征提供了一种可行的研究方向^[9-12]。20 世纪 70 年代, Irwin 等^[13]通过对北美地区地震活动构造带附近的泉水进行分析,发现地震活动性强的区域存在 CO₂ 浓度异常高值区,监测该区域 CO₂ 排放浓度变化有助于分析断裂带的活动性及地震风险。2017 年 Fu 等^[14]在台湾省北部地区的活动断裂带建立了多个土壤气体自动监测站,经历一年的监测后发现,多数地震发生前几个小时甚至几天都存在高 Rn 浓度的异常现象。近年来,随着气体监测技术逐渐成熟,对活动断裂带土壤气体的分析研究成为分析地震危险性的有效手段之一^[15]。

临潭—宕昌断裂带结构复杂,分支较多,断裂全长约 250 km,总体可分为西段与东段两个区域。该断裂带经过临潭、岷县至宕昌,是西秦岭 NWW 向断裂系中的一个重要组成部分^[16]。因其复杂的构造地貌与强烈的活动性,断裂带上强震频发,如 1573 年岷县 6 $\frac{3}{4}$ 级、1837 年岷县 6 级、2003 年岷县

5.2 级、2013 年岷县—漳县 6.6 级、2019 年夏河 5.7 级地震等^[17-19]。这些地震给当地人民生命财产安全造成了严重危害,因此,对该区域未来地震危险性的判定引起了越来越多的关注。

近年来甘东南地区地震频发,但过去的研究主要集中在深大断裂及块体边界控制性断裂的气体分段特征分析上,对于块体内部临潭—宕昌断裂带气体分布特征的研究相对较少。临潭—宕昌断裂位于甘东南复杂的构造转换区内,其气体浓度是否存在与相邻边界断层相同的明显分段特性需要深入研究。因此,本文通过跨断层测量获取临潭—宕昌断裂土壤气浓度数据,开展 Hg 与 Rn 浓度强度及其空间分布特征分析,追踪断裂带不同活动段跨断层土壤气地球化学特征,以期分析临潭—宕昌断裂带地下流体孕震环境提供基础科学依据。

1 研究区地质背景

临潭—宕昌断裂带位于青藏高原东北缘东昆仑断裂带与西秦岭北缘断裂带过渡地区^[20],参与了西秦岭的形变分配,继承了东昆仑断裂带与西秦岭北缘断裂带的左旋走滑特性。其受到青藏高原东北缘的挤压以及鄂尔多斯块体的阻挡作用,产生了明显的逆冲变形的运动特征^[21]。断裂带总体呈 NWW—NW 向展布,倾向 NE,倾角 50°~70°,地貌主要呈现为 U 型谷,部分断层呈陡坎形态,形成向南弯曲的弧形构造^[22]。临潭—宕昌断裂带由西端的合作开始至岷县,发展出多条构造相似但规模不

同、错落分布的次级断裂,部分次级断裂较为复杂,发育有一条或多条分支。根据近年的研究结果,临潭—宕昌断裂带是一条晚第四纪活动断裂,活动性质自全新世早期以来发生过改变,是西秦岭内部活动性较强的断裂。前人研究结果表明该断裂带左旋滑动速率为 $0.86\sim 1.6\text{ mm/a}$,垂直滑动速率为 $0.05\sim 0.1\text{ mm/a}$,左旋走滑分量大于倾滑分量,总体呈左旋走滑性质,个别区域表现为向南逆冲^[23-24]。断

裂西段曾错断地表,区域构造应力逐渐积累,为孕震提供了适宜的环境^[25]。

根据中国地震台网地震目录记录分析,临潭—宕昌断裂带自全新世以来一直处于高度活跃状态,构造活动强烈,地震频发,2003—2019年就发生过6次 $M_s 5.0\sim 7.0$ 的中强震及多次不同规模的小震^[26]。中强震的震源位置与断裂带复杂的构造体系密切相关(图1)。

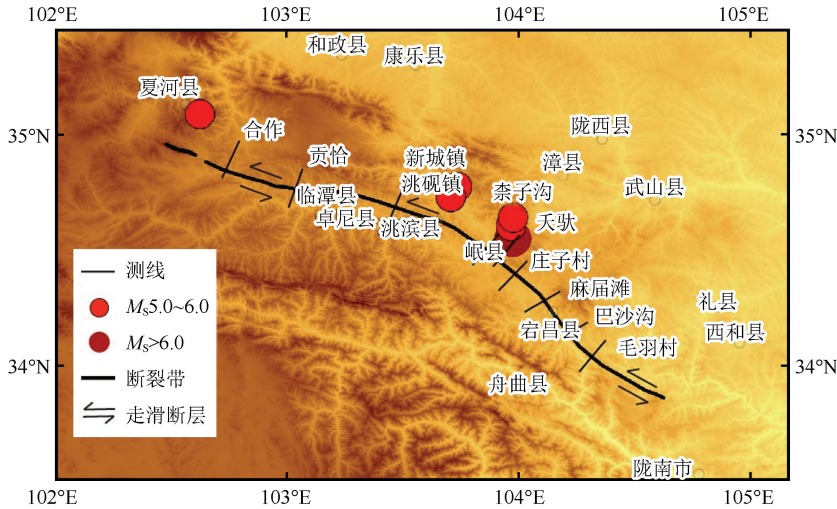


图1 临潭—宕昌断裂带测线布设图

Fig.1 Layout of measurement lines along the Lintan—Tanchang fault zone

2 采样与分析方法

本研究共布设了9条测线,每条测线均垂直或大角度相交于临潭—宕昌断裂带主断裂。其中,断裂带西段布设4条测线,东段布设5条测线,由西向东分别为合作、贡恰、新城镇、寨子沟、天驮、庄子村、麻届滩、巴沙沟、毛羽村(图1)。采集不同测线上的断层土壤气并进行浓度测量工作,记录气体Hg、Rn相关数据。由于气体在近地表会受到风速、风向等外界条件干扰,而地下1 m左右深度土壤气浓度较为稳定,故采样深度选取为地表下80 cm,共监测6~12组数据。采样时间为2022年6月每日9:00—18:00,为避免实验数据受到气象因素影响,选择天气状况稳定、良好的时间段进行野外采样。测量地点选择植被覆盖少,土壤下具有原始覆盖层的区域。测量过程中时刻监视仪器状态,保证仪器正常使用且未受到其他因素干扰,每日对所有采样仪器进行维护以减少误差,确保数据真实准确。

2.1 Hg 测量方法

气体Hg测量使用加拿大LUMEX公司生产的

RA-915M型号便携式测汞仪。仪器测量范围: $0.5\sim 200\text{ ng/L}$;测量相对误差不超过 $\pm 5\%$ 。测线垂直或大角度相交于主断裂带,每隔10 m布置一个测点,共计6~12组测点。测量方法采用打钎测量:首先,在选定区域以锤击钢钎凿出一个深度80 cm的孔洞;然后,将空心取样器插入其中并填埋周围土壤,避免地面空气稀释土壤气体;最后,使用橡胶管连接取样器与仪器,进行测量(图2)。仪器使用前

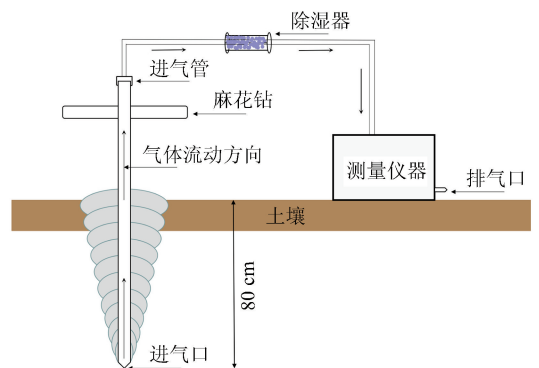


图2 土壤气浓度测定方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of measuring method of the soil gas concentration

需预热 2~10 min,数据无法保存,需人工选取每个测点最大值并记录。其中,巴沙沟测线测得的 Hg 浓度低于仪器检出限,无法获得准确数据,故下文对该测线的 Hg 气体不进行分析。

2.2 Rn 测量方法

气体 Rn 测量使用德国 Genitron 公司生产的 AlphaGUARD PQ2000 便携式测氡仪。仪器的操作范围为:2~200 000 Bq/L;温度:-10~+50 ℃;气压:70~110 Pa;相对湿度:0%~95%。测量地点选在 Hg 测点附近,打孔完毕后使用橡胶管与仪器连接测量,每个测点测量得到 10~15 组数据,最后根据规范作数据汇总及处理工作。

3 数据处理

由于不同断层或断层的不同段内部破碎程度不

同,气体渗透率不同,导致土壤气向地表的逸出强度不同,并在空间上表现出明显的差异性。这种差异性可能会受到土壤结构、测量环境、气象条件和人为因素的干扰。为减小场地因素对断层气特征的影响,采用单剖面均方差与平均值的计算方法,绘制断层单剖面土壤气浓度分布图(图 3、图 4)。

经计算与评估,使用最大值法计算土壤气浓度强度,使用异常下限确定浓度异常值的量值界限。

最大值法是选取一条测线上所有测点的最大浓度值 D_{max} ,将该测线的气体平均浓度作为数据处理的背景值 K ,二者的比值即为该测点的土壤气浓度强度 S :

$$S = D_{max} / K \quad (1)$$

异常下限是判断气体浓度曲线形态的重要依据。利用土壤气背景值 K 与测线浓度的均方差 δ ,

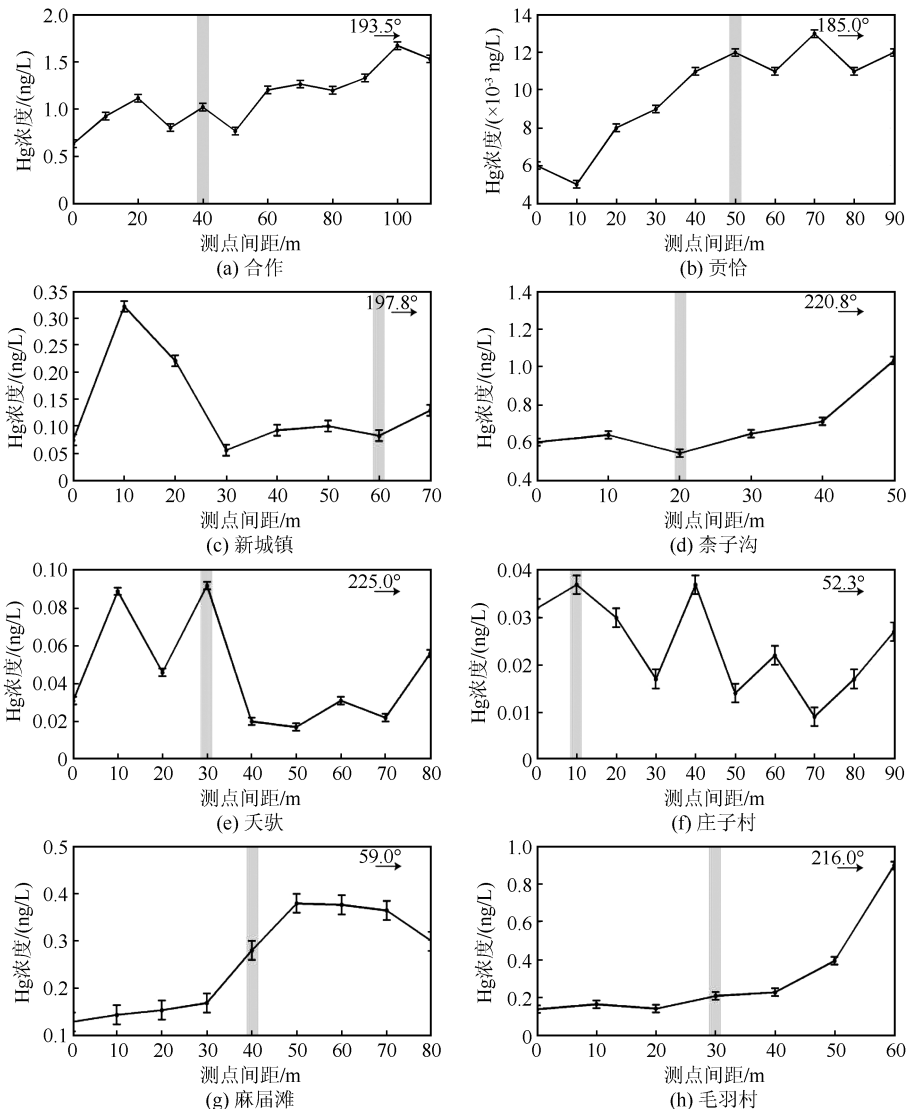


图 3 跨断层测量剖面 Hg 浓度曲线图

Fig.3 Curves of Hg concentration in cross-fault survey profiles

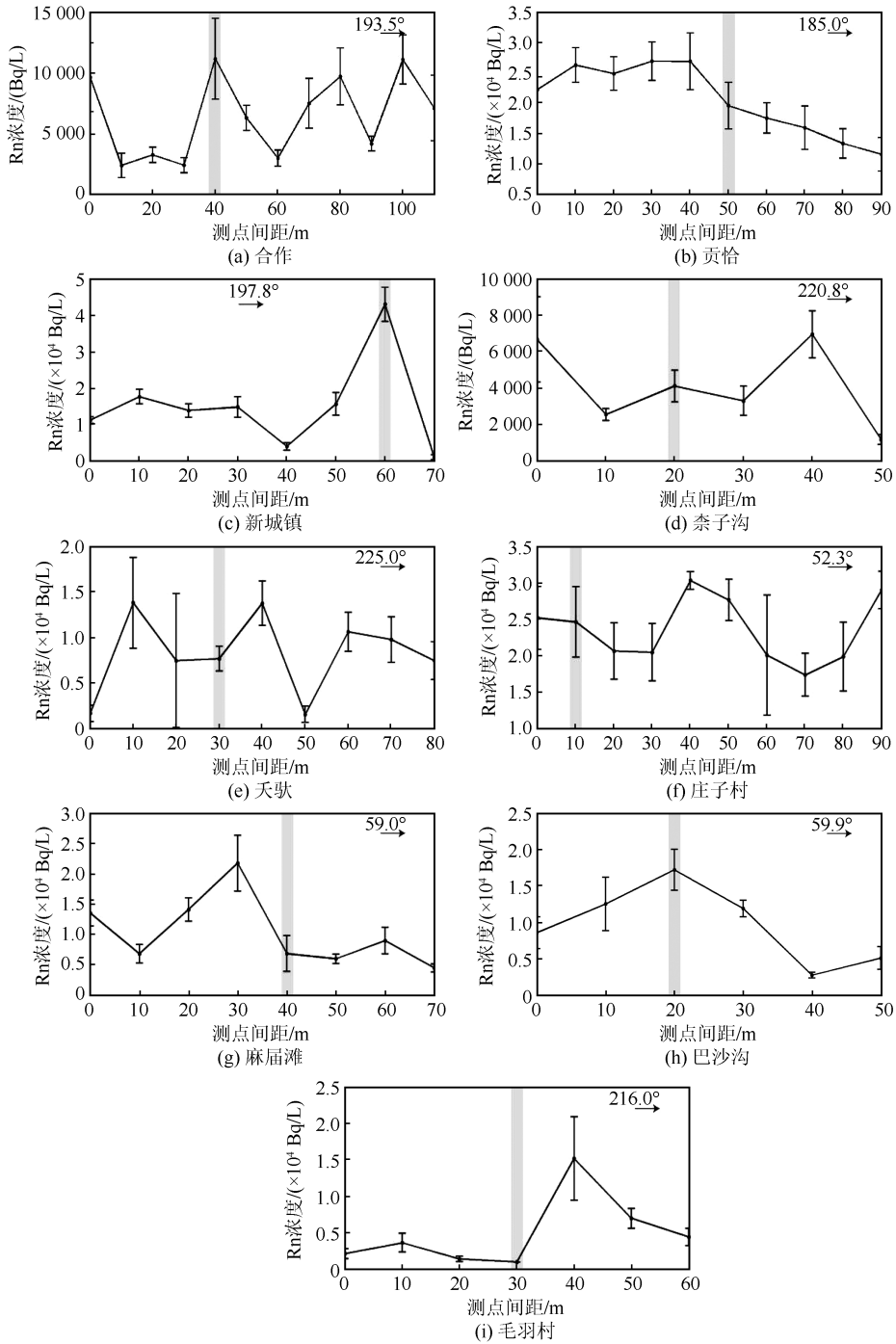


图 4 跨断层测量剖面 Rn 浓度曲线图

Fig.4 Curves of Rn concentration in cross-fault survey profiles

即可计算出各测线的异常下限 X_a [式(2)]。其中异常值可以用背景值加上“ n ”个标准差 ($n = 1, 2, 3, \dots$) 来表示,本文中 n 的取值为 1。

$$X_a = K + \delta \quad (2)$$

上述方法可以较大幅度地减小气体逸出的环境因素影响,更直观地表现各剖面浓度强度的峰值。因此,本文利用此方法,计算得出临潭—宕昌断裂带 9 条测线土壤气中 Hg、Rn 的最大值 D_{max} 、背景值

K 、浓度强度 S 和异常下限 X_a (表 1)。

4 分析与讨论

4.1 土壤气空间分布特征与临潭—宕昌断裂带活动性的关系

临潭—宕昌断裂带是东昆仑断裂系统和西秦岭断裂系统之间一个重要的转换纽带,其后期构造变形受到西秦岭北缘断裂向两侧的扩展与东昆仑断裂向

东北方向的推挤,因此断裂周边形成了复杂的应力构造环境。根据全球定位系统速率场变化情况可知,该断裂带呈 NWW—NW 向展布,且局部区域发生构造变形,断裂带上中强地震的孕育也是受到这种构造特征引起的断裂带附近的应力集中所致。断裂带自第四纪以来活动性质以向南逆冲为主,局部陡立或南倾,受到应力影响发生顺时针旋转,具有左旋走滑分量。断裂带自岷县向西北方向发育数条规模不同、相

互平行或斜接的次级断裂,其影响宽度范围为 5~10 km。岷县东南断裂带分布较为均一,以主断裂为主体,至宕昌以南,不同断裂段上的活动性差异较大。西秦岭北缘断裂走滑及向南北两侧逆冲的“花状构造”是临潭—宕昌断裂带上中强地震频发的重要动力因素。靠近西秦岭北缘断裂区域的构造应力容易集中释放,并且断裂带东段频繁发生地震可能会引起西段的应力调整,从而导致中强震的发生^[27-28]。

表 1 测线土壤气浓度、浓度强度、背景值与异常下限参数

Table 1 Concentration, concentration intensity, background value, and anomaly threshold of soil gas along the survey lines

测线	Hg				Rn			
	$D_{max}/(ng/L)$	$K/(ng/L)$	S	X_a	$D_{max}/(Bq/L)$	$K/(Bq/L)$	S	X_a
合作(HZ)	1.673	1.122	1.491	1.434	15 600.000	6 496.392	2.401	10 229.229
贡恰(GQ)	0.013	0.010	1.327	0.012	31 488.000	2 0291.692	1.552	26 636.108
新城镇(XCZ)	0.322	0.134	2.396	0.226	49 664.000	15 725.716	3.158	28 975.234
柰子沟(NZG)	1.031	0.692	1.492	0.867	9 970.000	4 466.744	2.232	6 772.678
禾驮(YT)	0.092	0.045	2.029	0.074	20 480.000	9 612.964	2.130	14 769.077
庄子村(ZZC)	0.037	0.024	1.529	0.034	37 120.000	24 073.276	1.542	30 911.433
麻届滩(MJT)	0.378	0.254	1.489	0.360	91 100.000	10 259.063	8.880	21 232.135
巴沙沟(BSG)	-	-	-	-	19 900.000	9 661.667	2.060	15 001.668
毛羽村(MYC)	0.896	0.311	2.878	0.584	20 400.000	6 017.045	3.390	11 368.962

根据断裂几何形态展布特征及其所处的大地热流分布特征,以岷县为界将临潭—宕昌断裂带分为东、西两段:西段包括合作、贡恰、新城镇与柰子沟,东段包括禾驮、庄子村、麻届滩、巴沙沟与毛羽村。由表 1 可知,临潭—宕昌断裂带 Hg 与 Rn 浓度强度范围分别为 1.327~2.878 与 1.542~8.880;Hg 浓度强度高值位于毛羽村测线,Rn 浓度强度高值位于麻届滩测线,均分布于断裂东段。两种气体浓度强度高值点在断裂带上表现出一致的空间分布特征,气体逸出较为同步,受相似的断层活动性控制。气体逸出通道除受断层活动性影响外,还与各类气体自身的密度和固有特性有关^[29-30]。

由图 3、4 可知:Hg、Rn 土壤气浓度曲线整体呈现单峰异常状态,异常峰值集中分布在断层周围 10~30 m 范围内,推断所测量断裂带区域近年来活动性较强,地下裂隙连通性稳定,为土壤气向地表逸出提供了较通畅的环境;少部分测线形态呈现多峰聚集模式,以断层为中心的 20~50 m 内 Hg 与 Rn 浓度出现多个峰值,在其余范围内浓度变化趋于平缓并形成一“低谷”。由临潭—宕昌断裂带 Hg 与 Rn 浓度强度空间分布特征可知(图 5),东段多处测线浓度强度略高于西段,推测东段可能具有较强的活动性,应力积累周期较短且快速释放,通常表现为小震的形式,导致此区域常年小震频发。在多年地

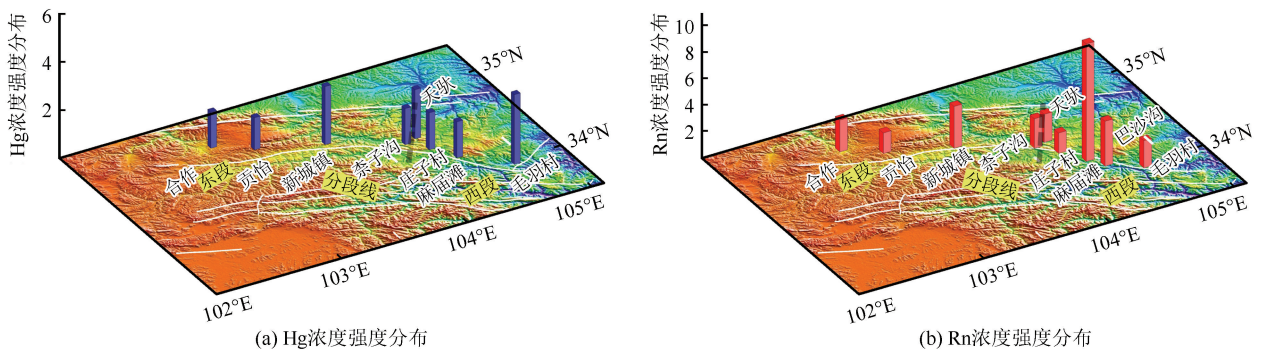


图 5 各测线土壤气浓度强度分布示意图

Fig.5 Distribution diagram of soil gas concentration intensity along each survey line

震的影响作用下,断层核部裂隙闭锁程度低,裂隙发育程度高,气体上升通道稳定。由于 Hg 与 Rn 气体密度相对较大,自身迁移速率低,扩散作用不明显,往往通过载气作用从地壳深部迁移至地表^[31]。东段长期的断层滑移导致断层间相互摩擦作用增强,加大了地下深部气体扩散率,开辟出更多的裂隙通道,为土壤气的逸出提供了合适的环境,经过长年不断的积累,导致东段多处测线气体浓度异常。断裂带西段地震活动相对较少,但 $M_s \geq 5.0$ 地震均发生在此区域,推测此段构造应力经过长期积累后释放,但强震离逝时间久,断层滑动速率低,断裂逐渐封闭,断层核部相对闭锁,气体向上逸出的通道狭隘,影响土壤气的渗透性,使得西段部分测点土壤气浓度强度略低。

4.2 地震活动与大地热流空间的关系

大地热流是指地表下部在单位时间内以热传导方式垂直向上,流经单位面积的热流量,也称为热流或大地热流密度。大地热流的分布与地壳运动、地球内部构造等地质条件之间有显著的联系,热流既可以为人类提供多种不同用途的地热能量资源,也为人类探索地球构造提供了重要参考依据^[32-34]。早在 1997 年,就有研究者曾在欧洲发现地表地热与地震发生有显著的关系^[35]。我国研究者也提出探讨地热对了解地震的孕育有重要意义,并通过研究发现异常地热区域与地震活动在地质构造上有着一定的吻合^[36]。截至 2016 年,我国已采集并发表了 1 230 个大地热流数据^[37]。

受到大地热流影响的物质种类繁多,相比于长时间与大气接触交换的地表气体,部分地热气体直接来源于地球内部,不易受到陆地环境的影响,可以传递地球深部的地质环境信息,使研究人员得以更准确地分析地下成分^[38-39]。其中,Rn 气体通常来源于地球深部,可溶于水,随着水流迁移至地表或从地下破碎带、发育的裂隙等通道逸散至地表。地热所传递的能量会影响 Rn 在水中的溶解度,地下温度越高,Rn 在水中的溶解度越低,热水蒸气中的 Rn 含量也越高。这些 Rn 热气最终会通过裂隙通道迁移至地表,在地热温度高、断裂带活跃且地下破碎程度高的区域表现出 Rn 气体浓度异常。Hg 气体主要以气态方式通过破碎通道从地壳深部逸散至地表,其自然来源有地热活动、火山喷发、地下含 Hg 矿物成矿后 Hg 蒸气的挥发等,故 Hg 气体也受到

地热与区域地质构造影响^[40]。由此可见,在断裂带不同地热区域收集 Rn、Hg 气体浓度有助于分析断裂带的活动性质。

根据数据测量结果,中国大陆区域大地热流平均值为 60.4 mW/m^2 ,与全球大陆平均值 65 mW/m^2 接近^[36]。甘肃省位于中国大陆西北地区,地形呈狭长状,地貌复杂多样,西部以沙漠、戈壁为主要地貌,平均热流小于 60 mW/m^2 ,东部以黄土高原为主,平均热流大于 60 mW/m^2 ,热流分布总体呈现西部低于东部。结合中国大陆区域大地热流,可将高于平均热流的区域归为高热流区域,将低于平均热流的区域归为低热流区域。临潭—宕昌断裂带处于甘东南地区,近年来地震活动频发。如图 6 所示,该断裂带横跨多个不同层次的地热区域,总体地热范围为 $58 \sim 76 \text{ mW/m}^2$ 。根据袁伏全等^[41]对青海不同地热区域地震分布的分析,强震分布与断裂构造、大地热流分布有密切关联:1970—2016 年间,青海共发生 $M_s \geq 6.0$ 强震 35 次,其中 92% 的强震发生在大地热流范围 $60 \sim 80 \text{ mW/m}^2$ 的地区;震中位置通常不在地热值的中心位置,往往位于发生地热变化的横向梯度带上。2013 年岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震前临潭—宕昌断裂带地震 b 值总体为 $0.53 \sim 1.65$ ^[42],但存在两处明显的低 b 值 ($b < 0.6$) 区域,即夏河县与临潭、岷县之间的地区,震中位置位于地热的横向梯度变化带上。此外,对 1990—2010 年地震 b 值进行扫描,发现岷县附近地区 b 值异常显著,2013 年岷县—漳县 6.6 级地震前岷县西北方向邻区 b 值明显降低^[42]。根据 b 值大小与强震发生的可能性关系来看,低 b 值异常范围越大,其强震潜在危险性就越大^[43],岷县周围多次强震恰好印证了此结论。本文通过临潭—宕昌断裂带所处大地热流分布范围与 b 值异常区域,将断裂带分为东、西两段:西段位于高地热区域,热流大于 60 mW/m^2 ;东段主要位于低热流区域,热流小于 60 mW/m^2 。1970 年以来,该断裂带上的 $M_s \geq 5.0$ 地震均发生于热流范围 $61 \sim 76 \text{ mW/m}^2$ 的区域,如高热流的横向变化梯度上分别于 2003 年和 2013 年发生了岷县 $M_s 5.5$ 和岷县—漳县 $M_s 6.6$ 地震,高热流区域 2019 年发生了夏河 $M_s 5.7$ 地震。断裂自西向东热流值逐渐递减,断裂东段 1970—2023 年未发生过 $M_s \geq 5.0$ 地震,但频繁发生小震。

前人对地热场与地震分布进行研究,发现我国

多数地震的能量释放区域与大地热流的高热流区域相吻合^[44-45]。对 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震的研究^[46]表明强震主要发生于地热横向变化较大的梯度带上,这类区域具有最大水平剪应力与周向应力,两种应力共同促进了地震的发生,而地震所引发的地壳活动会影响地下破碎带的破碎程度,进而影响到土壤气浓度分布。将图 6 与表 1 中所测得的气体浓度结合来看,断裂带西段为高热流区域,其中接近热流

横向梯度带变化的区域发生过多次强震,应力积累周期长。虽然西段高热流会促进气体向上迁移,但强震孕育周期长,对破碎带的影响有限,断层核部相对闭锁,Hg、Rn 逸出通道受阻,导致地表气体浓度强度较低。断裂带东段为低热流区域,内部能量稳定,地震受热流的影响较小,应力积累周期短,但长期以来小震活跃,导致地下破碎程度较高,气体逸出通道畅通,所以 Hg、Rn 浓度强度较高。

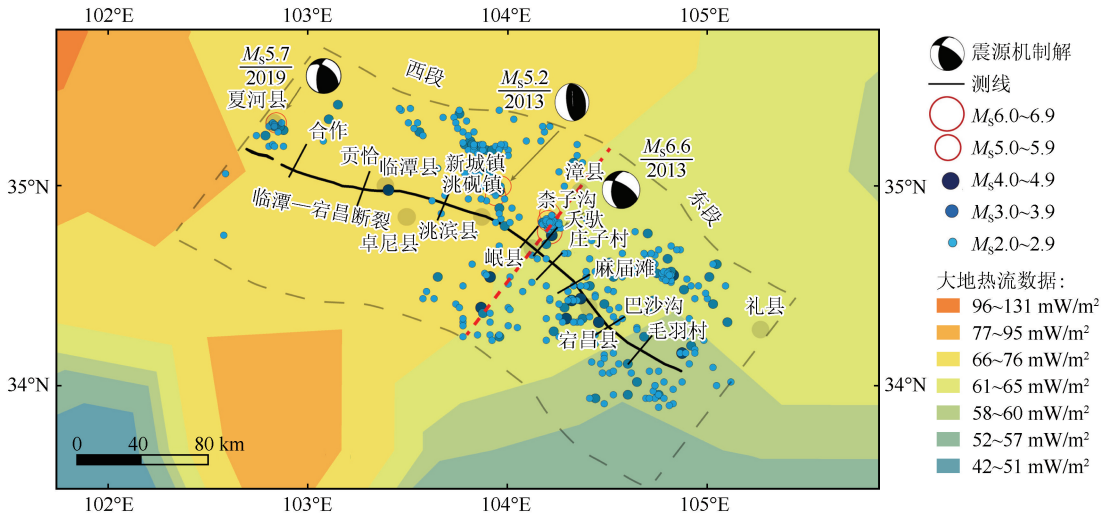


图 6 临潭—宕昌断裂带地震活动与大地热流空间分布图

Fig.6 Spatial distribution of seismic activity and terrestrial heat flow along the Lintan—Tanchang fault zone

此外,地震震中与临潭—宕昌断裂带大地热流分布有着密切的联系。高热流区域与热流发生梯度变化的区域发生强震的风险较高,而强震的发生会导致较强的应力释放,强震之后会有长期的应力积累时间,并且会略微降低小震发生频次。与小震活跃区域相比,该区域对地下破碎带的影响相对较小,地下气体向上传递能力较弱,气体浓度强度较低。长期小震活跃的断裂带区域地下裂隙发育程度高,地下气体逸出通道稳定,并且更容易长期积累气体,导致土壤气浓度略高。

4.3 临潭—宕昌断裂带地球化学特性与地震活动性的关系

土壤中孔隙分布面积广,地下气体在压力、温度、浓度差异的驱动下携带地球深部的相关信息,穿过薄弱的破碎带,在土壤中扩散、对流,最终释放至大气中。在某种程度上,土壤气浓度强度反映了断裂带的构造活动性质^[47],而断裂带的滑动速率反映了断层应变的积累速率,代表了断裂长期平均活动水平^[48]。不均匀的滑动速率分布会改变断裂的走

向,影响断层的形变,而具有一定倾斜角度的断层有利于能量的积累,易引发不同强度的地震。结合土壤气浓度强度分布特征与断层滑动速率进行分析,有助于了解不同断裂带区域的地震危险性^[49-50]。前人的研究主要以滑动速率对断裂造成的构造形变作为了解地震特征的主要依据,现对比大地热流的分段特征后发现,将断裂的形变特征与大地热流数据结合可以更有效地判断地震的活动特性,分析不同区域的土壤气地球化学特征。

结合 1970—2023 年临潭—宕昌断裂带地震活动分段时序图(图 7)与地震分段分布表(表 2)来看,该断裂带 53 年间发生过 2.0 级以上地震 376 次。其中,西段发生地震 171 次,包括 5.0~7.0 级地震 7 次,4.0~4.9 级地震 4 次,3.0~3.9 级地震 35 次,2.0~2.9 级地震 125 次;东段发生地震 205 次,包括 4.0~4.9 级地震 9 次,3.0~3.9 级地震 30 次,2.0~2.9 级地震 166 次。总体上地震活动以中小型为主,5.0 级以上地震较少。根据震源深度分布(图 8)来看,断裂西段震源深度主要集中在 -10~-5 km,小震多为强震的余

震,多数发生在-10 km 以上;断裂东段震源在-30~-5 km 均有分布, M_s 4.0~4.9 地震主要发生于-20~-10 km 深度,无 $M_s \geq 5.0$ 地震发生,由此也可以看出断裂带具有明显的分段特性。结合断裂带在岷县西北方向存在多条次级断裂,在岷县东南方向以主断裂为主,推测断裂带的应力分布在岷县区域发生改变。其中,岷县以西的断裂段强震频发,7

次 $M_s \geq 5.0$ 地震主要发生在西段,同年发生过多次 $M_s < 5.0$ 的余震,其余时间段内小震活动较少。如图 6 所示,多次强震震源位置相近,均发生在大地热流的横向梯度带,此区域断裂形变强度较大。岷县以东的断裂段 53 年间未发生过 $M_s \geq 5.0$ 地震,但小震活动比西段频繁,地震发生区域更广泛,此段大地热流值较低,断裂形变强度较小。

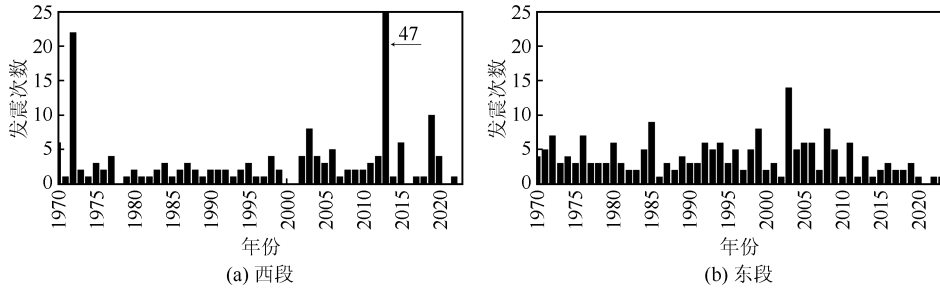


图 7 临潭—宕昌断裂带地震活动分段时序图

Fig.7 Time-sequence diagram of seismic activity along the Lintan—Tanchang fault zone

表 2 临潭—宕昌断裂带地震分段分布特征

Table 2 Distribution characteristics of earthquakes in different segments of Lintan—Tanchang fault zone

时间	地震次数						
	西段				东段		
	$M_s \geq 5.0$	$M_s 4.0 \sim 4.9$	$M_s 3.0 \sim 3.9$	$M_s 2.0 \sim 2.9$	$M_s 4.0 \sim 4.9$	$M_s 3.0 \sim 3.9$	$M_s 2.0 \sim 2.9$
1970—1974	-	-	5	7	-	4	19
1975—1979	-	-	-	10	-	2	17
1980—1984	-	-	1	10	-	3	15
1985—1989	-	-	3	6	2	2	15
1990—1994	-	-	1	8	1	3	19
1995—1999	-	-	3	8	-	1	22
2000—2004	3	1	3	9	1	2	22
2005—2009	-	-	1	12	2	4	21
2010—2014	3	2	13	39	2	4	7
2015—2019	1	1	2	14	1	3	8
2020—2023	-	-	3	2	-	2	1

注:“-”代表未发生地震

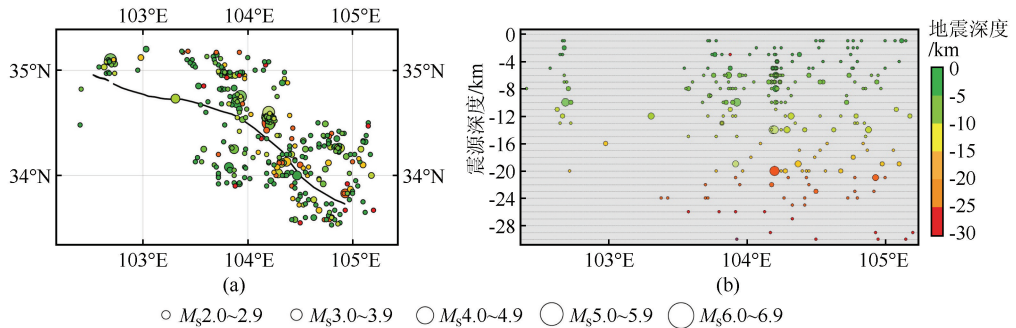


图 8 临潭—宕昌断裂带震源深度空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of focal depth along the Lintan—Tanchang fault zone

将震源位置(图 8)与测线土壤气浓度强度(图 5)进行对比可以看出,断裂带东段 M_s 2.0~4.9 地震

频繁发生,应力积累周期短,地下断层未完全闭合,地下流体传输间隙繁多。在断层活动和地下流体的

相互作用下发育多条裂隙,再加上地震发育的成型裂隙通道,加强了裂隙发育程度,导致流体活动性增强。断层处 Hg 与 Rn 经过长期的逸散后浓度较高,结合小震发生频次、滑动速率走向与大地热流值,推测东段断层活动稳定,当前产生的应变速率低,容易将应力快速释放,形成多次中小地震。强震主要发生在断裂带西段,包括 2013 年岷县—漳县 M_s 6.6 地震和 2019 年夏河 M_s 5.7 地震,且在主震后发生了多起余震。断裂带西段通过强震将能量释放后,地下断层处于应力重新积累状态,小震活动的频率降低,地下流体活动强度相对较低,土壤气浓度强度趋于稳定。Hg、Rn 受自身特性影响,向上逸出速率小,无法长时间积累,浓度强度相对较低。但西段位于高热流值区域,地下热能较高,又具有左旋走滑的运动分量,应力累积速率快,未来仍有发生强震的风险。李晨桦等^[51]对西秦岭北缘断裂带土壤气进行监测分析也发现:研究区中段是张性盆地区,小震频繁,断层的形变强度更大,表现出较高的土壤气浓度强度;东、西两段小震活动较弱,相对应的断层土壤气浓度强度也较低。这种分布特征与地下气体活动性和断层形变特征密切相关,说明小震活动对土壤气浓度的分布具有一定的影响。

综上所述,临潭—宕昌断裂带断层深部的流体活动、大地热流的分布特征,以及断层滑动速率特征均与地震活动有紧密联系。高热流分布区域与左旋走滑的形变特征有利于强震的孕育,表现为强震多数发生于断裂带西段,之后强震所释放的能量需长时间的积累,对地下裂隙的形变影响不稳定,深部气体上升受阻,表现出土壤气浓度强度略低。断裂带东段一直处于较活跃状态,热流范围较低,无法为强震孕育提供合适的环境,导致应力释放周期短,小震活动频繁。由于长期断层滑动对裂隙通道的影响,此段深部气体迁移通道稳定,表现出土壤气浓度强度略高。此外,强震的孕育受到更复杂的空间分布影响,近年来发生强震区域的气体浓度可能产生异常,还需要对临潭—宕昌断裂带进行持续的观察与研究。

5 结论

本文选取临潭—宕昌断裂带西段 4 条测线、东段 5 条测线进行土壤气 Hg、Rn 浓度的监测,并结合前人的研究资料与野外测量结果,对该断裂带的

土壤气地球化学特征与空间分布特性进行分析,得出以下结论:

(1) 临潭—宕昌断裂带在岷县西北方向存在多条次级断裂,在岷县东南方向以主断裂为主,结合大地热流分布特征可以将断裂带以岷县为界分为东、西两段,两段的应力积累环境不同,地震活动也不同。其中,西段多发生中强震,但地震间隔时间长,断裂逐渐闭合,影响土壤气逸出,表现为西段多条测线 Hg、Rn 浓度略低;东段一直具有较强的活动性,小震活跃,长期的断层滑动增强断裂破裂程度,为土壤气逸出提供稳定的通道,表现为东段 Hg、Rn 浓度相对于西段略高。

(2) 临潭—宕昌断裂带西段位于高地热区域,而高热流区域与热流存在梯度变化的区域发生强震的风险较大,1970—2023 年间 $M_s \geq 5.0$ 地震均发生在此区域,但小震发生频次较低,多处测线的 Hg、Rn 浓度强度略低。断裂带东段热流偏低且稳定,长年未发生过强震,但小震活动频繁,此区域多处测线 Hg、Rn 浓度强度略高。

(3) 通过对临潭—宕昌断裂带断裂活动构造、断层滑动速率与历史地震等方面的综合分析,发现该断裂带土壤气浓度强度、大地热流分布区域与断层滑动速率分布特征有较高的耦合性。具有较高大地热流分布的活动构造区域更容易将应力长时间积累,形成强震。小震长期活动频繁的区域地下裂隙稳定,有利于地下流体活动。这为研究区深部地下流体活动提供了新证据,对追踪未来可能发生地震的断层和活动段具有重要意义。

致谢:中国地震局兰州地震研究所张波副研究员在本论文工作测线布设方面给予了帮助,在此表示感谢!

参考文献(References)

- [1] 杜建国,康春丽.地震地下流体发展概述[J].地震,2000,20(增刊1):107-114.
DU Jianguo, KANG Chunli. A brief review on study of earthquake-caused change of underground fluid[J]. Earthquake, 2000, 20(Suppl01):107-114.
- [2] 李营,陈志,胡乐,等.流体地球化学进展及其在地震预测研究中的应用[J].科学通报,2022,67(13):1404-1420.
LI Ying, CHEN Zhi, HU Le, et al. Advances in seismic fluid geochemistry and its application in earthquake forecasting[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(13):1404-1420.

- [3] ETIOPE G, MARTINELLI G. Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2002, 129(3-4): 185-204.
- [4] GHOSH D, DEB A, SENGUPTA R. Anomalous radon emission as precursor of earthquake[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2009, 69(2): 67-81.
- [5] SCIARRA A, CANTUCCI B, COLTORTI M. Learning from soil gas change and isotopic signatures during 2012 Emilia seismic sequence[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 14187.
- [6] CHEN Z, LI Y, LIU Z, et al. Evidence of multiple sources of soil gas in the Tangshan fault zone, North China[J]. *Geofluids*, 2019(3): 1945450.
- [7] SAHOO S K, KATLAMUDI M, BARMAN C, et al. Identification of earthquake precursors in soil radon-222 data of Kutch, Gujarat, India using empirical mode decomposition based Hilbert Huang Transform[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, 222(7): 106353.
- [8] CHEN Z, LI Y, MARTINELLI G, et al. Spatial and temporal variations of CO₂ emissions from the active fault zones in the capital area of China[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 112: 104489.
- [9] 苏鹤军, 周慧玲, 李晨桦, 等. 门源 M_s6.9 地震前嘉峪关气态变化特征分析[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(2): 389-397.
- SU Hejun, ZHOU Huiling, LI Chenhua, et al. Characteristics of gas radon variation in Jiayuguan before Menyuan M_s6.9 earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(2): 389-397.
- [10] ZHANG L, LIU Y W, GUO L S, et al. Isotope geochemistry of mercury and its relation to earthquake in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1)[J]. *Tectonophysics*, 2014, 619: 79-85.
- [11] DI LUCCIO F, VENTURA G, DI GIOVAMBATTISTA R, et al. Normal faults and thrusts reactivated by deep fluids: the 6 April 2009 M_w6.3 L'Aquila earthquake, central Italy[J]. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 2010, 115(B6): B06315.
- [12] WALIA V, YANG T F, HONG W L, et al. Geochemical variation of soil-gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsincheng fault in NW Taiwan[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, 67(10): 1855-1863.
- [13] IRWIN W P, BARNES I. Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85(B6): 3115-3121.
- [14] FU C C, YANG T F, CHEN C H, et al. Spatial and temporal anomalies of soil gas in northern Taiwan and its tectonic and seismic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 149: 64-77.
- [15] ZHOU X C, DU J G, CHENG Z, et al. Advance review of seismic geochemistry[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2012, 31(4): 340-346.
- [16] 李光涛, 程理, 吴昊, 等. 临潭—宕昌主干断裂南东段晚第四纪活动的地质地貌证据[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(2): 376-383.
- LI Guangtao, CHENG Li, WU Hao, et al. Geological and geomorphological evidence of Late Quaternary activity along the southeastern segment of the Lintan—Tanchang major fault, China[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2020, 42(2): 376-383.
- [17] 顾功叙. 中国地震目录(公元前 1831 年—公元 1969 年)[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- GU Gongxu. *Catalogue of Chinese earthquakes (1831 BC—1969 AD)*[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [18] 何文贵, 周志宇, 马尔曼, 等. 岷县—卓尼 5.0 级地震的基本特征和地质背景研究[J]. *地震研究*, 2006, 29(4): 373-378.
- HE Wengui, ZHOU Zhiyu, MA Erman, et al. Basic features and geological background of the Minxian—Zhuoni M5.0 earthquake on Sep. 7, 2004[J]. *Journal of Seismological Research*, 2006, 29(4): 373-378.
- [19] 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 等. 1837 年甘肃岷县北 6 级地震考证与发震构造分析[J]. *地震*, 2007, 27(1): 120-130.
- ZHENG Wenjun, LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, et al. Structural research on the 1837 northern Minxian M6 earthquake in Gansu Province and its causative structure[J]. *Earthquake*, 2007, 27(1): 120-130.
- [20] 高明星, 陈桂华, 徐锡伟. 地貌参数指示的临潭—宕昌断裂带最新构造隆升差异与地震活动[J]. *地震地质*, 2015, 37(3): 709-718.
- GAO Mingxing, CHEN Guihua, XU Xiwei. Geomorphic indices indicated recent differential tectonic uplift of the Lintan—Dangchang fault and the Minxian—Zhangxian earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(3): 709-718.
- [21] 高鹏伟. 甘肃东南地区现今地壳形变及应力特征研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- GAO Pengwei. *Study on current crustal deformation and stress characteristics in southeast Gansu Province*[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [22] 郑文俊, 闵伟, 何文贵, 等. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震震害分布特征及发震构造分析[J]. *地震地质*, 2013, 35(3): 604-615.
- ZHENG Wenjun, MIN Wei, HE Wengui, et al. Distribution of the related disaster and the causative tectonic of the Minxian—Zhanxian M_s6.6 earthquake on July 22, 2013, Gansu, China[J]. *Seismology and Geology*, 2013, 35(3): 604-615.
- [23] 张波, 田勤俭, 王爱国, 等. 西秦岭临潭—宕昌断裂第四纪最新活动特征[J]. *地震地质*, 2021, 43(1): 72-91.
- ZHANG Bo, TIANQinjian, WANG Aiguo, et al. Studies on new activity of Lintan—Dangchang fault, West Qinling[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(1): 72-91.

- [24] 郑文俊,袁道阳,何文贵,等.甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 $M_s6.6$ 级地震孕震机制[J].地球物理学报, 2013,56(12):4058-4071.
ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, HE Wengui, et al. Geometric pattern and active tectonics in Southeastern Gansu Province: discussion on seismogenic mechanism of the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22, 2013[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4058-4071.
- [25] 李光涛,苏刚,程理,等.临潭—宕昌断裂带遥感解译及其晚第四纪活动特征研究[J].防灾科技学院学报, 2019, 21(2): 21-28.
LI Guangtao, SU Gang, CHENG Li, et al. Remote sensing interpretation of Lintan—Dangchang fault zone and its Late Quaternary activity characteristics[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2019, 21(2): 21-28.
- [26] 刘廷.西秦岭临潭—宕昌断裂带断层泥及年代学研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2015.
LIU Ting. Study on fault mud and chronology of Lintan—Tanchang fault zone in West Qinling[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [27] 袁道阳,张培震,刘百箴,等.青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J].地质学报, 2004, 78(2): 270-278.
YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, LIU Baichi, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai—Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 270-278.
- [28] 刘雷,邱江涛,庄文泉.临潭—宕昌断裂现今闭锁程度及地震危险性分析[J].地震地磁观测与研究, 2021, 42(2): 145-146.
LIU Lei, QIU Jiangtao, ZHUANG Wenquan. Fault locking and seismic risk analysis of Lintan—Tanchang fault[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2021, 42(2): 145-146.
- [29] ANNUNZIATELLIS A, BEAUBIEN S E, BIGI S, et al. Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Latera caldera (central Italy): implications for CO_2 geological storage[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(3): 353-372.
- [30] 张西娟,曾庆利,马寅生.断裂带中的流体活动及其作用[J].西北地震学报, 2006, 28(3): 274-279.
ZHANG Xijuan, ZENG Qingli, MA Yinsheng. Fluid involvement in active fault zone[J]. Northwestern Seismologica Journal, 2006, 28(3): 274-279.
- [31] CIOTOLI G, LOMBARDI S, ANNUNZIATELLIS A. Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 2007, 112(B5): B05407.
- [32] POLLACK H N, HURTER S J, JOHNSON J R. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set[J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(3): 267-280.
- [33] 王丹,魏水建,贾跃玮,等.地热资源地震勘探方法综述[J].物探与化探, 2015, 39(2): 253-261.
WANG Dan, WEI Shuijian, JIA Yuewei, et al. An overview of methods for geothermal seismic exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 253-261.
- [34] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘, 2020, 27(1): 1-9.
WANG Guiling, LIU Yanguang, ZHU Xi, et al. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9.
- [35] PASQUALE V, VERDOYA M, CHIOZZI P, et al. Rheology and seismotectonic regime in the northern central Mediterranean[J]. Tectonophysics, 1997, 270(3-4): 239-257.
- [36] 安镇文,朱传镇.地热与地震关系的研究(一):弹性介质中椭圆盘状裂纹尖端附近的热应力分布[J].地震学报, 1984, 6(2): 211-222.
AN Zhenwen, ZHU Chuazhen. Study of geothermal variations in relation to large earthquakes (1): the distribution of thermal stresses in the neighborhood of the sharp end of an elliptical-shaped crack in an infinite elastic medium[J]. Acta Seismologica Sinica, 1984, 6(2): 211-222.
- [37] 姜光政,高翔,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J].地球物理学报, 2016, 59(8): 2892-2910.
JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2892-2910.
- [38] LOWENSTERN J B, BERGFELD D, EVANS W C, et al. Origins of geothermal gases at Yellowstone[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2015, 302: 87-101.
- [39] 天娇,庞忠和,李义曼,等.地热气体研究进展[J].地质学报, 2022, 96(5): 1752-1766.
TIAN Jiao, PANG Zhonghe, LI Yiman, et al. Research progress on geothermal gas[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(5): 1752-1766.
- [40] 冯新斌,陈玖斌,付学吾,等.汞的环境地球化学研究进展[J].矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(5): 503-530.
FENG Xinbin, CHEN Jiubin, FU Xuewu, et al. Progresses on environmental geochemistry of mercury[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(5): 503-530.
- [41] 袁伏全,张超美,孙世瑞,等.青海地区地震与地热的分布特征[J].高原地震, 2017, 29(2): 1-6.
YUAN Fuquan, ZHANG Chaomei, SUN Shirui, et al. Study on spatial relationship between earthquakes and geothermal in Qinghai Province[J]. Plateau Earthquake Research, 2017, 29(2): 1-6.
- [42] 冯建刚,张辉,杨萍.2013 年岷县漳县 6.6 级地震前地震 b 值异常特征研究[J].地震, 2016, 36(1): 32-37.

- FENG Jiangan, ZHANG Hui, YANG Ping. Anomalies of b -value changes before the 2013 Minxian—Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake[J]. Earthquake, 2016, 36(1): 32-37.
- [43] 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1719-1725.
- YI Guixi, WEN Xueze, SU Youjin. Study on the potential strong-earthquake risk for the eastern boundary of the Sichuan—Yunnan active faulted-block, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1719-1725.
- [44] WAKITA H, NAKAMURA Y, KITA I, et al. Hydrogen release; new indicator of fault activity [J]. Science, 1980, 210(4466): 188-190.
- [45] 吴乾蕃, 祖金华, 谢毅真, 等. 云南地区地热基本特征[J]. 地震地质, 1988, 10(4): 177-183.
- WU Qianfan, ZU Jinhua, XIE Yizhen, et al. Characteristics of geothermal field in Yunnan region [J]. Seismology and geology, 1988, 10(4): 177-183.
- [46] 张之立. 唐山地震热力源的研究[J]. 地震学报, 1985, 7(1): 45-56.
- ZHANG Zhili. Investigation on the thermal force sources of 1976 Tangshan earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 1985, 7(1): 45-56.
- [47] KING C Y, ZHANG W, ZHANG Z C. Earthquake-induced groundwater and gas changes [J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(4): 633-645.
- [48] 张培震, 李传友, 毛凤英. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率[J]. 地震地质, 2008, 30(1): 44-57.
- ZHANG Peizhen, LI Chuanyou, MAO Fengying. Strath terrace formation and strike-slip faulting [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(1): 44-57.
- [49] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.
- ZHANG Peizhen, XU Xiwei, WEN Xueze, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1066-1073.
- [50] CHEN Z, LI Y, LIU Z F, et al. Geochemical and geophysical effects of tectonic activity in faulted areas of the North China Craton [J]. Chemical Geology, 2022, 609: 121048.
- [51] 李晨桦, 张慧, 苏鹤军, 等. 西秦岭北缘断裂带深部气体地球化学特征与断层形变空间分布相关性研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(6): 955-963.
- LI Chenhua, ZHANG Hui, SU Hejun, et al. Study on correlation between geochemical features of deep gas and fault deformation distribution in northern margin fault zone of West Qinling [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(6): 955-963.

(本文编辑: 赵乘程)