

文章编号:1009-3850(2019)02-0045-09

龙泉山断裂带隐伏断层氦气特征及其活动性分析

刘亮^{1,2}, 梁斌^{1,2}, 燕中林^{2,3}, 李江涛^{1,4}, 应立朝², 杨鹏涛¹, 杨宇东¹

(1. 四川省地矿局川西北地质队, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 3. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 四川 成都 610000; 4. 乐山市自然资源局, 四川 乐山 614000)

摘要:龙泉山断裂构造带作为龙门山推覆带的前陆隆起,严格控制了成都平原东边界,其活动性历来受到人们的关注。通过对龙泉山断裂带的氦气进行测量,可以有效地判断隐伏断层的位置及其活动性。测量结果显示,龙泉山断裂带北段东坡活动性强于西坡,主断层的活动性明显强于边缘隐伏断层,4条断层的活动性由强到弱依次为合兴场断层>红花塘断层>龙泉驿断层>松林场断层。龙泉山断裂带同一条断层在地表由多个破碎带组成,其氦气异常特征与断层活动性和破碎带特征呈正相关性,即断层活动性越强,氦气异常特征越显著。龙泉山断裂带氦气平均异常浓度是背景值的9.6倍,将各异常带峰值浓度与背景值进行对比分析,大致归纳出了龙泉山地区隐伏断层活动性的相对判别标准。

关键词:龙泉山断裂带;隐伏断层;氦气;活动性;判别标准

中图分类号:P546

文献标识码:A

引言

龙泉山地区人口比较稠密,是重要的工业、农业、教育基地,成渝铁路和一些重要公路干线横跨该带,当地还有黑龙滩、三岔湖水库和龙泉山引水隧洞等重要水利工程。随着成都市的东进,新机场和航空新城的建设,我们必须面对的现实问题就是龙泉山断裂带。沿龙泉山构造带的历史地震资料表明,地震震中沿构造带呈带状分布,且具分段特征。20世纪80年代以来,不断有专家学者从构造变形、演化历史、动力学、地球物理特征等方面对龙泉山构造带进行了研究;从年代学、构造地貌、第四

纪地质、沿构造带的地震活动、形变测量等方面对其在第四纪期间的活动性及潜在活动性进行了探讨^[1-6]。

龙泉山断裂带包括东坡和西坡一系列活动断层(图1),受残坡积物及第四系沉积物的影响,断层出露不连续,多呈隐伏状态,了解和确定隐伏断层的位置及活动性,显得尤为迫切。当前,利用测量断层氦气释放强度、范围等的变化来寻找覆盖区断裂(带)的空间分布位置及其相对活动性的分析评价,已逐渐在国内外得到较广泛的应用^[7-11]。美国、日本、前苏联及中国等先后开展了断裂带土壤中氦的监测和研究,试图用断层逸出氦的浓度异常

收稿日期:2018-11-02; 改回日期:2019-01-05

作者简介:刘亮(1987),男,研究生,地质调查与矿产勘查工程师,主要从事区域地质、矿产地质调查研究。E-mail: liuliang2006ziyang@163.com

基金项目:中国地质调查局项目1:25万成都幅区域地质调查项目(项目编号:1212010880704)

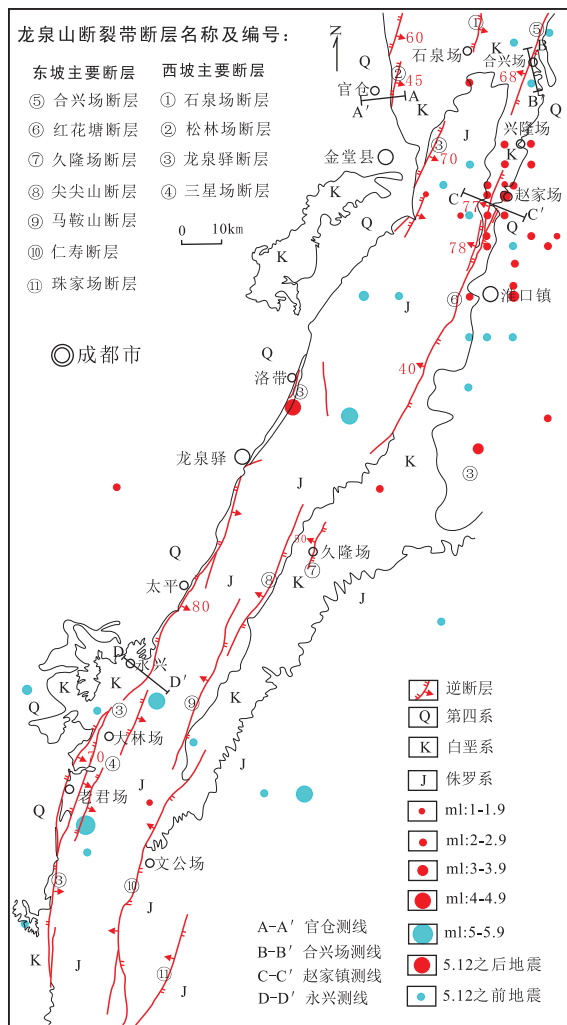


图1 龙泉山断裂带地质简图及氡气测线分布图

Fig. 1 Simplified geological map showing the distribution of the faults and radon measuring lines in the Longquanshan fault zone

预报地震活动^[7-11]。美、日等国学者先后将此方法应用在圣安德列斯断层、中央大断层等进行断层活动性研究。我国也先后将此方法应用于地震监测、地震区划、地震烈度评估、探矿、资源开发等领域,并取得了较好的效果^[12-16]。本论文利用测量断层氡气释放强度、形态及范围等的变化来寻找覆盖区断裂(带)的空间分布位置,并分析评价其相对活动性,以期为活动断裂研究和一般工程项目提供科学依据。

1 龙泉山构造带特征

龙泉山构造带处于扬子陆块西缘的被动大陆边缘地带与松潘-甘孜地块过渡带上,西临龙门山构造带。研究区出露地层主要为中生代侏罗系和

白垩系,古近纪和新近纪地层不发育,第四纪沉积物分布在极其有限的堆积阶地,局部见有残坡积物。龙泉山构造带南起仁寿,北达中江,全长130km,宽15~20km,构造形迹规模宏大(图1),以龙泉山箱状大背斜为骨干,由一系列走向北东 20° ~ 30° 的褶皱、逆冲断层等压性、压扭性结构面组成,构造轴线呈现不同程度的弯曲,具有扭动作用^[3,17]。其形成和发展与龙门山构造带关系密切。

龙泉山背斜轴部宽阔平缓,两翼陡然下降,为典型的箱状背斜。龙泉山断裂为第四系一般性活动断裂,由龙泉山西坡和东坡两断裂带相相对倾组成,总体走向北东 20° ~ 30° (图1)。尤其是西坡断裂带严格控制了成都平原第四系沉积的东界,其形成历史可追溯到晚侏罗纪—早白垩纪^[18],与龙泉山背斜的形成过程具有密切的成因联系^[19-20]。

2 研究方法

2.1 氡气测量原理

岩石中的放射性元素 Ra(镭)、ThX(钍)和 AcX(锕)衰变时产生 Rn(氡)、Tn(钍射气)和 An(锕射气)。这些射气中有一部分逸散到岩石的孔隙中和裂隙中或进入土壤的空气中变成自由气体,这种现象叫射气作用。逸散出来的那部分气体,受扩散和对流作用的影响而发生运移。保留在岩石中的射气是受束缚的,不能参与扩散与对流。因此,土壤空气中的射气浓度变化只与岩石中释放出来的那部分射气有关。总的来讲,氡气在一定的压力差、温度差、梯度差下,从下向上迁移。当地壳中存在活断层,特别是新的活动断裂时,一方面由于其破碎胶结程度差,有效孔隙度和渗透率高,为放射性气体富集和运移提供了有利条件;另一方面,由于断层的新活动性,比如地震、滑坡等地质灾害,使束缚在断裂带两盘岩石孔隙中的放射性气体释放出来成为自由氡^[11,21]。

由于上述原因,在活动断裂带的出露位置,土壤中的氡气浓度会局部增高,形成氡异常。通常异常的出露部位、异常的大小、形态特征与断层的位置、产状、规模、活动性有关,所以可根据氡异常曲线的位置和形态,判断活动断裂的位置和产状,根据异常带的宽度和异常峰值,判断活动断裂的规模及相对活动性^[22-23]。

2.2 氡气异常形态

氡异常的形成与活断层规模的大小、活动程

度、断层的倾向及倾角、破碎带宽度、充填物的透气性、覆盖层厚度等因素有关,同时受气候条件、地貌、植被影响,所以形成的异常曲线形态各异^[13],一般具有如下3种常见形态。

(1)对称单峰异常:异常基本对称的单峰,这类异常多为近乎直立的规模较小断层所致,埋深较浅;另一种可能是断层规模虽然较小,埋深较大,但覆盖层的孔隙度较大,有利于断层气体的扩散对流,也形成较明显的单峰。

(2)不对称单峰异常:这类异常一种为规模较大的断裂(层)引起,其埋深较大,产状较陡;另一种情况可能埋深不大,但覆盖层物质的孔隙度较小,不利断层气体的对流扩散,形成峰值较小的宽单峰异常。在断层倾向的方向一侧比另一侧升降缓慢。

(3)多峰异常:这类异常多为斜倾的大断裂带所致,在主断层的上盘发育次级裂隙或浅表的次级小裂隙发育。主峰为主断层对应的位置,次级峰的方向为断层的倾斜方向。以上3种类型之间还会有许多过渡类型。

2.3 本次工作情况

本次研究采用美国产 DURRIDGE RAD-7 型氦气分析测试仪器进行现场测定, DURRIDGE RAD-7 使用固态 α 探测器,能将 α 辐射直接转换为信号。实际测量过程中首先在地形地质图上确定好测线的位置和方位,野外运用 GPS 和罗盘保持总体方位一致。测点间距布置在 30 ~ 50m,出现异常的地段加密至 10m 左右,在氦气浓度低的地段适当增大间距。测量并记录每一个测点的点位、点距,开始测量之前必须将仪器抽取空气净化 4 分钟,然后将探杆插入土层 60 ~ 70cm,尽量压实表面土层,每个点测量设定 3 次循环过程,每个循环 4 分钟,记录下 3 个数据。根据仪器使用规范,第三次数据为该点土壤氦气浓度数据,单位为 Bq/m^3 。

背景值的确定直接影响氦气特征曲线的形态和规模,进而影响对断层规模和活动性的判断^[15],明显的高值、低值和不可靠值不参加统计计算^[16]。由于 4 条剖面的地质背景基本相同,侏罗纪和白垩纪地层均为一套陆相砂岩、泥岩地层,其地层本身对氦气浓度影响不大。为了消除测线本身长短对异常值的影响,也为了便于比较,将 4 条测线的背景值取全部数据的平均值加其 2 倍均方差,反复剔除异常值和零值后的平均值作为 4 条测线的背景

值^[24]。异常下限值根据中国地震局标准,取该测线均值的 2 ~ 4 倍均方差之和。本文为了保持数据的真实性,第一次所有数据参与计算,得到一个异常下限值,然后去掉高于异常下限值和异常低值后再一次计算,取经过反复剔除后的均值与其 2 倍均方差之和作为异常下限值,4 条剖面求得的背景值为 $870 Bq/m^3$,异常下限值为 $2854 Bq/m^3$,异常平均值为 $8380 Bq/m^3$ 。

3 龙泉山断层氦气特征

3.1 测线的布置及依据

沿龙泉山构造带的历史地震资料表明,地震震中沿构造带呈带状分布,且具分段特征(图 1)。历史有震感的地震大多集中在该带北段的中江至金堂一带、该带南段的井研一带和双流与仁寿交界处的龙泉山断裂带断层分段处^[1-2]。因而本次研究选择在地震活动性较强的金堂、永兴一带进行氦气测量,验证龙泉山断裂带的活动性、空间展布,比较东坡与西坡断裂的活动性强弱。北段东坡断裂在 5 · 12 地震过后地震频率有显著增强的趋势,我们分别在断裂带北段的金堂县赵家镇和合兴场垂直于红花塘断层(C-C')和合兴场断层(B-B')各布置了一条测线;西坡龙泉驿断层发生多次中小地震。同时为了验证龙泉山构造带的西边界,即平原与丘陵截然带,我们分别在双流永兴垂直龙泉驿断层(D-D')、金堂官仓垂直松林场断层(A-A')各布置了一条测线(图 1)。

3.2 龙泉山西坡龙泉驿断层 D-D' 永兴测线氦气异常特征

根据异常下限值以及土壤氦气浓度分布特征,龙泉驿断裂的土壤氦气异常明显分为 3 个异常带,从 NW 到 SE,分别编为 I、II、III 带(图 2)。

异常 I 带:由 2 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 $8310 Bq/m^3$,峰值平均值为 $5940 Bq/m^3$ 。异常形态为不对称单峰形,异常峰向 SE 方向变缓,异常带宽度约为 100m。

异常 II 带:由 5 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 $9250 Bq/m^3$,峰值平均值为 $7160 Bq/m^3$ 。异常形态为多峰形,异常带宽度约为 250m,异常规模大。

异常 III 带:由 1 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 $17500 Bq/m^3$ 。异常形态为对称单峰形,

异常带宽度约为 50m,这与地形较陡、覆盖层较薄、氡气异常不易保存有关,导致异常规模虽然较小,但仍显示出较强活动性。

在永兴处测得的龙泉驿断层的 3 个氡气异常分带中,异常 I 带平均值、最高值分别是背景值的 6.8、9.6 倍;异常 II 带平均值、最高值分别是背景值的 8.2、10.6 倍;异常 III 带平均值、最高值均为背景值的 20.1 倍。

根据上述特征(表 1),龙泉驿断层永兴段土壤氡气异常带特征与所指示的断层(带)的相对活动性表现为: III > II > I。

3.3 龙泉山西坡隐伏断层 A-A'官仓测线氡气异常特征

根据异常下限值及土壤氡气浓度分布特征,龙泉山西坡隐伏断层即松林场断层的土壤氡气异常明显分为 2 个异常带,从 E 到 W,分别编为 I、II 带

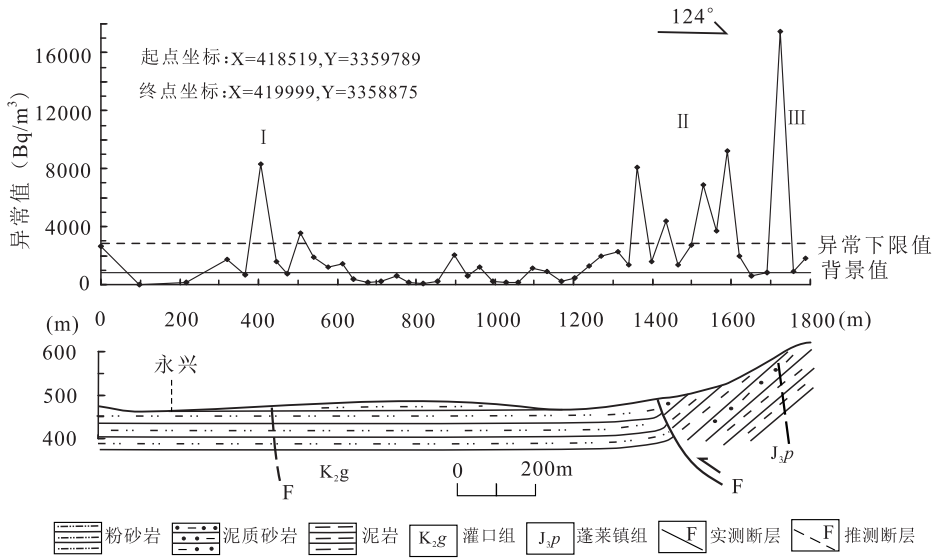


图 2 龙泉驿断层氡气测量结果图

Fig. 2 Measurements of radon in the Longquanyi fault

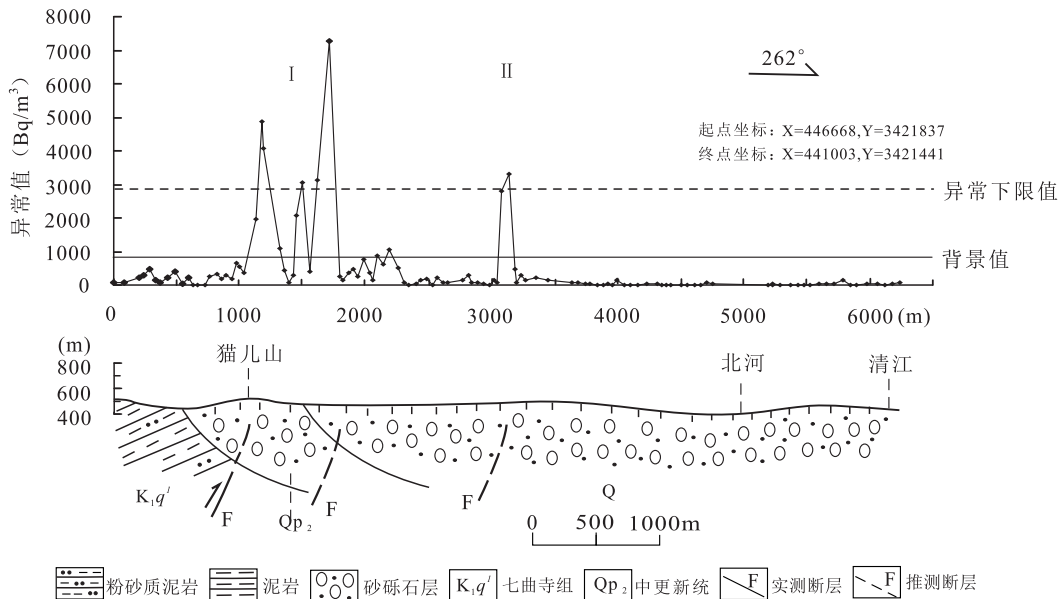


图 3 松林场断层氡气测量结果图

Fig. 3 Measurements of radon in the Songlinchang fault

(图3)。

异常 I 带:由 5 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 7270Bq/m³。异常形态为多峰形,峰值平均值为 4458Bq/m³。异常形态为多峰形,异常峰向 NW 方向变缓,异常带宽度约为 400m,异常规模大,推测该异常带有两条或多条断层。

异常 II 带:由 2 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 3300Bq/m³,平均峰值浓度为 3077Bq/m³。异常形态为对称单峰形,宽度约为 70m,规模较小。

在官仓测得的松林场断层的 2 个氦气异常分带中,异常 I 带平均值、最高值分别是背景值的 5.1 倍、8.4 倍;异常 II 带平均值、最高值分别是背景值的 3.5 倍和 3.8 倍。

根据上述特征,官仓土壤氦气异常带特征与所指示的断层(带)的相对活动性表现为:I>II(表1)。

3.4 龙泉山东坡断层 C-C' 赵家镇测线氦气异常特征

根据异常下限值以及土壤氦气浓度分布特征,红花塘断裂的土壤氦气异常明显分为 3 个异常带,从 E 到 W,分别编为 I、II、III 带(图 4)。

异常 I 带:由 15 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 10800Bq/m³。异常形态为多峰形,峰

值平均值为 7073Bq/m³。异常峰向 W 变缓,异常带宽度约为 250m,规模大。

异常 II 带:由 3 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 10300Bq/m³,峰值平均值为 6867Bq/m³。异常形态为单峰形,异常峰向两边对称,异常带宽度约为 50m,规模较小。

异常 III 带:由 8 个氦气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 8880Bq/m³。峰值平均值为 7445 Bq/m³。异常形态为单峰形,异常峰向两边基本对称,异常带宽度约为 150m,规模较小。

在赵家镇测得赵家镇断层的 3 个氦气异常分带中,异常 I 带平均值、最高值分别是背景值的 8.1、12.4 倍;异常 II 带平均值、最高值分别是背景值的 7.9、11.8 倍;异常 III 带平均值、最高值分别是背景值的 8.6、10.2 倍。

根据上述特征(表 1),赵家镇土壤氦气异常带特征与所指示的断层(带)的相对活动性表现为:II > I > III。

3.5 龙泉山东坡断层 B-B' 合兴乡测线氦气异常特征

根据异常下限值以及土壤氦气浓度分布特征,合兴场断裂的土壤氦气异常明显分为 2 个异常带,从 SE 到 NW,分别编为 I、II 带(图 5)。

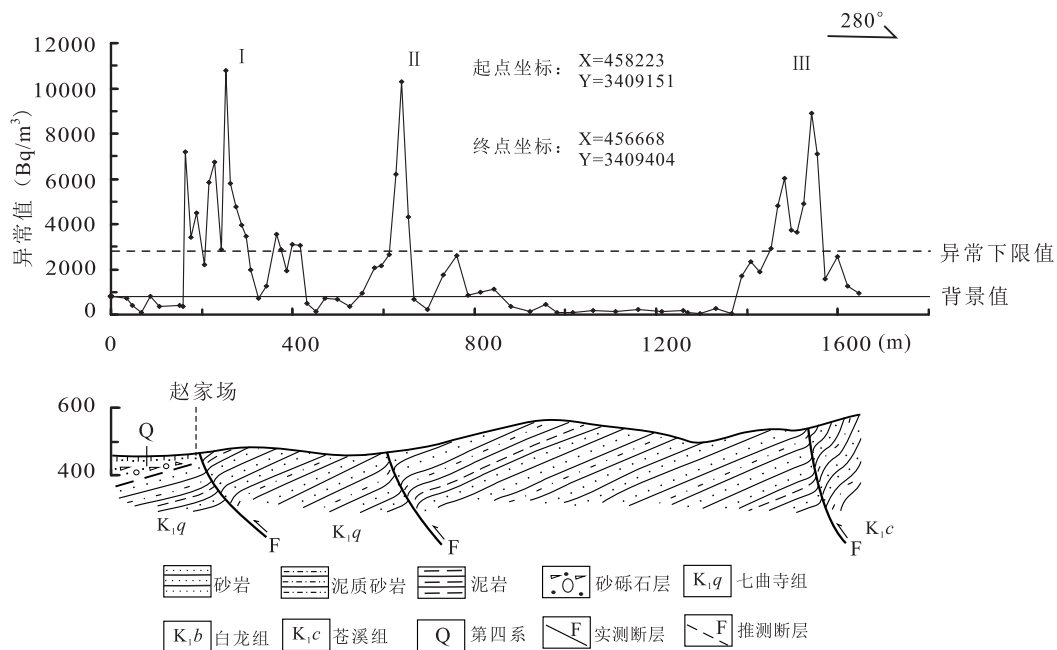


图 4 红花塘断层氦气测量结果图

Fig. 4 Measurements of radon in the Honghuatang fault

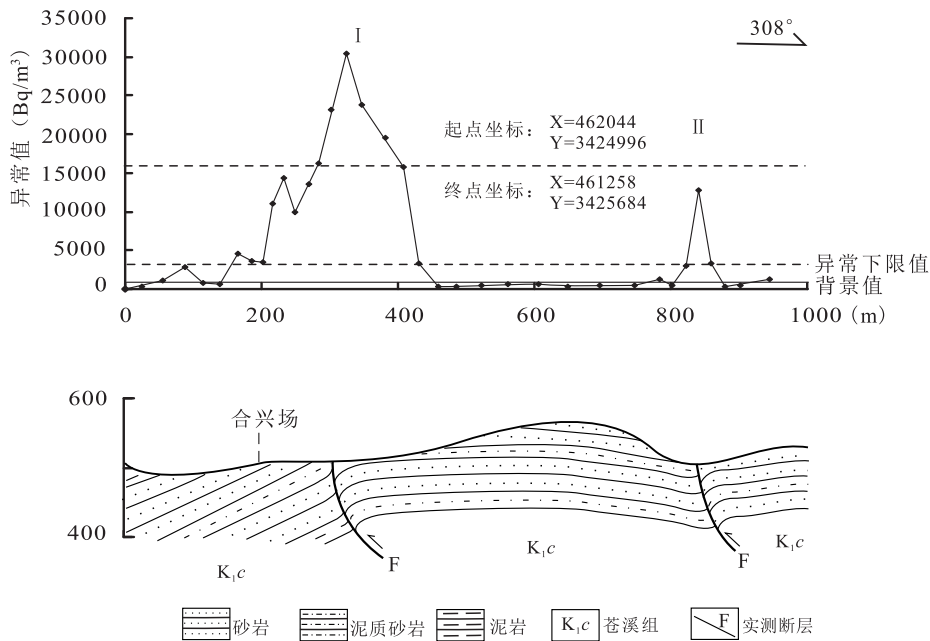


图5 龙泉山东坡合兴场断层氡气测量结果图

Fig. 5 Measurements of radon in the Hexingchang fault

异常 I 带:由 15 个氡气浓度异常值组成,最高峰峰值浓度为 $30500\text{Bq}/\text{m}^3$, 平均峰值浓度为 $13070\text{Bq}/\text{m}^3$, 异常形态为单峰形, 异常带宽度约为 350m, 此异常宽度宽, 推测该断层规模较大, 活动性较强, 这与 5·12 以后最新地震频发现象一致。

异常 II 带:由 3 个氡气浓度异常值组成, 最高峰峰值浓度为 $12700\text{Bq}/\text{m}^3$, 平均峰值浓度为 $6147\text{Bq}/\text{m}^3$ 。异常形态为单峰形, 异常峰向两边对称。异常带宽度约为 50m, 规模较小。

在合兴乡测得的合兴场断层的 2 个氡气异常分带中, 异常 I 带平均值、最高值分别为背景值的 15.0 倍和 35.1 倍; 异常 II 带平均值、最高值均为背景值的 7.1 倍和 14.6 倍。

根据上述特征(表 1), 赵家镇土壤氡气异常带特征与所指示的断层(带)的相对活动性表现为: $I > II$ 。

4 龙泉山断层氡气活动性分析

目前, 在国内外尚未见到用氡气测试方法来研究断裂活动性分级(活动强度级别)的一种统一的判别标准, 仅有极个别研究者, 根据其经验, 提出了少数仅适应于局部地区性应用的相对判别依据^[23, 25]。本文尝试采用比拟法, 通过比较 M (平均

峰值浓度/背景值)和 M' (最高峰值浓度/背景值)与 59 个异常平均值与背景值的比值, 大致归纳出适合龙泉山地区隐伏断层活动性的相对判别标准。

本文在分析了研究区的其它测试成果资料后, 结合本次系统测试数据, 初步确定了红花塘断层和龙泉驿断层的活动性。红花塘断层附近弱震、微震频度大, 最新活动年代为晚更新世早期, 活动方式为粘滑; 龙泉驿断层地震频度相对较小, 但震级较大, 多次发生小震—中震, 如 1967 年大林场地震, 最新活动年代为中更新世晚期—晚更新世早期, 活动方式为粘滑为主兼具蠕滑。地震和最新活动年、活动方式表明两条断层为一般活动性断层(另文待刊)。

本次测得 59 个异常平均值为背景值的 9.6 倍, 据此将各异常带峰值浓度/背景值进行比较划分, 当 M 与 M' 有一个达到此值(表 1), 即可认为断层为一般活动断层, 具备发震的潜力。此划分标准与现今地震和测年资料反映的结果基本一致, 红花塘断层和龙泉驿断层异常带均有一个值 >9.6 , 两条断层附近均有中小地震分布。合兴场断层的 M 与 M' 均 >9.6 , 显示其活动性较强, 为中等活动断层, 测年资料显示其最新活动年代为中更新世中期, 断层附近有明显的小震分布。而松林场断层均小于此值, 显

表1 龙泉山断裂带氡气异常形态及对断层的指示

Table 1 Relationship between the radon anomaly and fault activity in the Longquanshan fault zone

测线	异常带编号	异常形态	M(平均峰值 浓度/背景值)	M'(最高峰值 浓度/背景值)	异常对断层的指示		
					断层宽度(m)	断层产状及规模	断层活动性
龙泉驿断层 永兴测线	I	不对称单峰形	6.8	9.6	100	倾向SE,较陡,规模较小	一般活动
	II	多峰形	8.2	10.6	250	较缓,规模大	一般活动
	III	对称单峰形	20.1	20.1	50	陡,规模较小	中等活动
松林场断层 官仓测线	I	对称单峰形	5.1	8.4	400	倾向SE,较陡,规模大	弱
	II	多峰形	3.5	3.8	70	较陡,规模较小	极弱
红花塘断层 小兴坝测线	I	多峰形	8.1	12.4	250	倾向NW,较缓,规模大	一般活动
	II	对称单峰形	7.9	11.8	50	较缓,规模较小	一般活动
	III	对称单峰形	8.6	10.2	150	陡,规模较大	一般活动
合兴场断层 合兴测线	I	对称单峰形	15.0	35.1	350	较陡,规模大	中等活动
	II	对称单峰形	7.1	14.6	50	陡,规模小	一般活动

示活动性弱,断层附近也无地震分布。进而采用比拟法,大致归纳出适合龙泉山地区的相对判别标准:M与M'值均<9.6,为活动性极弱-弱断层;M或M'值其中有一个>9.6,即为一般活动性断层;M与M'均>9.6,即为中等活动断层;一般M与M'越大,活动性越强。整体来看,研究区断层活动性还未达到强活动断层的程度。

从4条测线来看,上述断层均有一定的活动性。3条主要断层,西坡龙泉驿断层与东坡合兴乡断层、赵家镇断层氡气值及峰背比值均明显高于边缘次级断层松林场断层,表明氡气异常值的高低与断层活动性呈正相关,可以据此判断断层的相对活动性。通过野外实测氡气发现,地貌标志能反应断层的存在,但是往往根据地貌推测的断层跟实际都有一定出入,通过氡气测量能很好地解决这个问题,能够把断层的位置控制在数十米范围内,能够为一般的工程活动提供科学依据。

从东坡合兴场断层和红花塘断层活动性比较来看,最新活动性越强、活动时间越近(最近地震越频繁),氡气浓度值越高,这与地震分布规律一致(图1)。

从龙泉山西坡断裂带的氡气异常特征来看,在龙泉山构造带与平原截然的地方确实存在隐伏断层,并且有一定活动性,这些隐伏断层较好地控制了构造带与平原的界线。同时主断层龙泉驿断层的活动性明显强于边缘隐伏断层松林场断层,这与主断裂破碎带宽、连通性好有关。

各断层氡气异常特征还显示,同一条测线,其

氡气异常带有两个或多个,这表明,龙泉山断层,不管是东坡还是西坡断层,都是由一系列近于平行的断裂组合而成,其在地表的破碎带都不止一个。这些地表破碎带在地下一定深度便收敛于同一条断层,准确的说应该是同一断层在地表的多条破碎带,这些破碎带的连通性有差别,因而造成氡气异常特征不同(表1)。4条断层破碎带均较宽,由多个氡异常带组成,表明断层具较大规模和较强活动性。

几条测线的地质背景是基本相同的,异常值的高低与断层本身的性质密切相关。北段东坡与西坡断裂带氡气特征比较发现,东坡断裂异常带的活动性较强,西坡断裂的活动性相对较弱。这与现今地震,尤其是5·12地震后,地震主要集中在北段东坡断裂一致。综合各条断层的氡气异常特征来看,4条断层的活动性由强到弱依次为合兴场断层>红花塘断层>龙泉驿断层>松林场断层。

5 结论

(1)氡气测量结果显示,龙泉山断裂带是由一系列斜列或近于平行的断裂组合而成。断裂带北段东坡活动性强于西坡,历史地震和现今地震也主要集中在东坡断裂。主断层氡气值及峰背比值明显强于边缘次级断层,氡气异常值与断层活动性呈正相关。4条断层的活动性由强到弱依次为合兴场断层>红花塘断层>龙泉驿断层>松林场断层。

(2)对单条断层的测量结果显示,同一条断层,其地表破碎带较宽,且由多个破碎带组成,破碎带

的氦气异常特征与断层活动性和破碎带自身条件(如连通性、规模、覆盖物厚度等)成一定的对应关系,即断层活动性越强,破碎带连通性越好,氦气异常特征越显著。

(3)采用比拟法,大致归纳出适合龙泉山地区隐伏断层的相对判别标准: M 与 M' 值均 <9.6 ,为活动性极弱-弱断层; M 与 M' 值其中有一个 >9.6 ,即为一般活动性断层, M 与 M' 均 >9.6 即为中等活动断层。一般来说, M 与 M' 越大,活动性越强。整体来看,研究区断层活动性还未达到强活动断层的程度,作为龙门山褶皱逆冲断裂带的最前缘,其活动性已大为降低。

致谢:感谢沉积与特提斯地质审稿专家和编辑老师给予的宝贵意见,从文章逻辑性、内容到参考文献都进行了及时和严谨的修改,让我受益匪浅。

参考文献:

- [1] 黄祖智,唐荣昌. 龙泉山活动断裂带及其潜在地震能力的探讨[J]. 四川地震, 1995, (1):18-22.
- [2] 徐水森,任寰,宋杰. 龙泉山断裂带地震活动性浅析[J]. 四川地震, 2006, (2):21-27.
- [3] 王伟涛,等. 四川龙泉山断裂带变形特征及其活动性初步研究[J]. 地震地质, 2008, 30(4): 969-973.
- [4] 董顺利,李勇,乔宝成,等. 汶川特大地震后成都盆地内隐伏断层活动性分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(3):1-7.
- [5] 高尚华,余雅文,付广裕. 利用重力/GPS联合观测数据计算地壳垂向构造应力的新方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(6):2006-2013.
- [6] Shao Y, Yang X, Li Y. Measurement and result of soil gas radon and soil gas mercury in the exploration of Haihe hidden fault[J]. 中国地震研究(英文版), 2008, 22(2):185-194.
- [7] Lazaromancilla O, Lopez D L, Reyeslopez J A, et al. 222Radon Concentration Measurements biased to Cerro Prieto Fault for Verify its Continuity to the Northwest of the Mexicali Valley. [C]// Agu Spring Meeting. 2009.
- [8] Seminsky K Z, Bobrov A A, Demberel S. Variations in radon activity in the crustal fault zones: Spatial characteristics [J]. Izvestiya Physics of the Solid Earth, 2014, 50(6):795-813.
- [9] Ioannides K, Papachristodoulou C, Stamoulis K, et al. Soil gas radon; a tool for exploring active fault zones [J]. Applied Radiation & Isotopes, 2003, 59(2):205-213.
- [10] King C Y. Radon emanation on San Andreas Fault [J]. Nature, 1978, 271:516-519.
- [11] King C Y. Episodic radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes [J]. J. Geophys. Res., 1980, 85(B6):3065-3078.
- [12] 汪成民,李宣珊等. 断层气测量在地震科学中的应用[M]. 北京:地震出版社, 1991. 1-197.
- [13] 孟晓捷,王根龙,张茂省,等. 土壤氦气测量在活动断裂探测中的应用——以大西安西咸新区为例[J]. 西北地质, 2016, (3):175-186.
- [14] 宇文欣,简春林,朱自强. 断裂逸出氦震前异常变化与地震对应关系的初步研究[M]. 北京:地震出版社, 1995. 173-179.
- [15] 王志成. 土氦测量在海口市活动断层探测中的初步应用[J]. 华南地震, 2006, 26(4):61-66.
- [16] 魏树群,李炜. 测氦法探测煤矿地质构造的研究[J]. 核电子学与探测技术, 1993, 13(4):309-313.
- [17] 陈社发,邓起东,赵小麟,等. 龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制(二)[J]. 地震地质, 1994, 16(4):413-421.
- [18] 李勇,曾允孚. 龙门山逆冲推覆作用的地层标识[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 1995, (2):1-10.
- [19] 刘树根,罗志立,赵锡奎,等. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带—川西前陆盆地系统为例[J]. 地质学报, 2003, 77(2):177-186.
- [20] 邓起东,陈社发,赵小麟,等. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 1994, 16(4):389-403.
- [21] 孟广魁,何开明,班铁,等. 氦、汞测量用于断裂活动性和分段的研究[J]. 中国地震, 1997, 13(1):43-51.
- [22] 王运生,测氦在区域构造稳定性研究中的应用——以滇西北北部区域构造稳定性研究为例[J]. 山地学报, 2002, 20(4):505-508.
- [23] 张骏,高秀君,等. 霍州矿区隐伏断裂(带)活动性氦气测试成果解释分析[J]. 高原地震, 2000, 12(1):16-20.
- [24] 王诗东,虞先国,李怀良,等. 氦气测量法高密度电法在断层定位中的应用[J]. 地学前缘, 2011, 18(2):315-320.
- [25] 张平安,东莞某工程场地隐伏断裂 a 卡氦气勘查技术应用[J]. 西部探矿工程, 2006, (4):118-120.

Soil gas radon and fault activity in the Longquanshan fault zone, Sichuan

LIU Liang^{1,2}, LIANG Bin^{1,2}, YAN Zhonglin^{2,3}, LI Jiangtao^{1,4}, YING Lichao², YANG Pengtao¹, YANG Yudong¹

(1. *Northeast Sichuan Geological Prospecting Party, Mianyang 621010, Sichuan, China*; 2. *School of Environments and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China*; 3. *Guizhou Provincial Traffic Planning Exploration and Design Research Institute Co., Ltd, Chengdu 610000, Sichuan, China*; 4. *Leshan Bureau of Natural Resources, Leshan 614000, Sichuan, China*)

Abstract: The Longquanshan fault zone as the foreland uplift of the Longmenshan nappe zone lies at the eastern boundary of the Chengdu plain, and has long been studied by the geologists concerning the activity of the faults in this zone. The measurement of the soil gas radon may be applied to determine the location and activity of the hidden faults. The measurements of radon in this paper show that there occurs stronger fault activity on the eastern slope than on the western slope, and in the major faults than in the surrounding hidden faults in the northern part of the Longquanshan fault zone. There is a positive correlation between the radon anomaly and fault activity. The average radon concentrations within the Longquanshan fault zone are generally 9.6 times higher than the background values in this area. On the whole, the Longquanshan fault zone is a slightly active to moderately active fault zone.

Key words: Longquanshan fault zone; hidden fault; radon; fault activity; diagnostic criteria