

# 六盘山东麓断裂带逸出气氡浓度特征分析<sup>①</sup>

王小娟<sup>1,2</sup>, 韩晓昆<sup>3</sup>, 陈 志<sup>1</sup>, 崔月菊<sup>1</sup>, 谢 超<sup>1</sup>, 李 营<sup>1</sup>

(1.中国地震局地震预测重点实验室(地震预测研究所),北京 100036;

2.甘肃省地震局,甘肃 兰州 730000; 3.中国科学院地理科学与资源研究所环境修复与资源工程室,北京 100101)

**摘要:**在六盘山东麓断裂带布设 8 条测量剖面,现场测量了土壤气 Rn 浓度及通量,来讨论六盘山东麓断裂带逸出气氡浓度特征及其与构造活动性间关系。测量结果表明:8 个测区测量的气 Rn 浓度平均值在 23.88~66.34 kBq 间,通量在 2 194~14 091 Bqm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup> 间。断裂带土壤气 Rn 浓度平均值在空间分布上,自北向南逐渐增大,由 44.61 kBq 升高至 66.34 kBq,到断裂带南段西贤村、刘店村两个剖面 Rn 浓度平均值减小,这可能是由空间上断裂活动性差异引起的。

**关键词:**六盘山东麓;断裂;逸出气氡

中图分类号:P315.72

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2016)增刊 2-0276-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.Supp.2.0276

## Characteristic Analysis of Escape Gas Radon Concentration from the Eastern Liupanshan Piedmont Fault Zone

WANG Xiao-juan<sup>1,2</sup>, HAN Xiao-kun<sup>3</sup>, CHEN Zhi<sup>1</sup>, CUI Yue-ju<sup>1</sup>, XIE Chao<sup>1</sup>, LI Ying<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Earthquake Prediction China Earthquake Administration (Institute Earthquake Science), Beijing 100036, China;

2.Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3.Department of Environmental Restoration and Resource Engineering, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In this paper, concentration characteristics of escaping radon and its relationship with tectonic activity from the Eastern Liupanshan Piedmont Fault Zone have been discussed. 8 measuring sections were laid in the Eastern Liupanshan Piedmont Fault Zone, radon concentration and flux of soil gas were measured in the field. The measurement results show that: The average value of the soil gas radon concentration is between 23.88 kBq to 66.34 kBq and the flux is between 2 194 Bqm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup> to 14 091 Bqm<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup> in the 8 test areas. The mean value of soil gas Rn concentration in the fault zone in spatial distribution is gradually increased From north to south by 44.61 kBq increased to 66.34 kBq, but the average radon concentration decreased in Xixian Village and Liudian Village which located in the southern section of the fault zone. This may be caused by the difference in the activity of the faults in the space.

**Key words:** eastern Liupanshan Piedmont; active fault; escape gas radon

### 0 引言

位于海原断裂和陇县—宝鸡断裂之间的六盘山东麓断裂是青藏高原东北隅的一条特殊的挤压构造带。关于这一活动构造带的构造变形样式、地壳挤压短量与现代构造变形模式等都已有较多的研究

和论述<sup>[1-3]</sup>。向宏发等<sup>[4]</sup>通过野外调查研究认为六盘山东麓断裂是一条第四纪以来的活动逆断裂构造带;断裂带北段以左旋走滑运动为主,中、南段以倾向逆冲运动为特征;其活动时代北新南老,水平位错

① 收稿日期:2016-06-08

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项重点项目课题(2012IES010203)

作者简介:王小娟(1983—),女(汉族),甘肃定西人,硕士,研究实习员,从事地震监测工作。E-mail:wangxj@gssb.gov.cn。

北强南弱。张秉良等<sup>[5]</sup>采用宏观与微观相结合的方法,通过对六盘山东麓断裂带断层泥的研究,认为六盘山东麓断裂带北段断层泥局部强烈变形,断层活动是以黏滑为主的左旋走滑运动;中、南段断层泥普遍变形,是以蠕滑为主的多期逆冲滑动。邵志刚等<sup>[6]</sup>结合甘东南地区主要大型断裂 7 级地震复发周期的综合分析,认为六盘山—宝鸡断裂有发生 7 级地震的可能。范燕等<sup>[7]</sup>、金春华等<sup>[8]</sup>也通过研究认为南西华山—六盘山断裂带为近年可能发生强烈地震的地区。

氡为铀系衰变产物,无稳定同位素和合成同位素。固体岩石圈中的氡不断地向地表逸散,由于逸散速率和母体运移的变化,在地表或近地表形成可检测到的浓度变化<sup>[9]</sup>。自上世纪 70 年代发现活动断层上方土壤气中逸出氡与地震活动有关以来,美国、日本、前苏联及中国等先后开展了断裂带土壤气中 Rn 的监测和研究<sup>[10-14]</sup>。Rn 由于半衰期短,在干土壤中仅能扩散几米,来源于地壳深部的 Rn 气无法通过扩散方式到达地表,因此多以载体携带形式被运移至地表。在岩石自由破碎面附近的 Rn 气更易逸出。研究表明,主断裂面及其附近土壤<sup>222</sup>Rn 浓度增大<sup>[15-16]</sup>。在活动断裂上方的土壤及地下水中均发现存在 Rn 气异常。土壤 Rn 气测量在世界各国活动断裂带探测和活动性监测工作中都有广泛应用,均观测到高 Rn 浓度<sup>[17-19]</sup>。断层土壤气 Rn 浓度测量不仅能够划分断层活动性和地震危险区,而且对确定隐伏断层位置、断层活动性、断裂性质及转变具有重要意义。我国学者相继开展了各断裂带土壤气体地球化学特征研究<sup>[20-23]</sup>,而对于六盘山东麓断裂带土壤气体地球化学特征的系统研究尚很少。为确定六盘山东麓断裂带逸出气 Rn 浓度和通量变化,我们在该断裂带进行了土壤气 Rn 的测量。

## 1 测区地震地质概况

根据六盘山东麓断裂带断裂走向、活动时代及活动性质的变化,将该断裂带划分为北、中、南 3 段。该断裂北起曹家河,向南经海子峡、开城、杨家岭、和尚铺、香水店、治家至散庄子,南北长约 90 km,断裂总体走向 330°~350°,倾向 SW,倾角在 35°~70°间。六盘山东麓断裂带北段(曹家河至开城)总体走向 330°,倾向 SW,倾角 60°~70°,呈略向北东凸出的弧形,长约 25 km;晚更新世至全新世地层均有不同程度的错动,是六盘山东麓断裂最为活动的区段。该断裂带中段(开城至香水店)总体走向 350°,

倾向 SW,倾角 40°~60°,长约 35 km;地貌上为中高山与中低山的分界,线性特征清楚。而南段(香水店至散庄子)总体走向 340°,倾向 SW,倾角 50°~70°,略成弧形弯曲,长约 30 km。地貌上仍为西部中高山与东部中山低丘及山间盆地的分界<sup>[4-6]</sup>。

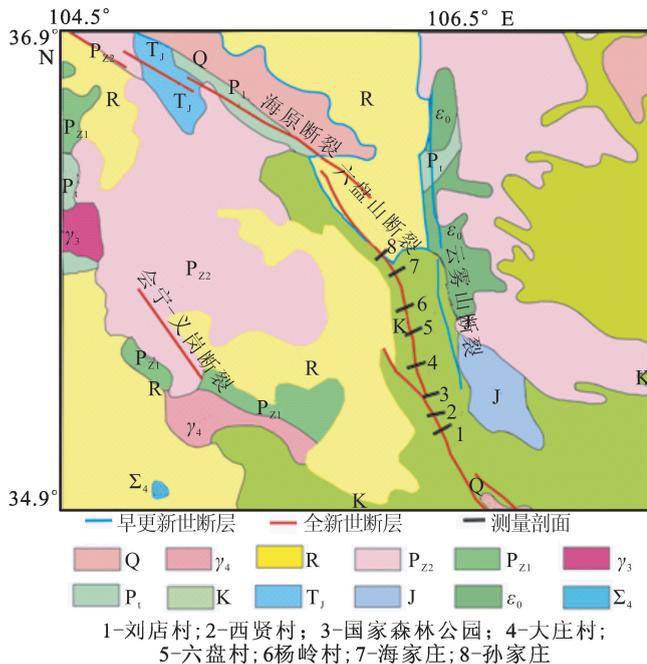


图 1 六盘山东麓断裂带及其周围地质图

## 2 测量方法

在六盘山东麓断裂北段海家庄、孙家庄附近各布置了 3 条测线,测点间距 10 m;在中段大庄村附近布置了 2 条测线,测点间距 15 m,在六盘村、杨岭村附近各布置了 3 条测线,测点间距分别为 20 m、10 m;在南段刘店村、西贤村、国家森林公园附近各布置了 3 条测线,测点间距分别为 10 m、10 m、15 m。此次测量中共布置了 8 个剖面,788 个测点,各剖面测线布设见图 2。

氡浓度测量采用常规方法<sup>[24-25]</sup>。测量过程中,首先在测点处打孔,孔径为 30 mm、深度为 800 mm;然后将取样器置于孔内,封住孔口;连接仪器后开始取样、测量。利用 RTM2200 型测氡仪野外现场测定其 Rn 浓度,检测限为 7.14 Bqm<sup>3</sup>,测量误差为 5%。

采用静态暗箱法进行土壤气体的逸散通量测量<sup>[26-28]</sup>。通量箱是壁厚 5 mm,半径为 20 cm 的聚四氟乙烯半球壳。土壤气 Rn 通量是使用便携式 RAD7 测氡仪连续循环抽气 1 h,采样间隔为 5 min。测量 Rn 通量时,在连接取样器与仪器的管道

中间加装一个硅胶干燥管,以降低湿度的影响。

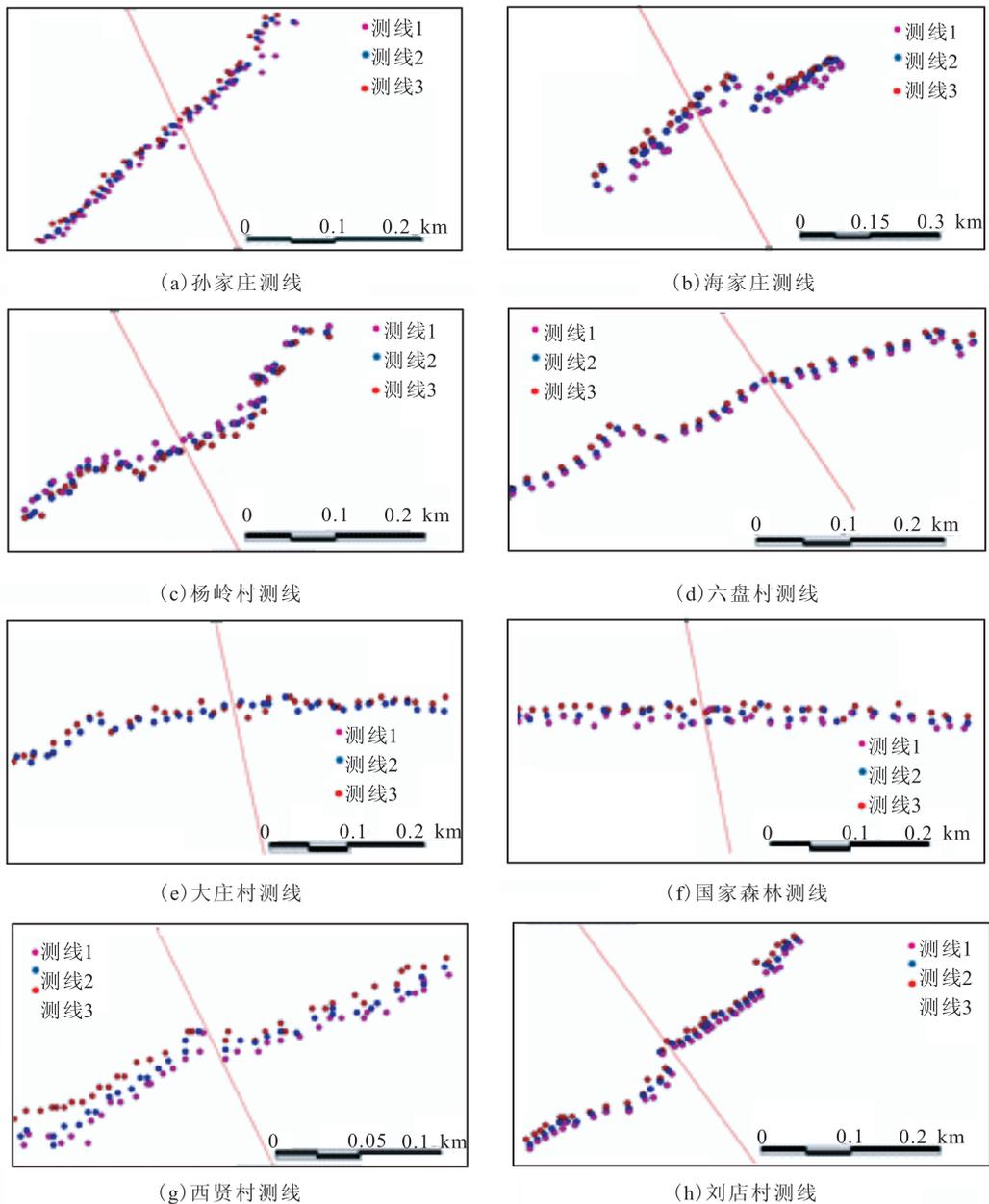


图2 六盘山东麓断裂带土壤气氡测线分布图

### 3 测量结果

#### 3.1 六盘山东麓断裂带土壤气氡浓度

此次布置的8个剖面,共788个测点测量的土壤气Rn浓度结果见表1。

从表1可以看出,六盘山东麓断裂带土壤气Rn浓度在每条测线上差异很大。

由表1、图3、图4可以看出,各剖面土壤气Rn总体表现出如下特征:

(1) 断裂带土壤气Rn浓度平均值自北向南逐

渐增大,由44.61升高至66.34 kBq,到断裂带南段的西贤村、刘店村两个剖面其浓度平均值减小,分别为36.37 kBq、23.88 kBq;

(2) 断裂带土壤气Rn浓度最大值在杨岭村剖面上,最小值在刘店村剖面上。杨岭村剖面上气Rn浓度变化范围最大,海家庄剖面气Rn浓度变化范围最小;

(3) 在8个剖面的测量中,气Rn浓度平均值在23.88~66.34 kBq间,国家森林公园剖面上气Rn浓度平均值最大,而刘店村剖面上气Rn浓度平均

值最小。

表 1 六盘山东麓断裂带各剖面氡浓度变化范围及平均值

测量剖面	孙家庄	海家庄	杨岭村	六盘村	大庄村	国家森林公园	西贤村	刘店村
Rn 浓度变化范围/kBq	7.53~87.47	17~100	10.81~154.14	7.8~102.8	10.95~135.57	7.15~114.09	9.5~77.43	6.5~55.47
平均值/kBq	44.61	55.61	57.3	41.24	61.36	66.34	36.37	23.88

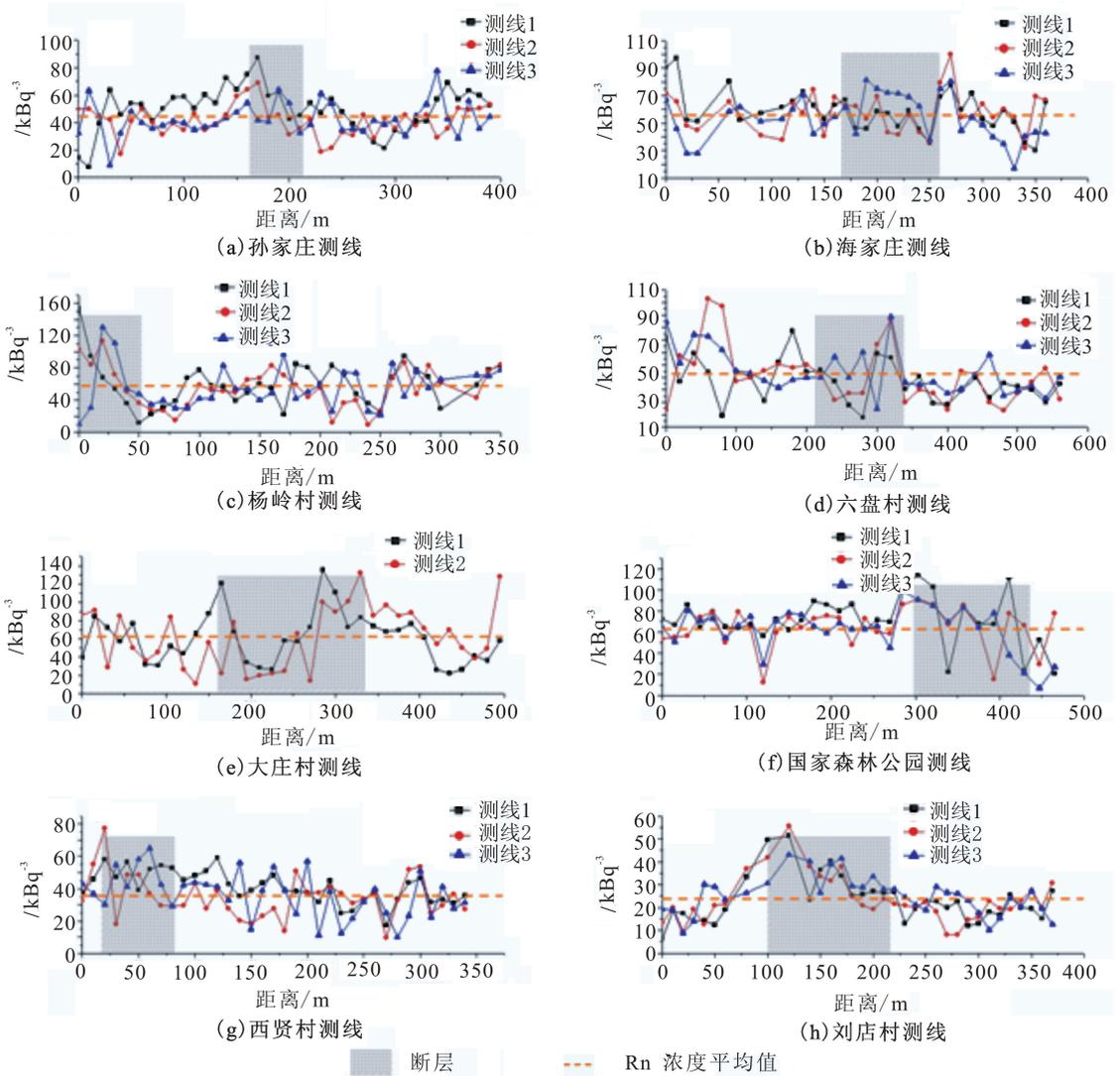


图 3 六盘山东麓断裂带土壤气 Rn 浓度

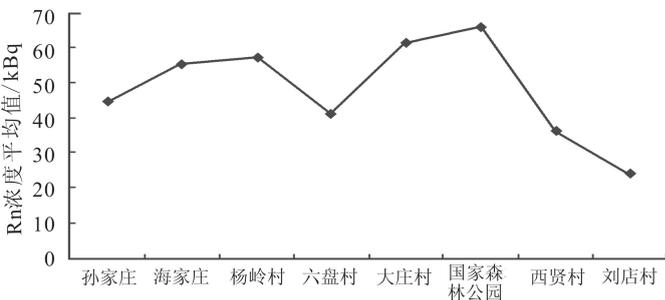


图 4 六盘山东麓断裂带剖面 Rn 浓度平均值变化图

### 3.2 六盘山东麓断裂带 Rn 逸散通量

在六盘山东麓断裂带的 8 个剖面中,每个剖面分别布置了 2 个测点,以测量土壤气 Rn 的通量,将两点测值的平均值作为两个测区的 Rn 通量值。

土壤气 Rn 逸散通量值利用以下公式进行计算:

$$F_{Rn} = V \cdot \Delta c / t \cdot A = 2/3 \cdot r \cdot \Delta c / t$$

式中: $F_{Rn}$ 为 Rn 的通量值; $V$ 为通量箱的体积; $A$ 是通量箱底部的面积; $r$ 是通量箱底部的半径; $\Delta c / t$ 是通量箱内 Rn 浓度变化率,由野外测量取得,单位

是  $\text{Bqm}^{-3} \text{s}^{-1}$ 。

从表 2 可以看出,断裂带北段海家庄剖面的  $R_n$  通量值最高,断裂带中段大庄村剖面  $R_n$  通量值最低。

表 2 六盘山东麓断裂带逸散通量

测项(单位)	刘店村	西贤村	国家森林公园	大庄村	六盘村	杨岭村	海家庄	孙家庄
$R_n/(\text{Bqm}^{-2} \text{d}^{-1})$	5 865	3 450	8 338	2 095	5 006	4 098	14 091	2 194

南段西贤村、刘店村两个剖面又突然减小。断裂带土壤气浓度分布主要与断裂内部构造有关,而断裂带两侧覆盖的沉积物厚度也会对其产生影响。

六盘山东麓断裂带土壤气  $R_n$  的逸散通量值为  $5\ 642 \text{ Bqm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ,其值大于意大利中部的富齐诺山间盆地,在该地区土壤气中  $R_n$  的通量一般在非断层地区为  $864 \text{ Bqm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ,而断层区在  $3\ 888 \text{ Bqm}^{-2} \text{d}^{-1}$  以上,最大可达到  $10\ 368 \text{ Bqm}^{-2} \text{d}^{-1}$ 。该值也大于昆仑山断裂西大滩段测得的平均值  $1218 \text{ Bqm}^{-2} \text{d}^{-1}$  [28-29]。

由于不同土壤气体的来源和物理化学性质不同,且研究区内构造地质、水文条件、岩石类型不同,即使同一条断裂,不同气体也会表现出不同的地球化学特征。对于同一条断裂而言,断裂所处的应力环境影响土壤气体运移。一般情况下,同一条断裂在不同地段其活动性会有区别,测得的土壤气浓度及通量值也有区别 [30]。8 个测区断裂活动性的差异可能是土壤气  $R_n$  浓度及通量高低差异的主要原因。由于断裂带破碎程度不同,导致断裂带各向异性,使得断裂带不同地点渗透性不同,进而影响土壤气浓度。张秉良等 [5] 研究表明六盘山东麓断裂带北段断层泥厚仅几厘米,水系山脊同步左旋位错,晚更新世至全新世地层均有不同程度的错动,是六盘山东麓断裂最为活动的区段;中段断层泥厚几十厘米,水系无明显位错,白垩系砂质泥岩挤压逆冲在渐新统红色泥岩之上,且晚更新世早中期有活动迹象;南段断层泥厚 1~3 m,现代水系位错不明显,断层的逆冲滑动主要发生在早中更新世。断裂破碎程度不同是由于断裂活动引起的,测区北段、中段、南段土壤气  $R_n$  浓度的空间变化主要与断裂活动性有关。而向宏发等 [4] 通过研究证实,六盘山东麓断裂带北段断裂线性清晰,在地貌上形成断层浅沟和陡坎,并多处见到断层的地质露头。表现为逆左旋运动,最新活动从晚更新世一直延续至全新世;断裂带中段一些段落有明显断层陡坎和断层谷存在,白垩系砂质泥岩挤压逆冲至渐新统红色泥岩之上,并影

## 4 土壤气体 $R_n$ 的空间变化

六盘山东麓断裂带土壤气  $R_n$  空间变化分布差异大,断裂带气  $R_n$  浓度平均值自北向南逐渐增大,到

响了上更新统砂砾层,以逆断层为主,水平位错不明显;断裂带南段断裂线性清晰,多为断裂陡坎和断层宽谷地貌,表现为挤压逆冲或逆掩活动性质。该断裂主要发生在早、中更新世活动,晚更新世以后活动性不甚明显。因此测区气  $R_n$  浓度的空间变化差异应与断裂带空间活动性差异有关。

## 5 结论

在六盘山东麓断裂带孙家庄、海家庄、杨岭村、六盘村、大庄村、国家森林公园、西贤村、刘店村 8 个地区进行了土壤气  $R_n$  及通量的测量,确定了区域内土壤气  $R_n$  背景特征。断裂带土壤气  $R_n$  浓度自北向南有逐渐增大趋势,断裂带北段海家庄测区土壤气  $R_n$  通量值最高,中段大庄村测区最低,这可能是断裂带两侧土壤性质和断裂活动性差异引起的。

## 参考文献

- [1] 邓起东,张维歧,张培震,等.海原走滑断裂带及其尾端挤压构造[J].地震地质,1989,11(1):1-14.
- [2] 陈社发,张培震,邓起东.海原断裂带的演化历史及变形机制——海原活动断裂带[M].北京:地震出版社,1990:139-176.
- [3] 孙照民,邓起东.六盘山东麓断裂和陇县—宝鸡断裂带基本特征及其相互关系[M].北京:地震出版社,1994.
- [4] 向宏发,魏顺民,张秉良,等.六盘山东麓活动逆断裂构造带晚第四纪以来的活动特征[J].地震地质,1998,20(4):321-327.
- [5] 张秉良,向宏发,魏顺民,等.六盘山东麓断裂断层泥的组构特征及其意义[J].地震地质,2000,22(1):47-52.
- [6] 邵志刚,张浪平.南北地震带北段近期强震趋势研究[J].中国地震,2013,29(1):26-36.
- [7] 范燕,车兆宏.南北地震带北段及其两侧断层现今活动性[J].地震,2001,21(2):87-93.
- [8] 金春华,张文孝,任雪梅,等.两种新参数在银川—河套和祁连山—六盘山地震带地震预报中的应用研究[J].西北地震学报,2005,27(2):141-145.
- [9] 杜建国,宇文欣,李圣强,等.八宝山断裂带逸出氡的全球化特征及其映震效能[J].地震,1998,18(2):155-162.
- [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, 李宣璐, 魏柏林. 断层气测量在地球科学中的应用[J]. 北京: 地震出版社, 1991: 1-197.
- [13] 宇文欣, 简春林, 朱自强. 断裂逸出氡震前异常变化与地震对应关系的初步研究[G]//国家地震局分析预报中心编. 地震预报研究. 北京: 地震出版社, 1995: 173-179.
- [14] 张慧, 张新基, 苏鹤军, 等. 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*, 2010, 32(3): 273-278.
- [15] Ajayi T R, Adepelumi A A. Reconnaissance Soil-gas Radon Survey over Faulted Crystal Line Area of Ile-Ife, Nigeria[J]. *Environmental Eology*, 2002, 41(5): 608-613.
- [16] Burton M, Neri M, Condarelli D. High Spatial Resolution Radon Measurements Reveal Hidden Active Faults on Mt. Etna[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(7): L07618.
- [17] Cui L. Some Results of Radon Hazard Investigations[J]. *Geological Review*, 1994, 40(2): 157-164.
- [18] Igarashi G, Saeki S, Takahata N, et al. Ground-water Radon Anomaly before the Kobe Earthquake in Japan[J]. *Science*, 1995, 269(5520): 60-61.
- [19] Tanner A B. Radon Migration in the Ground; a Supplementary Review, the Natural Radiation Environment[R]. Symposium Proceeding, Houston Texas, 23-28 April 1978; Report CONF-780422, US Department of Energy, Washington D C. 1980: 5-56.
- [20] King C Y, King B S, Evans W C, et al. Spatial Radon Anomalies on Active Faults in California[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11(4): 497-510.
- [21] 张新基, 张慧, 苏鹤军, 等. 刘家堡活动断层土壤气氡、汞地球化学特征[J]. *地震*, 2005, 25(4): 87-92.
- [22] 周晓成, 郭文生, 杜建国, 等. 呼和浩特地区隐伏断层土壤气氡、汞地球化学特征[J]. *地震*, 2007, 27(1): 70-76.
- [23] 赵振荣, 张慧, 苏鹤军, 等. 玛曲断裂带土壤气汞、氡地球化学特征[J]. *西北地震学报*, 2011, 33(4): 376-379.
- [24] 李莹, 杜建国, 王富宽, 等. 延怀盆地土壤气体地球化学特征[J]. *地震学报*, 2009, 31(1): 82-91.
- [25] Lehmann B, Ihly B, Salzmann S, et al. An automatic Static Chamber for Continuous  $^{220}\text{Rn}$  and  $^{222}\text{Rn}$  Flux Measurements from Soil[J]. *Radiation Measurements*, 2004, 38: 43-50.
- [26] Wang D, He L, Shi X, et al. Release flux of Mercury from Different Environmental Surfaces in Chongqing, China[J]. *Chemosphere*, 2006, 64: 1845-1854.
- [27] Tuccimei P, Soligo M. Correcting for Interference in Soil Radon Flux Measurements[J]. *Radiation Measurements*, 2008, 43(1): 102-105.
- [28] 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*, 2007, 112: B05407.1-B05407.23.
- [29] Crockett R, Perrier F, Richon P. Spectral-decomposition Techniques for the Identification of Periodic and Anomalous Phenomena in Radon Time-series[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(3): 559-564.
- [30] Etiopie G, Lombardi S. Evidence for Radon Transport by Carrier Gas Through Faulted Clays in Italy[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1995, 193(2): 291-300.