

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^①

李晨桦^{1,2}, 张 慧^{1,2}, 苏鹤军^{1,2}, 周慧玲¹

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

摘要: 断裂带气体地球化学特征与形变特征之间的相关关系是建立具有物理预报思路断层气流动观测网络布设的重要课题。选择有大量温泉出露点且形变较剧烈的西秦岭北缘断裂带为研究对象, 对跨断层形变测量场地进行断层土壤气剖面重合布设及现场测量, 重点研究断层气分段性特征与断层形变、地震活动性特征耦合关系, 探讨利用多种方法开展断裂带强震危险性分析的可能性。结果表明: 断裂带土壤气地球化学特征和断层水准形变特征的分布具有良好相关关系, 二者对比结果同时显示出西秦岭北缘断裂带中东段——武山段断层活动性相对活跃, 渭源—漳县段次之, 天水段断层相对闭锁的特征; 且武山和甘谷走滑拉分区因流体活动的影响以中小地震活动为主, 天水段和漳县段西部及与武山段交汇的盘古川地区, 流体活动较弱, 应变速率较小, 存在孕育强震的可能。

关键词: 断层土壤气; 断层形变特征; 地球化学特征

中图分类号: P315.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)06-0955-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.06.0955

Study on Correlation between Geochemical Features of Deep Gas and Fault Deformation Distribution in Northern Margin Fault Zone of West Qinling

LI Chen-hua^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, SU He-jun^{1,2}, ZHOU Hui-ling¹

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

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

Abstract: In this study, we took the northern margin fault zone of West Qinling as the study area, which has many hot-spring dew points and severe deformations. We established the fault soil gas profile overlap and conducted field measurement in the cross-fault deformation area to determine the coupling relationship between fault gas segmental characteristics, fault deformation, and seismic activity. We used a variety of methods to evaluate their usefulness in fault earthquake hazard analysis. The results show that there is a good correlation between the geochemical features of soil gas and the distribution of fault deformation characteristics. The comparison results indicate that fault activity is relatively more active in the Wushan segment than in the Wei yuan—Zhangxian segment, and that the Tianshui segment is relatively locked. In addition, due to the active influence of fluid activity, most of the shocks in the Wushan and Gangu strike-slip pull-apart partitions generate medium to small earthquakes. In contrast, strong earthquakes are likely in

① 收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 中国地震局星火计划(XH15043); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务项目(2013IESLZ04); 甘肃省青年科技基金计划(1606RJYA218)。

作者简介: 李晨桦(1990—), 女, 甘肃庆阳人, 硕士, 助理研究员, 主要从事地震地下流体技术研究。E-mail: chenhuag@gsdzj.gov.cn。

通信作者: 张 慧(1966—), 女, 甘肃天水人, 博士, 研究员, 主要从事地震地下流体与活动构造应用研究。E-mail: zhanghui@gssb.gov.cn。

the west of the Tianshui and Zhangxian segment, and in the Panguchuan region, as the fluid activity and strain rate are weak in these areas. These results can contribute to a theoretical basis for developing a fault gas flow observation network layout with the potential for physical prediction.

Key words: fault soil gas; fault deformation characteristics; geochemical feature

0 引言

地下流体在地壳中是广泛存在的,其对地震孕育发生的影响不容忽视。从地下流体中脱气而来的地下气体在构造应力的作用下不断沿着断裂带向地球表面迁移和释放,不同断裂带以及同一断裂带构造应力状态的不同,使得地下气体浓度强度以及气体组分产生差异^[1-2]。中强地震的发生常常伴随着显著的地壳变形^[3]。断层属于地壳变形的薄弱地带,对构造应力场变化最敏感,在捕捉强地震孕育信息中扮演着十分重要的角色。跨断层水准测量作为获取断层形变信息的最主要手段之一,其异常现象常常被看作地震前兆信息的一个重要指标^[4]。但地震的孕育过程及发生是极其复杂的,需要从多角度对断层的变形、渗流特征等相互作用进行研究,注重应力场与渗流场、温度场之间的耦合。因此开展断层气地球化学特征异常与地球物理场特别是地壳形变观测资料的结合研究是探讨地震重点危险区的断层活动性,研究地震孕育发生过程的必要前提。

西秦岭北缘断裂带是青藏高原东北缘主要构造边界断裂带之一,地壳厚度与重力梯度变化强烈,地震活动频繁,地质构造关系复杂,切割深度较大,且该区花岗岩发育^[5]。沿断裂走向分布了大量温泉,且出水温度普遍较高,携带了丰富的地壳深部信息。历史上曾多次发生过中强地震,从公元前 781 年有地震记载至今,沿该断裂带共发生 5 级以上中强地震 30 余次,包括公元 143 年甘谷 7 级地震、公元 743 年天水 7 级地震、公元 1654 年天水 8 级地震、公元 1879 年武都南 8 级地震和公元 1718 年甘肃通渭 7.5 级地震^[6]。该断裂带地震危险性在 2008 年汶川地震后越发引起人们的关注^[7-8]。张慧等^[9]曾在兰州市活动断层上开展断裂带土壤气异常特征研究,结果显示断层土壤气测量是活断层探测和研究的有效方法。苏鹤军等^[10]曾利用断层土壤气汞、氦地球化学特征异常与断层分布之间的关系及与断裂带地震活动性 $\approx$ 值、 b 值的时空特征分析,进行西秦岭北缘断裂带断层活动性分段研究。但目前在该研究区仍未开展过断层气地球化学特征异常与地球物理场,特别是地壳形变观测资料的结合研究。

本文选取西秦岭北缘断裂带作为研究区,结合

断层气地球化学特征和研究区近年来跨断层流动水准形变资料,重点研究断裂带断层气分布特征与形变关系,探讨地下应力场与活动断裂带孕震环境变化的机理,研究活动断裂带断层气异常与其反应的区域应力过程的机理。

1 研究区地质概况及测线布设

西秦岭北缘断裂是甘东南地区规模较大、活动较强的区域深大活动断裂,属于全新世活动断裂,具有发生强震的构造条件。西秦岭北缘断裂带东端与秦岭北缘断裂相连,从东到西由宝鸡、天水、武山、漳县、黄香沟和锅麻滩共 6 个次级断裂段左阶羽列而成,走向 NWW 向,长约 470 km。各次级断裂间形成了 5 个张性阶区,为北道、温家套、鸳鸯镇、漳县和莲麓阶区,各段之间有部分重叠。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,从西到东分别为锅麻滩断裂段、漳县断裂段、鸳鸯断裂段和天水以东段^[11]。

中国地震局第二监测中心在甘东南布设有 17 处跨断层水准流动场地,西秦岭北缘断裂带上有五处场地(口子门、四店、盘古川、武家河、柳家沟及毛集),长期监测场地主要集中在断裂带中东段,即漳县段、鸳鸯断裂段和天水段,因此本文研究主要以中东段为主。测线跨断层布设,监测断层两盘高差变化,测线高差是以上盘相对于下盘变化为基准的。自 20 世纪 80 年代末起测,每年 3、7、11 月份观测 3 期,积累了丰富的资料^[12]。我们在跨断层水准场地同步布设断层土壤气测线,以便与跨断层水准形变特征进行比对(图 1)。每条测线上相隔 10 m 布设一个测点。为了避免气象条件影响,野外测量工作在 5 月份气象条件较为稳定时期内开展,且每一测点进行多次重复测量。剖面测线位置选择要求植被较少、垂直断裂同行条件较好、地表有一定厚度原始覆盖层。测量过程中,仪器正常,无其他干扰因素影响,保证了测量数据的稳定性和可靠性。仪器参数:氦气测量采用 SAPHYMO 公司的 AlphaGUARD P2000 便携式测氦仪,最低检出限为 2 Bq/m^3 ,标准偏差 $< 3\%$ 。汞气测量采用 ATG-200M 便携式测汞仪,灵敏度高达 5×10^{-12} 克汞;在仪器最低检出限

时,基线零点漂移<2 mV/8 h;标准偏差<5%;取样方法:首先用钢钎钻一个 80 cm 深的孔,插入取样器,用设置流速为 1 L/min 的泵抽取土壤气体至仪器,取样体积为 1 L。

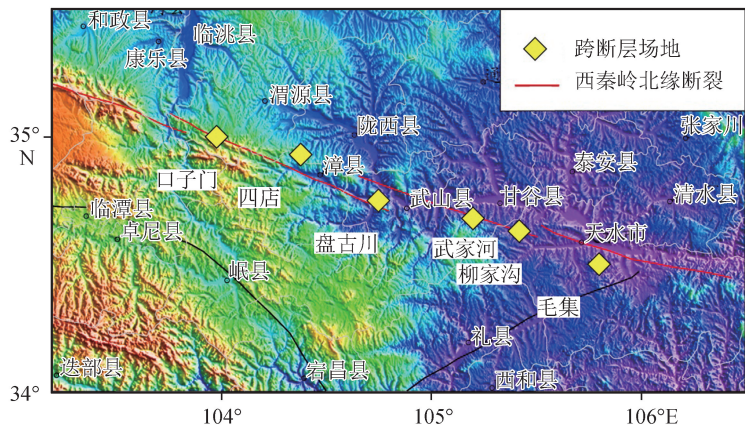


图 1 跨断层水准与断层气测量场地布设图

Fig.1 Site layout of cross-fault leveling and fault gas measurement

2 断层气体地球化学特征研究

2.1 数据处理方法

对各场地断层土壤气浓度分布单独进行分析,并进行背景值与异常上下限计算(表 1)。设每条测线的平均浓度值为背景值 K ,断层气异常下限值即为背景值+均方差($K+\delta_1$)。因各场地区域地层岩性影响,背景值差异较大,为了避免岩性环境对整体

断裂带断层气特征分析的影响,在研究断裂带整体断层土壤气特征时采用异常浓度强度分析法,即用每条测线的异常平均值与单测线背景值的比值代表本地场断层土壤气异常浓度强度,用 S 表示: $S=(K+\delta_1)/K$ 。利用浓度强度值的判定方法,对 6 条测线数据进行相应的分析,对断层气浓度空间分布特征进行系统研究(S_{Hg} 、 S_{Rn} 分别表示 Hg、Rn 浓度强度)。

表 1 剖面概况以及气体浓度强度一览表

Table 1 List of profiles and the concentration intensity of gas

测线名	起点		测点数	测线长度/m	测线方位/(°)	异常下限		浓度强度	
	纬度/(°)	经度/(°)				S_{Hg}	S_{Rn}	S_{Hg}	S_{Rn}
口子门	34.9998	103.9892	10	90	184.6	1.32	5.40	2.09	0.60
四店	34.9350	104.3982	9	50	218	1.59	22.37	3.83	2.75
盘古川	34.7690	104.7553	7	60	197.8	1.36	9.50	2.81	1.17
武家河	34.6899	105.2106	13	145	168.8	0.81	28.58	2.14	4.28
柳家沟	34.6491	105.4266	8	70	164.47	1.53	6.90	3.44	0.91
毛集	34.4988	105.7979	7	60	47.4	0.38	19.55	0.92	1.87

2.2 空间分布特征分析

利用浓度强度比值的方法分别对西秦岭北缘断裂带跨断层场地氦、汞断层气浓度数据进行处理,结果见表 1。西秦岭北缘断裂带中东段氦、汞断层气浓度强度空间分布如图 2 所示。该断裂带中东段氦、汞断层气浓度强度高值区出现在四店场地和武家河、柳家沟场地。渭源—漳县段断层上,口子门和盘古川场地的氦、汞浓度强度均低于四店场地,断层气氦、汞高值区均出现在中部的四店场地,氦、汞气体表现出良好的同步性。武山段断层上,断层气氦

高值区出现在武家河场地,断层气汞高值区出现在柳家沟场地。天水段断层上的毛集场地氦、汞浓度强度均较低。纵观整条断裂带中东段,断层气浓度强度同样呈现出明显的分段特性:武山段较高,渭源—漳县段次之,天水段较低。这与苏鹤军等^[10]的研究结果一致。氦、汞气体组分在渭源—漳县段断层上同步性较好,在武山段断层上却表现出了不同的场地效应,这说明气体在上升通道运移过程中,不同组分的气体运移特性是不同的。在同样的区域应力作用下,气体逸出的浓度强度是气体组分固有特

质和断层构造性质共同影响的结果。整条断裂带断层气浓度强度差异性也反映出断层各段地下介质的差异以及应力积累情况各异,导致断层各段放气能力明显不同。

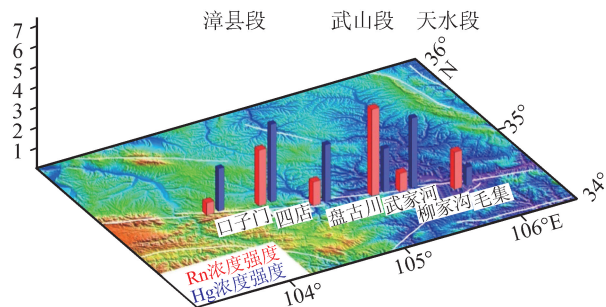


图2 西秦岭北缘断裂带跨断层场地氡、汞浓度强度空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of Radon and Mercury concentration intensity in northern margin fault zone of West Qinling

3 西秦岭北缘断裂带断层形变特征研究

3.1 形变数据处理方法

(1) 形变趋势累积率 D_c

关于跨断层水准数据的处理方法,陈兵等^[13-14]曾提出断层形变趋势累积率指标,寻求呈长趋势应变积累背景的构造区域,即对某场地计算所有时段(两期观测间)变化量之和与所有时段变化量绝对值之和的比。设跨断层的两个水准标志之间的高差观测序列为 $h(t)$ (定义上盘相对下盘上升为正),则其速率:

$$V(t) = \frac{h_i(t) - h_{i-1}(t_{i-1})}{t - t_{i-1}}$$

趋势变化速率:

$$V_a = \sum_1^i V(t)$$

趋势变化幅度:

$$V_d = \sum_1^i |V(t)|$$

我们定义特征函数:

$$D_c = \frac{V_a}{V_d} = \frac{\sum_1^i V(t)}{\sum_1^i |V(t)|}$$

即 D_c 越大反映趋势性变化越明显,应变积累强度可能越高。

(2) 垂直形变速率 V_t

从提取断裂带呈长趋势应变积累强度的角度出

发,从断层形变趋势累积率指标方法中提取断层形变趋势变化速率,即垂直形变速率。断层垂直形变速率大小反映了断层应力积累情况。设跨断层测段的两水准标志之间的高差观测序列为 $h_i(t)$,则其趋势变化速率:

$$V_t = \left| \sum_1^i \frac{h_i(t) - h_{i-1}(t_{i-1})}{t - t_{i-1}} \right|$$

即 V_t 值越大反映速率变化越明显,应变积累速率越高。

3.2 西秦岭北缘断裂带跨断层形变特征

分别对西秦岭北缘断裂带上六处跨断层水准流动场地的水准数据进行趋势累积率 D_c 和垂直形变速率 V_t 计算。分析结果如下:

趋势累积率 D_c 随时间变化曲线如图3所示。口子门、盘古川、毛集场地的趋势累积率 D_c 。经过上世纪九十年代初调整后基本趋于平稳变化,随时间起伏较为平缓,变化相对较小。四店、武家河与柳家沟场地趋势累积率 D_c 。随时间起伏较大,变化相对剧烈,总体仍呈下降趋势。口子门场地 D_c 值 2003 年出现微小转折,之前具有累积率缓慢递减趋势,2003—2012 年基本保持稳定累积状态。盘古川场地在 2004 年之前 D_c 绝对值呈增大趋势,曲线下降,之后 D_c 绝对值减小,曲线上升;毛集场地 D_c 值在 1995 年前呈增加趋势,之后呈现稳定积累状态。四店场地 D_c 值略高于口子门、盘古川场地,在 1992—1994 年间 D_c 突然上升,下降后又逐渐上升,1996 年达到高值后又恢复缓慢下降趋势,在 2003—2004 年间猛然下降后又恢复缓慢下降趋势。武家河场地 D_c 数值相对较大,在 1991—1993 年间该值大幅上升下降后趋于平缓下降,2000—2001 年间又一次出现大幅下降后趋于平缓下降,直到 2008 年之后 D_c 值呈很小的递增趋势。柳家沟场地在 1993—1994 年与 2003—2004 年两个时间段内同样也出现了 D_c 下降幅度加速现象。

此现象反映出四店、武家河、柳家沟场地断层应力的协调联动效应以及调整后受到大范围区域应力作用而继续进行继承性构造运动。岩石圈动力学研究表明,地壳运动受控于构造块体之间的相互作用。该断裂带处于青藏高原东北缘,在以印度板块的向北推挤作为动力来源的青藏块体作用下,又受到包括鄂尔多斯块体在内的华北亚板块向西推挤,在以青藏块体向北推挤为主的继承性构造运动时,四店、武家河与柳家沟场地 D_c 同时表现为趋势下降。但

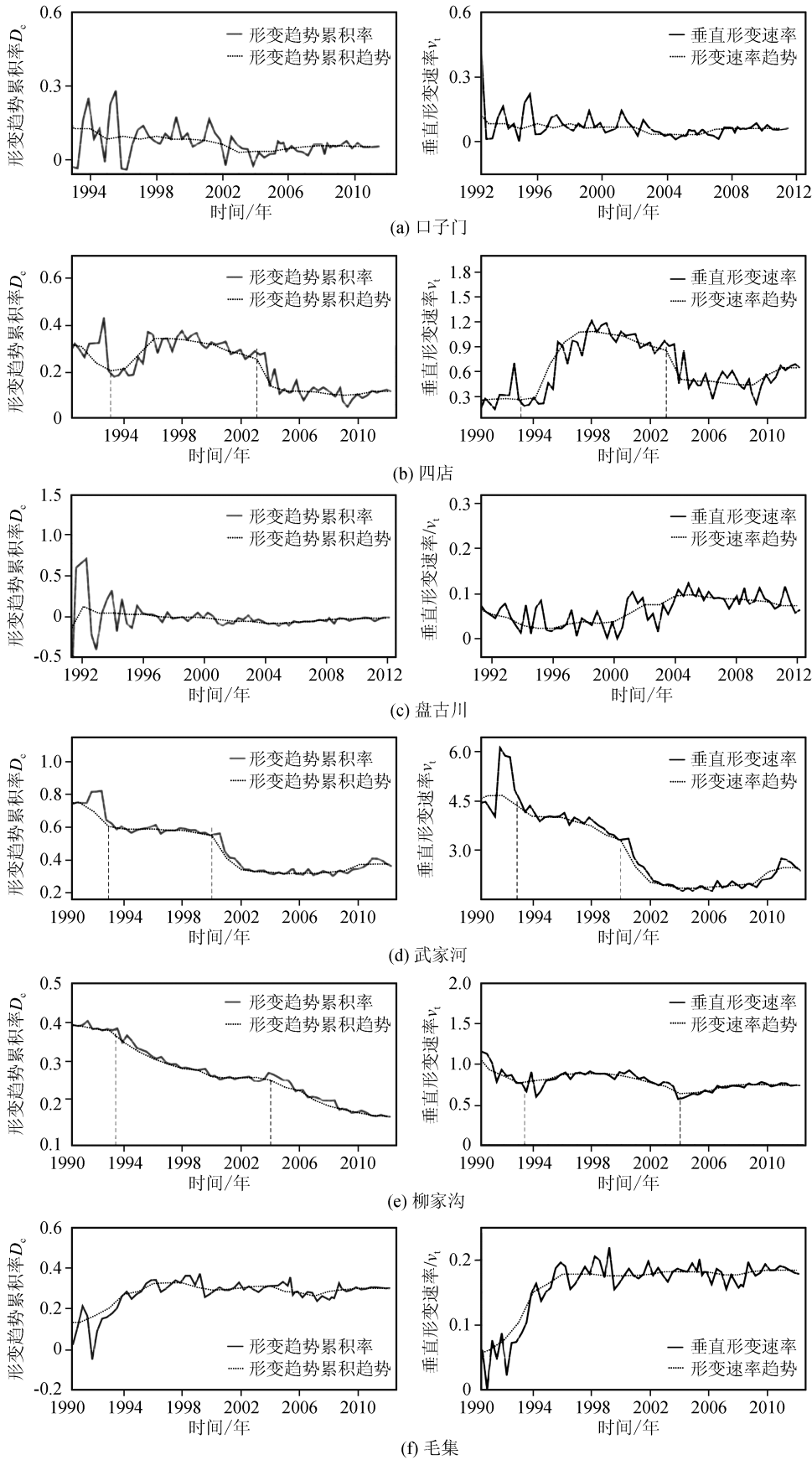


图 3 西秦岭北缘断裂带各场地 D_c 与 V_t 时序曲线

Fig.3 D_c and V_t time-sequence curves in northern margin fault zone of West Qinling

D_c 。反映时间是略有差异的,四店与柳家沟场地 D_c 。变化时间段都略滞后于武家河场地。由此推断西秦岭北缘断裂带中部受到应力作用出现应变变化较为灵敏,同一断裂带上的贯通性较好段出现相同反应,而闭锁段则无明显应变调整反应(图3)。

各场地 V_f 与 D_c 。显示出基本相同的趋势变化。口子门场地垂直形变速率非常低,保持在 $0.03 \sim 0.4 \text{ mm/a}$ 。四店场地垂直形变速率相对口子门较大,保持在 $0.2 \sim 1.2 \text{ mm/a}$;盘古川场地垂直形变速率很小,在 $0.02 \sim 0.12 \text{ mm/a}$;武家河场地垂直形变速率较大,保持在 $2 \sim 6 \text{ mm/a}$;柳家沟场地垂直形变速率也较大,在 $0.5 \sim 1.2 \text{ mm/a}$ 。毛集场地垂直形变速率相对较小,在 $0 \sim 0.22 \text{ mm/a}$ 。比较各场地 V_f 大小,武家河场地 $>$ 柳家沟场地 $>$ 四店场地 $>$ 口子门场地 $>$ 毛集场地 $>$ 盘古川场地。

整体而言,口子门、盘古川、毛集场地的垂直形变速率 V_f 与趋势累积率 D_c 。随时间起伏较为平缓,变化相对较小;四店、武家河与柳家沟场地随时间起伏较大,变化相对较大。说明四店、武家河与柳家沟场地断层垂直应变速率变化较大,形变趋势也较为明显,该场地断层应力调整较为频繁,断层垂直活动相对较强;而口子门、盘古川场地断层垂直应变速率较小,形变趋势也较弱,该场地断层应力调整频率较低,断层垂直活动也相对较弱。

4 水准形变与断层土壤气地球化学特征的空间分布对比

对比西秦岭北缘断裂带中东段 R_n 、 H_g 浓度强度与平均垂直形变速率、趋势累积率,结合研究区 GPS 速率结果,研究西秦岭北缘断裂带中东段断层气浓度强度与断层形变特征空间分布关系。

如图4所示,断层气氡、汞浓度强度与断层形变平均趋势累积率、垂直形变速率在西秦岭北缘断裂带中东段分段性较明显。从西向东,渭源—漳县段上的口子门—四店—盘古川场地的断层气氡、汞浓度强度分布形态与断层形变趋势累积率、垂直形变速率分布形态具有良好的同步性,均在四店场地表现出高值区。处于渭源—漳县段与锅麻滩段交汇区的口子门场地和渭源—漳县段与武山段交汇区的盘古川场地断层气氡、汞浓度强度分布形态与断层形变趋势累积率、垂直形变速率均降低。可见渭源—漳县段断层的中部地区断层较该段东西两段断层略为活跃,形变强度略大,气体释放强度也略强。

武山段上的武家河—柳家沟场地的断层气氡、

汞浓度强度与断层形变趋势累积率、垂直形变速率同时变大,显示出武家河高值区、柳家沟场地略低的特征,表明武山段断层形变的累积程度增强,运动速率增强,气体释放强度增大。武山段断层氡、汞浓度强度与断层形变趋势累积率、垂直形变速率较渭源—漳县段整体略高。纵观整个西秦岭北缘断裂带中东段,形变强度与气体强度高值区均出现在该段上。可见武山段断层活跃程度最大,而且形变强度与气体强度表现也较为同步。

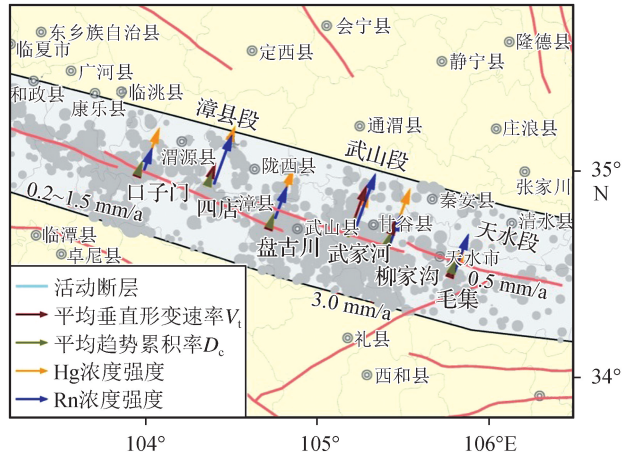


图4 断层气浓度强度与断层形变特征空间分布对比图(GPS速率数据源自文献[15])

Fig.4 Spatial distribution contrast of fault gas concentration intensity and fault deformation characteristics

天水段上的毛集场地断层气汞浓度强度与断层形变趋势累积率、垂直形变速率又逐渐变小,表明断裂带东段天水段形变累积程度和垂直运动速率以及断层气汞的释放强度均小于断裂带中段,但断层气氡浓度强度较柳家沟场地略有升高,这与毛集场地处于礼县—罗家堡断裂与西秦岭北缘断裂的交汇地区、地质构造与地下介质性质较为复杂有关。

孟秀军等^[16]采用2008年5月—2010年9月的PS-InSAR技术对西秦岭北缘断裂带中段甘谷地区断裂带地壳微小形变进行探测,得到南北两盘的相对滑动速率约为 5 mm/a 。葛伟鹏^[15]采用微小块体模型反演GPS结果认为,西秦岭北缘断裂带西段拉脊山直至渭源县一带处于极低的运动速率水平,约在 $0.2 \sim 1.5 \text{ mm/a}$ 间;断裂中段通渭一带滑动速率约为 3.0 mm/a ,断裂东段天水一带又具有极低滑动速率,约为 0.5 mm/a 。可见,西秦岭北缘断裂带各段水平滑动速率差异也较为明显,GPS水平形变速率强度呈现中段武山—甘谷地区强,渭源、天水区较弱的分段特性。这与跨断层水准形变、断层气浓度

强度分布具有良好的一致性。

结合西秦岭北缘断裂带 1967—2014 年间的地震活动分布特征,对流体逸出气氢与断层形变在断层活动性分段判定上做进一步探索。由图 5 可知,西秦岭北缘断裂带现今以中小地震为主,5 级以上地震较少,而历史上 6 级以上大震较多,离逝时间较久。地震活动具有明显分段特征,断裂带武山段小震活动较东西两端更为活跃,而天水段形成相对地震空区,这与地下气体活动性和断层形变特征有着良好的对应性。在武山、甘谷的张性盆地区断层气浓度强度较高,对应的地震活动较活跃,断层垂直形变和水平形变均较大,而断裂中段东西两端地震发生频率较低,相对应的断层气浓度强度较低,断层垂直形变速率和水平形变也较小。

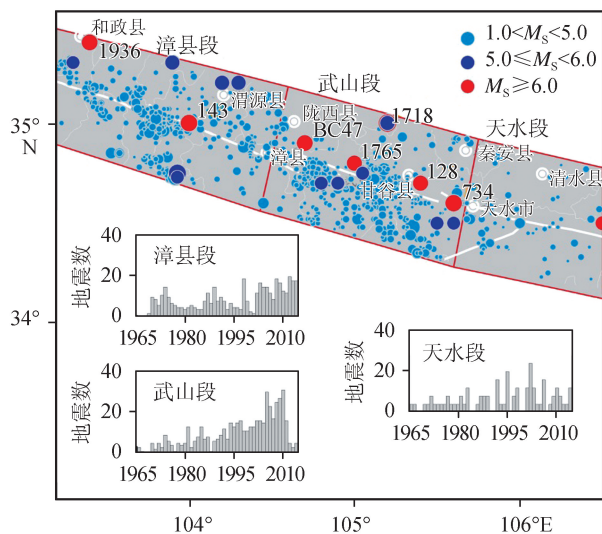


图 5 西秦岭北缘断裂带地震活动分布特征图

Fig.5 Distribution characteristics of seismic activities in the northern margin fault zone of West Qinling

5 讨论

课题组曾对西秦岭北缘断裂带的氢氧同位素进行研究,判定西秦岭北缘断裂带内的地下水主要成因为古代大气降水。即地表水沿断裂下渗至地壳深处,由于随深度增加而引起的渗透速度的减小和热流的增长,在达到一定深度后渗流速度受到抑制,热流场作用下的物质运移开始占优势。这就是说,任何情况下来自地表的处于静水压力作用下的地下水运动被限制在一定深度,内部因素的影响也叠加到这些过程中,经过加热循环的地下流体又沿断裂带逐渐上升至地表。在此过程中,经过断裂带内的水岩反应以及地热和区域应力驱动下孔隙压的变化,

地下流体的化学成分发生变化,并携带一部分深部气体。结合本项目对西秦岭北缘断裂带断层逸出气的研究及已有的认识,可判定断裂带不同区段存在不同流体渗透结构,而断层土壤气在武山—漳县盆地以及甘谷表现出良好的渗透性,这与断裂带的整体构造展布十分统一。

断层气浓度强度与断层形变强度分布形态的分段表现,某种程度上反映了断裂带凹凸体交错分布的地质构造特点,且气体浓度强度与形变强度在不同段上各有不同的表现形式。在地震平静期断层蠕动造成的孔隙压实程度影响着流体压力的大小,从而影响气体释放,而流体压力的变化又对断裂带的有效正应力产生影响^[17]。在流体压力近似于岩石静压力的情况下,地震断层膨胀或蠕动重复发生,可使断层中的饱水裂隙网络缓慢形成,从而逐渐增大断层的持续渗透率^[18];相反,断层可被动地使流体汇集,导致流体产生并使较弱的断层岩石局部发生水压破裂;同时,断层周围相互连通的宏观裂隙会增加围岩的压力扩散速率,但这些裂隙只有在流体压力与裂隙法向压力近于相等的情况下才会保持开启状态。武山段上气体浓度强度与形变强度均较大,指示武山段断层应变较强,在相应区域应力的作用下,相对其他段较为开放,运动较为剧烈;而渭源—漳县段断层气氢、汞浓度强度相对武山段略低,垂直形变强度及水平形变速率在渭源较低,断层应力处于逐渐积累阶段,目前产生应变速率较小;天水段断层气汞浓度强度下降,形变速率也降低,但氢浓度强度上升,说明断层在该段活动较为复杂。较低的形变速率表明应力处于逐渐积累阶段,应变调整保持在一个较小的范围,而断层气氢浓度的上升又指示该段断层内部微裂隙发育较强,结合两者结果,天水段断层可能处于应力积累的后期阶段。

经过以上分析,可以看出西秦岭北缘断裂带内存在不均匀分布的流体活动,这种不均匀分布与区域构造作用力及地震活动有着良好的对应关系。根据固体孕震理论,非均匀介质中高速块体(硬包体)的存在是强震孕育、发生的基本条件,即地壳、上地幔横向、纵向非均匀性越强的地区越有利于强震的发生。尤其在活动构造带的转折处、不同走向断裂带的交汇区、断裂倾向改变的枢纽区、断裂带不同段落之间的岩桥区等,其断裂运动不容易协调,易产生应变和应力积累形成孕震体。从西秦岭北缘断裂带的流体、形变及地震活动特征来看,当构造转折处、交汇区、岩桥区存在广泛流体活动时,则容易将

应力积累以中小震的形式释放,从而避免了强震的孕育。武山地区和甘谷地区较强的断层气浓度强度、较大的应变速率及频繁的小震活动提供了较好的验证。而在水段和漳县段西部及与武山段交汇的盘古川地区,流体活动较弱,应变速率较小,则存在孕育强震的可能。

6 结 论

(1) 西秦岭北缘断裂带中东段断层气浓度强度呈现出明显的分段特性:武山段较高,渭源—漳县段次之,天水段较低。氦、汞气体组分在渭源—漳县段断层上同步性较好,在武山段断层上则表现出了不同的场地效应。

(2) 断裂带土壤气地球化学特征和断层水准形变特征的分布具有良好相关关系:武山段气体浓度强度与形变强度均较大,其应变较强,在相应区域应力的作用下,该段断层相对其他段较为开放;而渭源—漳县段断层气氦、汞浓度强度相对武山段略低,垂直形变强度及水平形变速率也在渭源较低;天水段断层气汞浓度强度下降,形变速率也降低,但氦浓度强度上升,说明断层在该段活动较为复杂。

(3) 通过西秦岭北缘断裂带地下流体逸出气和断层形变特征的时空对比分析,发现两者时空相关关系良好,与区域地震活动性也有较为一致的对应。可见,断层深部流体活动与区域应力之间的协同耦合作用会对地震活动产生深远影响。武山和甘谷走滑拉分区因流体活动的影响而以中小地震活动为主,天水段和漳县段西部及与武山段交汇的盘古川地区,流体活动较弱,应变速率较小,则存在孕育强震的可能。

本文研究受跨断层水准形变场地条件限制,有些场地因年代久远,布设测线所跨断层活动性有待验证。因此在研究过程中会影响分析结果,还需要在其他断裂及场地进行进一步的验证和讨论。

参考文献(References)

[1] 马玉川,孙小龙,王博.四川布拖土壤 CO₂ 多年释放特征及影响因素[J].地震,2014,34(4):30-39.
MA Yu-chuan, SUN Xiao-long, WANG Bo. Secular Variation Features of CO₂ in Butuo, Sichuan Province[J]. Earthquake, 2014, 34(4): 30-39. (in Chinese)

[2] 李军辉,李玲利,方震,等.安徽中西部地区断层气测量及结果分析[J].华南地震,2015,35(4):31-36.
LI Jun-hui, LI Ling-li, FANG Zhen, et al. Fault Gases Measurement and Analysis in Mid-west of Anhui Province[J]. South

China Journal of Seismology, 2015, 35(4): 31-36. (in Chinese)

[3] 和平,李志雄,陆远忠,等.有限单元法在首都圈地区跨断层水准测量监测能力初步评价中的应用[J].地震,2010,30(2):89-99.
HE Ping, LI Zhi-xiong, LU Yuan-zhong, et al. Application of 3D Finite Element Numerical Simulation in Preliminary Evaluation of Cross-fault Leveling Monitoring Capacity in the Capital Area[J]. Earthquake, 2010, 30(2): 89-99. (in Chinese)

[4] 张希,薛富平,王继英.青藏块体东北缘主要断裂带断层形变时序特征与强震关系[J].地震研究,2009,32(1):1-5.
ZHANG Xi, XUE Fu-ping, WANG Ji-ying. Time Sequence Features of Fault Deformation of Main Fractures in the Northeastern Margin of Qinghai—Tibet Block and Their Relationship with Strong Earthquakes[J]. Journal of Seismological Research, 2009, 32(1): 1-5. (in Chinese)

[5] 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 Chinese)

[6] 张波,何文贵,袁道阳,等.西秦岭北缘断裂带西端晚第四纪活动特征及其西延问题[J].地震,2012,32(1):136-143.
ZHANG Bo, HE Wen-gui, YUAN Dao-yang, et al. Late Quaternary Activities of the West Segment of Northern Margin of Western Qinling Fault Zone and Its Western Extension[J]. Earthquake, 2012, 32(1): 136-143. (in Chinese)

[7] 葛伟鹏,袁道阳,邵延秀,等.青藏高原西北部区域地壳形变、构造地貌与孕震构造模型研究——以 2008 年与 2014 年新疆于田 7.3 级地震为例[J].地震工程学报,2015,37(3):710-723.
GE Wei-peng, YUAN Dao-yang, SHAO Yan-xiu, et al. Regional Crustal Deformation, Tectonic Geomorphology and Seismogenic Tectonic Model of the Northwestern Tibetan Plateau: Case Studies of the 2008 and 2014 Yutian (Xinjiang) M_s7.3 Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 710-723. (in Chinese)

[8] 朱爽,周伟.甘肃岷县漳县 6.6 级地震前后区域地壳形变分析[J].地震工程学报,2015,37(3):731-738.
ZHU Shuang, ZHOU Wei. Regional Crustal Deformation Analysis before and after the Minxian—Zhangxian Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 731-738. (in Chinese)

[9] 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.
ZHANG Hui, ZHANG Xin-ji, SU He-jun, et al. Field Test on the Geochemical Features of Radon and Mercury from Soil Gas on the Active Faults in Lanzhou[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(3): 273-278. (in Chinese)

[10] 苏鹤军,张慧,李晨桦,等.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,2013,35(3):671-676.
SU He-jun, ZHANG Hui, LI Chen-hua, et al. Geochemical Features of Fault Gas on Northern Margin Fault of Xiqinling

and Its Seismic Hazard Analysis[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):671-676.(in Chinese)

[11] 邵延秀,袁道阳,王爱国,等.西秦岭北缘断裂破裂分段与地震危险性评估[J].地震地质,2011,33(1):79-90.

SHAO Yan-xiu,YUAN Dao-yang,WANG Ai-guo,et al.The Segmentation of Rupture and Estimate of Earthquake Risk along the North Margin of Western Qinling Fault Zone[J].Seismology and Geology,2011,33(1):79-90.(in Chinese)

[12] 张希,薛富平,贾鹏.甘肃及其边邻地区断层形变特征强度时序变化与强震关系[J].国际地震动态,2010(10):43-48.

ZHANG Xi,XUE Fu-ping,JIA Peng.Time Evolution of Fault Deformation Feature Intensity and Its Relationship with Strong Earthquakes in Gansu and Its Neighborhood[J].Recent Developments in World Seismology,2010(10):43-48.(in Chinese)

[13] 陈兵,江在森,胡斌.断层形变趋势变化研究——垂直形变趋势累积率 D_c 值[J].地震地磁观测与研究,2000,21(1):50-55.

CHEN Bing,JIANG Zai-sen,HU Bin.Study of Trend Variation of Fault Deformation——Vertical Deformation Trend Accumulation Rate D_c [J].Seismological and Geomagnetic Observation and Research,2000,21(1):50-55.(in Chinese)

[14] 陈兵,江在森,赵振才.中国西部断层形变趋势异常特征与地震活动关系研究[J].中国地震,2000,16(1):77-85.

CHEN Bing,JIANG Zai-sen,ZAO Zhen-cai.Study on the Trend Abnormal Features of Across-fault Deformation and Seismicity in West China[J].Earthquake Research in China,2000,16(1):77-85.(in Chinese)

[15] 葛伟鹏,王敏,沈正康,等.柴达木祁连山地块内部震间上地壳块体运动特征与变形模式研究[J].地球物理学报,2013,56(9):294-301.

GE Wei-peng,WANG Min,SHENG Zheng-kang,et al.Inter-seismic Kinematics and Deformation Patterns on the Upper Crust of Qaidam—Qilianshan Block[J].Chinese Journal of Geophysics,2013,56(9):294-301.(in Chinese)

[16] 孟秀军,屈春燕,单新建,等.PS-InSAR 技术在西秦岭北缘断裂带地壳微小形变监测中的应用[J].地震地质,2014,36(1):166-176.

MENG Xiu-jun,QU Chun-yan,SHAN Xin-jian,et al.Application of PS-InSAR Techinque to Measurement of Crustal Deformation along the North Fringe Fault Zone of West Qinling Mountains[J].Seismology and Geology,2014,36(1):166-176.(in Chinese)

[17] Matthai S K,Fischer G.Quantitative Modeling of Fault Fluid Discharge and Fault Dilation Induced Fluid Pressure Variations in the Seismogenic Zone[J].Geology,1996,24(2):183-186.(in Chinese)

[18] 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 Xi-juan,ZENG Qing-li,MA Yin-sheng.Fluid Involvement in Active Fault Zone[J].Northwestern Seismological Journal,2006,28(3):274-279.(in Chinese)

(上接 947 页)

[9] 刘超.层状不均匀介质中弹性波的传播特性及其在岩土工程检测中的应用[D].上海:上海交通大学,2013.

LIU Chao.Propagation Characteristics of Elastic Wave in Inhomogeneous Layered Media and Its Application in Geotechnical Engineering Detection[D].Shanghai:Shanghai Jiaotong University,2013.(in Chinese)

[10] 车爱兰,黄醒春,郭强,等.利用表面波勘探检测沉管隧道压浆法的充填效果[J].上海交通大学学报,2011,45(5):648-652.

CHE Ai-lan,HUANG Xing-chun,GUO Qiang,et al.Evaluation of Mud-jack Method Filling Effect of Immersed Tube Tunnel Using Surface Wave Survey Method[J].Journal of Shanghai Jiaotong University,2011,45(5):648-658.(in Chinese)

[11] Feng S K,Che A L,Wang H,et al.Study on the Theory,Method,and Application of Impact Imaging Method for Grouting Evaluation[C]//Proceedings of the 11th SEGJ International Symposium,Yokohama,2012.CD-Rom.

[12] 冯少孔,车爱兰,吴志坚,等.高密度面波勘探和小型台阵地脉动观测在西部地区地震防灾中的应用[J].地震工程学报,2013,35(4):780-788.

FENG Shao-kong,Che Ai-lan,WU Zhi-jian,et al.Application of Surface Wave Surveys and Array Microtremor Observations for Earthquake Disaster Mitigation in Western China[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(4):780-788.(in Chinese)