

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^①

苏鹤军¹, 张 慧¹, 李晨桦², 伍剑波², 周慧玲²

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以西秦岭北缘断裂带不同段断层气 Hg、Rn 浓度空间分布特征分析为基础、通过对历史大震背景、现今地震活动影像以及 b 值空间分布特征的对比分析, 从地球化学的角度, 对西秦岭北缘断裂带不同段落的活动习性进行深入探讨, 并识别出该断裂带潜在大震危险区段。可为未来地震趋势判定及震情跟踪提供重要的基础资料。

关键词: 西秦岭北缘断裂带; 断层气; 地震活动性参数; 强震危险性

中图分类号: P315.724

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0671-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0671

Geochemical Features of Fault Gas on Northern Margin Fault of Xiqinling and Its Seismic Hazard Analysis

SU He-jun¹, ZHANG Hui¹, LI Chen-hua², WU Jian-bo², ZHOU Hui-ling²

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

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The Northern Xiqinling fault zone is located at the northeast edge of the Tibet Plateau, which is one of the largest active faults in northern region of the plateau and the key earthquake hazard area in Gansu province. During the most recent decade, many large earthquakes have occurred in succession near the rim of Bayan Har Block, including the Mani $M_s 7.9$ earthquake on the western border, the KunLun $M_s 8.1$ earthquake on the northwestern border, the Wenchuan $M_s 8.0$ and Lushan $M_s 7.0$ earthquakes on the eastern border, the Yushu $M_s 7.1$ earthquake on the southern border, and the MinXian $M_s 6.6$ earthquake on the northeast border. The spatial and temporal variation characteristics of these seismic events show that the Bayan Har Block has entered a new period of seismic activity, which has enhanced the earthquake risk of the adjacent areas including the Qaidam and Qilian blocks. Therefore, continued research of seismic hazards and background fields of the Northern Xiqinling fault zone are necessary.

In this study, we surveyed the spatial distribution characteristics of fault gas concentration on the Northern Xiqinling fault zone. The hazard area was predicted according to the spatial concentration anomaly values of Hg and Rn soil gas combining with the seismotectonic background and spatiotemporal evolution characteristics of large historical and recent earthquakes. We conclude that the tectonic background of large earthquakes at the F_1 and F_4 segments of the Western QinLing fault zone includes few small earthquakes, a lengthy period since the most recent large

① 收稿日期: 2013-08-30; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2013066

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务项目(88-5); 地震科技星火计划项目(XH12048)

作者简介: 苏鹤军(1973-), 男, 甘肃通渭人, 高级工程师, 硕士, 主要从事地震地下流体和地震预报研究。Email: suhejun@126.com

通讯作者: 张慧(1966-), 女(汉族), 博士, 研究员, 主要从事地下流体与活动构造应用研究。Email: zhanghui@gssb.gov.cn

earthquake, and a low gas concentration of Hg and Rn. In comparison, the F_3 segment of the Northern Xiqinling fault zone showed frequent small earthquakes, a short period since the most recent large earthquake, and a high gas concentration of Hg and Rn. This research can provide vital background information for earthquake prediction.

Key words: the Northern margin fault zone of Xiqinling; fault gas; seismicity parameter; strong earthquake hazard

0 引言

近十多年来,沿巴颜喀拉地块四周边缘地区相继发生了多次大震,如西缘的玛尼 $M_s7.9$ 地震、西北缘的昆仑山口 $M_s8.1$ 地震,东缘的汶川 $M_s8.0$ 地震和庐山 $M_s7.0$ 地震,南缘的玉树 $M_s7.1$ 地震以及东北缘附近的岷县漳县 $M_s6.6$ 地震。这些地震事件的时空变化特征表明巴颜喀拉地块正处于一个新的地震活跃期,同时加强了与其毗邻的柴达木、祁连地块地震活动形势,特别是岷县漳县 $M_s6.6$ 地震处于巴颜喀拉地块和祁连地块地的接合部位,这是否意味着青藏块体东北缘的柴达木、祁连次级地块开始活跃,值得引起大家的重视。另外,根据汶川地震的震源破裂分布,万永革等^[1]计算了在周围断层上的库仑破裂应力变化,结果表明汶川 8.0 级地震的发生使得西秦岭断裂东段上库仑破裂应力加载效应尤为显著。因此,加强对西秦岭北缘断裂带地震危险性分析研究,对未来区域地震形势判定具有迫切的现实意义。

西秦岭北缘断裂带地处青藏高原东北边缘,是青藏高原北部大型活动断裂带之一^[2-4]。该断裂带东端与秦岭北缘断裂相连,往西经天水、武山、漳县、至临夏以西,往西经青海南山与柴达木北缘断裂相接,全长 600 km 左右,走向 $280^\circ \sim 310^\circ$ 。由于西秦岭北缘断裂带具有特殊的地球动力学构造背景,因此该断裂一直倍受广大地球科学工作者的关注。

西秦岭北缘断裂带由一组近于平行的 NWW 走向断裂组成,并形成了一系列拉分盆地或阶区,如锅麻滩拉分区、莲麓盆地、漳县盆地、鸳鸯镇和凤凰山拉分区等。根据这些断层阶区、断层不同段的几何特性、运动特征以及断层性质等,构造地质学将其划分为四个次级段,从东到西分别为锅麻滩断裂段(F_1)、漳县断裂段(F_2)、鸳鸯镇断裂段(F_3)和天水以东段(F_4)^[2]。西秦岭断裂的走滑特性与拉分构造有利于深部气体向地表富集,是地球化学方法研究的理想场所(图 1)。

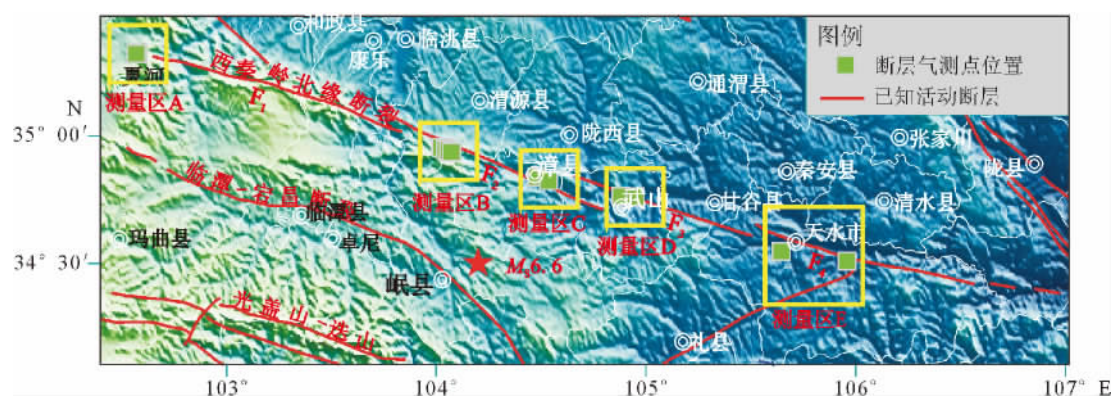


图 1 西秦岭北缘断裂带展布与断层气测线布置图

Fig. 1 Distribution of Northern margin fault zone of Xiqinling and gas survey lines

本文通过西秦岭北缘断裂带断层气地球化学特征与历史和现今地震活动特征的对比分析,并构造地质学研究成果,对西秦岭北缘断裂带不同段落的活动习性进行深入探讨,从地球化学的角度,识别出该断裂带潜在大震危险区段,为未来地震趋势判断及震情跟踪提供重要的基础资料。

1 测量仪器与方法

测量对象有测 Hg、测 Rn 两项。Hg 测量采用 JM-4 数字金膜测汞仪,具有体积小、轻便、灵敏度高等特点,最低检出限为 $10 \sim 2$ ng; Rn 的测量采用 FD-3017RaA 测氡仪,为一种瞬时测氡仪器,极限探测灵敏度为 0.37 Bq/L。

取样方法是: 首先用钢钎打一个导向眼插入取样器, 用橡皮管将 FD-3017RaA 测氦仪与取样器连接, 排出橡皮管内及取样器内的残留气体, 然后开始正式取氦样。取样体积为 1.5 L。完成氦的取样后, 再将取样器与 JM-4 数字金膜测汞仪及大气采样仪连接, 流速 0.5 L/min, 抽气时间 2 min, 取样体积为 1 L。

2 西秦岭北缘断裂带断层气空间变化特征

国内外研究表明, 在断层的不同区段由于区域应力和地下介质状态的不同, 逸出断层气的浓度大小和断层气组分的种类存在一定的差异, 而这些气体浓度大小与组分种类的差异又为研究断裂的分段提供了有力的证据, 因此对不同断裂或同一断裂的不同段的断层气浓度强度空间变化特征的研究将成为利用地球化学方法研究断裂分段性的一个重要手段^[5-7]。上个世纪 90 年代, 兰州地震研究所的石雅镠、张必敖、康来迅等人曾对该断裂带气体地球化学进行过相关研究: 石雅镠等^[6]通过沿断裂带温泉水水溶气中微量气体(H₂、He、Ar 等), 对断层不同段地震危险性进行分析, 结果认为和政一天水段为潜在强震危险段; 康来迅等人^[5]通过 N₂、O₂、CO₂ 等进行浓度强度分析, 结果认为西秦岭北缘断裂带东段(鸳鸯镇拉分盆地以东)为 6 级地震的潜在强震危险段。这些工作为利用断层带地下气体研究断层活动不均匀性及地震危险区段分析开创了新的思路。但由于受当时理论与技术手段等诸多因素的限制,

在断层气测项和测线布置的空间密度及均匀度等方面对整个西秦岭断裂带活动习性的分段研究不够详细, 主要表现为两个方面: 一是西秦岭北缘断裂带温泉水的出露点在空间上相对集中在 F₂ 和 F₃ 段, 这在一定程度上限制了利用水溶气组分及其浓度进行整个西秦岭断裂带的分段活动特征研究的普遍性与合理性; 二是测量的断层气组分为一些常量气体, 易受浅层地表或大气环境的影响, 而且断层气的测点也相对集中在漳县以东区段, 存在测线布置较少, 测量范围较窄, 测量空间分辨率较差等问题, 同样影响对整个断裂带气体浓度空间分布特征的系统分析。针对这一现象, 本文在查阅构造地质学对西秦岭北缘断裂带活动分段性最新研究成果的基础上, 选择断层气微量气体成份 Hg 和 Rn 为主要测项, 尽量在西秦岭北缘断裂带各主干断层上进行均匀布置 12 条测线, 以提高断层气浓度空间变化的分辨率和整体布局的合理性。我们从西到东布置了 A、B、C、D 四个测量区, 其中, A 区位于 F₁ 西端, 布设 HT1、HT2 两条测线; B 区位于 F₂ 西侧, 布设 HT3、HT4、HT5、HT6 四条测线; C 区位于 F₂ 东侧, 布设 HT7、HT8 两条测线; D 区位于 F₃ 西侧, 布设 HT9、HT10 两条测线; E 区位于 F₄ 西侧, 布设 HT11、HT12 两条测线(图 1、表 1)。这样设置测线的主要目的是尽可能地均匀分布在每一主干断裂上。

表 1 西秦岭北缘断裂带各剖面断层气浓度强度

Table 1 Intensity of fault gas concentration in various sections of Northern margin fault zone of Xiqinling

测量区域	地名	测线	测线位置(起点)		Hg	Rn	说明
			纬度/(°)	经度/(°)			
A	夏河	HT1	35.32	102.58	2.286	7.618 5	最大值
		HT2	35.32	102.57	1.372	9.311 5	
		HT3	34.96	104.02	4.229	30.643 3	
B	渭源	HT4	34.95	104.05	1.943	40.632 0	最大值
		HT5	34.94	104.06	1.715	27.088 0	
		HT6	34.94	104.08	2.172	45.541 7	
C	漳县	HT7	34.84	104.48	1.600	6.900 0	最大值
		HT8	34.83	104.54	1.486	10.520 0	
D	武山	HT9	34.76	104.88	0.914	10.760 0	最大值
		HT10	34.76	104.95	1.372	4.580 0	
E	天水	HT11	34.55	105.65	1.143	4.880 0	最大值
		HT12	34.51	105.96	1.143	4.320 0	

另外, 为了更好地对西秦岭北缘断裂带断层气浓度分布特征与断层活动性关系进行分析, 我们会对单个剖面浓度曲线形态进行详细分析。结果表明: 西秦岭北缘断裂带断层气曲线形态对断裂带的

位置、断层性质及几何形态均具有明确的指示性, 并能够初步识别断裂宽度, 破裂程度等特性, 表明我们的测量数据真实可靠^[8]。本文主要以西秦岭北缘断裂带不同段活动习性 & 地震危险性研究为目的, 在

前面已有工作的基础上,进一步对西秦岭断裂带断层气空间变化特征进行详细分析^[9-10]。具体方法为把所有剖面所获得的全部数据作为总体样,再将每一剖面最大异常值除以总样本平均值作为异常浓度强度(表1),然后投影到断层空间展布图上,可直观地比较分析断裂带各主干断裂断层气浓度变化情况。

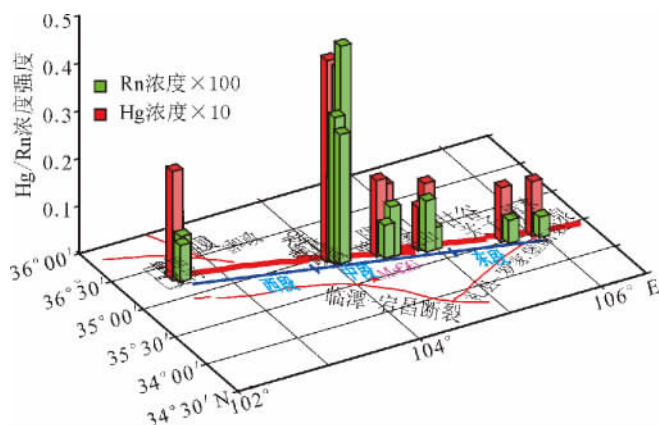


图2 西秦岭北缘断裂带断层气浓度强度分布图

Fig. 2 The histogram distribution diagram of gas concentration along the Northern margin fault of Qinling

图2为汞氡浓度强度空间分布特征图。由图可以看出,西秦岭北缘断裂带断层气汞、氡浓度强度具有明显的分段特性,总体呈中间高两端低的分布特征,其中 F_2 西侧的黄香沟段断层气浓度强度最大; F_2 东侧的漳县、 F_3 东侧的武山段次之; F_1 和 F_4 段相对较小。由此西秦岭北缘断裂带可分成三段:西段为峡城以西段,中段为峡城—漳县—武山段,东段为天水以东段,这种分段特性可能与区域历史强震及现今地震活动特征存在一定关联,因此我们有必要对西秦岭北缘断裂带地震活动特征进行分析探讨。

3 西秦岭北缘断裂带地震活动和 b 值空间分布特征

断裂带土壤气体浓度不仅与断层性质、运动特征、断裂带地下介质孔隙度、裂隙度大或破裂程度等物理参量等直接相关,还与历史大震背景及或现今地震活动习性等关系紧密^[7]。西秦岭北缘断裂带是全新世活动断裂带,构造活动强烈,地震发生频繁,历史上发生过多大震。据中国地震局大震目录和小震目录统计结果显示:在西秦岭北缘断裂带为中心线的50 km范围内共发生7.0~7.9级地震2次,6.0~6.9级地震4次,5.0~5.9级地震8次,4.0~

5.9级地震20次。这些地震活动具有明显的时空差异性。

(1) 历史地震的空间分布差异性。从空间分布影像来看,西秦岭北缘断裂带各主干段地震分布具有明显的差异性:西段(夏河—峡城段, F_1)没有6.0级以上的中强地震记录;东段天水北道以东(F_4)段只有1次6.0级地震;而中强地震主要集中在中段(F_2 、 F_3),如BC47年的陇西6 $\frac{3}{4}$ 级地震、128年甘谷6.5级地震、143年渭源漳县边界7级地震、600年车场下附近的6.0级地震、734年天水7级地震以及1765年武山6.5级地震等。

(2) 最近历史大震离逝时间的差异性。 F_2 段143年7级地震距今已有1813年; F_3 段最近的1765年武山6.5级地震距今只有248年(有人认为该地震为1717年通渭7 $\frac{1}{2}$ 级地震的余震); F_4 段最近的600年6.0级地震距今为1413年。

综上所述,西秦岭北缘断裂带历史与现今地震活动具有明显的分段特征:东段(F_4)地震活动性较弱,西段(F_1)次之,而中段(F_2 、 F_3)地震活动的强度和频度相对较大。另外,现今小震活动影像与历史大震空间分布特征相一致,即西秦岭北缘断裂带历史上发生过大震的区段同时是现今小震活动频繁的区段(图3)。而且这些区段的断层气浓度强度也相对较高,因此断层气浓度空间分布特征在一定程度上反映的是区域地震活动水平。对于发生过大震的区段,如果最近一次大震离逝时间较短,区域应力还处于一个较长时间的恢复期,地震产生的地下裂隙正在愈合过程中,这个过程易于形成中小地震孕育背景,也有利于地下深部气体向地表逸出并形成异常,如西秦岭北缘断裂带的 F_2 和 F_3 主干断层;反之,如最近一次大震离逝时间较长,已过区域应力快速调整阶段,断裂带重新粘合闭锁,地下深部气体运移路径重新受阻,地下流体活动减弱,逐渐形成强震孕震环境,强震危险性增强,如西秦岭北缘断裂带的 F_1 和 F_4 主干断层。

b 值是一个刻画大小地震比例关系的参量。基于应力的高低与 b 值成反比关系,Wiemer及Wyss等^[12-13]利用 b 值的空间分布特征研究活动断裂带现今相对应力水平的空间分布,从中区分出正处于相对高应力积累的段落或者凹凸体段落。易桂喜等曾将 b 值的空间分布特征用于判定活动断裂带不同段现今应力积累水平,由此判定断裂带不同段落现今活动习性与强震危险地段的相关研究^[14-15]。通常认为,高 b 值表示小震频率高,发生中强地震的危险性

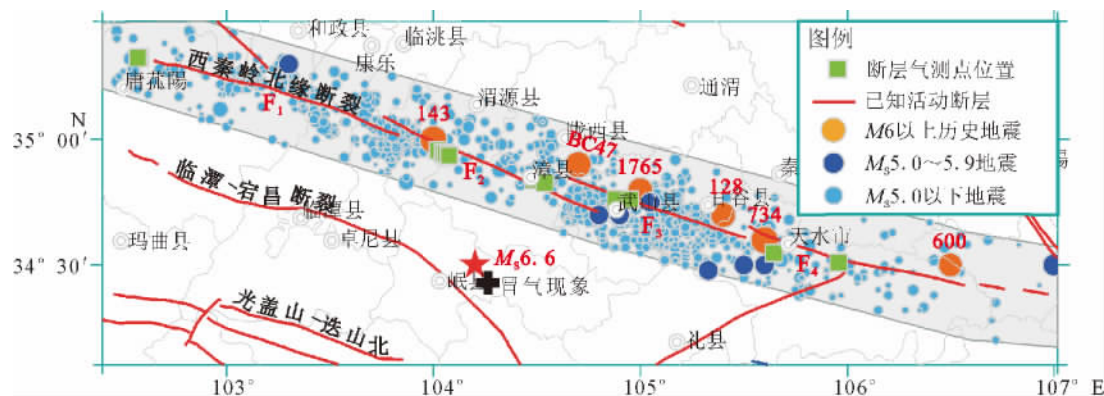


图 3 西秦岭北缘断裂带历史与现今地震活动特征图

Fig. 3 Characteristics of historical and recent seismic activity on Northern margin fault of Xiqinling

小,反映区域应力积累水平较低;反之,低 b 值表示小震频率低,发生中震地震的危险大,反映区域应力积累水平较高。而 a 值与 b 值正好相反^[16-19]。

本文采用了 1965—2009 年全国地震目录,利用 ZMAP 程序对西秦岭北缘断裂带 b 值进行空间扫描计算。其计算方法为最大似然法,网格的划分 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,扫描半径 50 km。图 4 是西秦岭北缘断裂带地震活动参数 b 值水平空间分布特征图,由图可以看出,西秦岭北缘断裂带 b 值在水平空间上具有明显的分段性:高 b 值主要集中在断裂带中段(F_2 和 F_3);而低 b 值主要集中在断裂东段(F_4)及西段(F_1)。根据 b 值空间分布特征,我们可以把西秦岭北缘断裂活动性大致分为以下三段:西段锅麻滩断裂(F_1)、中段漳县断裂和鸳鸯断裂(F_2 、 F_3)、东段天水以东(F_4),这与利用断层气浓度空间分布特征分段性分析的结果是一致的,表明断层气浓度与现今地震活动的频度与强度之间存在一定的关联性,这就是利用断层气浓度空间分布特征进行断裂活动分段性研究及地震危险性分析的理论基础。

4 结论与探讨

本文通过西秦岭北缘断裂带不同段断层气浓度强度空间分布特征分析,结合地震、构造地质资料及地震活动性参数 b 值对比研究,初步形成以下结论:

(1) 西秦岭北缘断裂带断层气汞、氩浓度强度具有明显的分段特性:总体呈中间高两端低的分布特征,其中 F_2 西侧的黄香沟段断层气浓度强度最大, F_2 东侧的漳县、 F_3 东侧的武山段次之, F_1 和 F_4 段相对较小。由此西秦岭北缘断裂带可分成三段:西段为峡城以西段,中段为峡城—漳县—武山段,东段为天水以东段。

(2) 西秦岭北缘断裂带历史与现今地震活动具

有明显的分段特征:东段(F_4)地震活动性较弱,西段(F_1)次之,而中段(F_2 、 F_3)地震活动的强度和频度相对较大。这与断层气浓度强度空间分布特征相一致,即西秦岭北缘断裂带历史上发生过大震的区段同时是现今小震活动频繁的区段,而且断层气浓度强度也相对较高,因此,断层气浓度空间分布特征在一定程度上反映的是区域地震活动水平。笔者认为:利用断层气地球化学方法与地震学、构造地质学、地球物理学等其它学科手段相结合,对断层活动性研究是种行之有效的方法。

(3) 综合断层气浓度、历史地震背景以及现今地震活动特征等研究结果,我们认为西秦岭北缘断裂带两端(锅麻滩 F_1 段和天水以东 F_4 段)强震潜在危险性较大;而中段(武山—漳县 F_2 、 F_3 段)中小地震的可能性一直存在。

参考文献 (References)

- [1] 万永革,沈正康,盛书中,等. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报, 2009, 31(2): 128—139.
WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, SHENG Shu-zhong, et al. The Influence of 2008 Wenchuan Earthquake on Surrounding Faults[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(2): 128-139. (in Chienes)
- [2] 李传友,张培震,张剑玺,等. 西秦岭北缘断裂带黄香沟段晚第四纪活动表现与滑动速率[J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 54—63.
LI Chuan-you, ZHANG Pei-zhen, ZHANG Jian-xi, et al. Late-quaternary Activity and Slip Rate of The Western Qinling Fault Zone at HuangXiangGou[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(1): 54-63. (in Chienes)
- [3] 曹娟娟,刘百箴,闻学泽. 西秦岭北缘断裂带特征地震平均复发间隔的确定和地震危险性评价[J]. 地震研究, 2011, 26(4): 372—381.
CAO Juan-juan, LIU Bai-zhi, WEN Xue-ze. Determination of the Average Recurrence Intervals of Characteristic Earth-

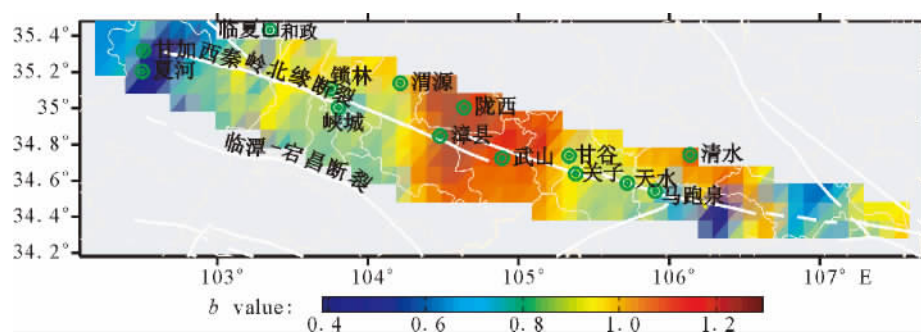


图4 西秦岭北缘断裂带 b 值空间变化特征

Fig. 4 b -value space variation characteristics of Northern margin fault of Xiqinling

- quakes and Estimate of Earthquake Risk on Northern Xiqinling Faults[J]. Journal of Seismological Research, 2011, 26(4): 372-381. (in Chienes)
- [4] 李延兴, 胡新康. GPS 测量所揭示的西秦岭北缘断裂带现今活动特征[J]. 中国地震, 1999, 15(4): 295-302.
LI Yan-xing, HU Xin-kang. Current Activity Characteristics of the Fault Zone Along the North Margin of West Qinling Mountain Revealed by GPS Measurements[J]. Earthquake Research in China, 1999, 15(4): 295-302. (in Chienes)
- [5] 康来迅, 张新基, 石雅镠. 西秦岭北缘断裂带地震危险性的研究[J]. 华南地震, 1999, 19(1): 60-65.
KANG Lai-xun, ZHANG Xin-ji, SHI Ya-liu. A Study on the Earthquake Risk Segments of the North Fault Zone in West Qinling Mountain [J]. South China Journal of Seismology, 1999, 19(1): 60-65. (in Chienes)
- [6] 石雅镠, 张必敖. 秦岭北缘大断裂断层气与地震危险性[J]. 西北地震学报, 1990, 12(2): 22-26.
SHI Ya-liu, ZHANG Bi-ao. The Fault Gases of Large Faults on the Northern Fringe of Qinling Mountain and Its Earthquake Risk [J]. Northwestern Seismological Journal, 1990, 12(2): 22-26. (in Chienes)
- [7] Pizzino L, Burrato P, Quattrocchi F, et al. Geochemical Signatures of Large Active Faults: The Example of the 5 February 1783, Calabrian Earthquake (Southern Italy) [J]. Journal of Seismology, 2004, (8): 363-380.
- [8] 赵振荣. 甘东南地震重点危险区主要活动断裂带断层气地球化学特征[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2012: 7-34.
ZHAO Zhen-shen. The Geochemical Characteristics on Fault Gas of Main Active Faults in the Danger Earthquake Area of GanNan and LongNan [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2012: 7-34. (in Chienes)
- [9] 赵振荣, 张慧, 苏鹤军. 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.
ZHAO Zhen-shen, ZHANG Hui, SU He-jun. The Geochemical Features of Mercury and Radon on Maqu Active Fault [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 376-379. (in Chienes)
- [10] K Ioannides, C Papachristodoulou, K Stamoulis, et al. Soil Gas Radon: A Tool for Exploring Active Fault Zones [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2003, (59): 205-213.
- [11] Miesch A T. Estimation of the Geochemical Threshold and Its Statistical Significance [J]. J. Geochem. Explor, 1981, (16): 49-76.
- [12] Wiemer S, Wyss M. Mapping the Frequency-magnitude Distribution in Asperities: An Improved Technique to Calculate Recurrence Times [J]. J. Geophys. Res., 1997, 102(B7): 15115-15128.
- [13] Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. Mapping Asperities by Minima of Local Recurrence Time: San Jacinto - Elsinore Fault Zones [J]. J. Geophys. Res., 2000, 105(B4): 7829-7844.
- [14] 易桂喜, 龙锋, 苏有锦. 四川及邻区强震前地震活动性参数的变化特征[J]. 四川地震, 2007, (4): 5-9.
YI Gui-xi, LONG Feng, SU You-jing. Variation Characteristics of Seismicity Parameters before Strong Earthquakes in Sichuan and Its Neighboring Regions [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2007, (4): 5-9. (in Chienes)
- [15] 易桂喜, 闻学泽, 王思维, 等. 由地震活动参数分析龙门山-岷山断裂带的现今活动习性与强震危险性[J]. 中国地震, 2006, 22(2): 117-125.
YI Gui-xi, WEN Xue-ze, WANG Si-wei, et al. Study on Fault Sliding Behaviors and Strong earthquake Risk of the Longmenshan - Minshan Fault Zones from Current Seismicity Parameters [J]. Earthquake Research in China, 2006, 22(2): 117-125. (in Chienes)
- [16] Jochen Woessner, Stefan Wiemer. Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(2): 684-698.
- [17] Stefan Wiemer, Max Wyss. Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(4): 859-869.
- [18] Aki K. Asperities, Barriers, Characteristic Earthquakes and Strong Motion Prediction [J]. J. Geophys. Res., 1984, 89(B7): 5867-5872.
- [19] Scholz C H. The Frequency-magnitude Relation Tomicrofracturing in Rock and Itsrelation to Earthquakes [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 1968, 58: 399-415.