

刘冠中, 马瑾, 杨永林等. 2014. 川西地区长周期气温变化对跨断层位移观测的影响及芦山地震前的异常断层活动. 地球物理学报, 57(7): 2150-2164, doi:10. 6038/cjg20140711.

Liu G Z, Ma J, Yang Y L, et al. 2014. Effect of long-term surface temperature variation on fault displacement observation and anomalous fault movement in Western Sichuan before the Lushan $M_s7.0$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(7): 2150-2164, doi:10. 6038/cjg20140711.

川西地区长周期气温变化对跨断层位移观测的影响及芦山地震前的异常断层活动

刘冠中^{1,2}, 马瑾², 杨永林³, 苏琴³

1 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京 100085

2 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

3 四川省地震局测绘工程院, 雅安 625000

摘要 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M7.0$ 级地震前 2—3 年, 川西地区的跨断层位移出现群体性、准同步的异常趋势转折, 但有些场地的辅助气温观测也呈现相似变化. 为探寻这些趋势转折是否为热形变, 本文基于鲜水河、安宁河—则木河、龙门山断裂带上的短基线、短水准及辅助气温观测数据, 使用频谱分析及统计分析方法, 研究跨断层位移与气温之间的关系, 并利用主模式分析方法研究芦山地震前各断裂带的运动特征. 结果显示: (1) 在大于 2.63 a 的周期上, 短基线、短水准与气温的频率成分较为相似, 它们之间为弱-中等强度的相关. (2) 气温变化不是芦山地震前跨断层位移发生趋势转折的主要影响因素. 除个别场地外, 长周期热形变在总的跨断层位移中所占比重较小, 对其趋势变化的影响有限. (3) 主模式分析表明, 2010 年前后, 鲜水河断裂带的左行走滑和张性运动有所减弱, 安宁河—则木河、龙门山断裂带的张性运动也开始减弱(或者说压性增强). 这些变化特征可能反映了在这一时期巴颜喀拉块体 SE-SEE 向运动的加剧.

关键词 芦山地震; 断层位移; 趋势转折; 热形变; 异常

doi:10. 6038/cjg20140711

中图分类号 P542

收稿日期 2013-07-15, 2014-06-19 收修定稿

Effect of long-term surface temperature variation on fault displacement observation and anomalous fault movement in Western Sichuan before the Lushan $M_s7.0$ earthquake

LIU Guan-Zhong^{1,2}, MA Jin², YANG Yong-Lin³, SU Qin³

1 Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3 Survey Engineering Institute, Earthquake Administration of Sichuan Province, Ya'an Sichuan 625000, China

Abstract About 2~3 years before the Lushan $M_s7.0$ earthquake on 20 April 2013, some short-baseline and short-leveling sites in western Sichuan presented long-term and quasi-synchronous trend transition. However, the temperatures from some auxiliary observation were similar to fault displacements in some extent. So, in order to explore if they are thermal deformation, we analyze the short-baseline, short-leveling, and temperature observation data from Xianshuihe, Anninghe-Zemuhe, and Longmenshan fault zone. Based on spectrum and statistical analysis methods, the correlation between fault displacement and temperature is studied. Furthermore,

the movement features of these fault zones are discussed by using principal mode analysis. The results show that: (1) In the period of larger than 2.63 years, the fault displacement and temperature data have similar frequency components, and have weak to moderate correlation. (2) The variation of temperature is not the major influence factor on the trend transition of fault displacement before Lushan earthquake. Except individual site, the secular thermal deformation only contributes a small fraction in the whole deformation. (3) The principal mode analysis suggests that, around 2010, the left-lateral strike slip and tensional movement weakened along Xianshuihe fault zone, and the tensile motion of Anninghe-Zemuhe and Longmenshan fault zone weakened also. These variation features may be associated with the intensive movement in SE-SEE orientation of the Bayan Har tectonic block in this stage.

Keywords Lushan earthquake; Fault displacement; Trend transition; Thermal deformation; Anomaly

1 引言

2013年4月20日四川省雅安市芦山县发生 $M_s7.0$ 级地震(刘杰等,2013;张勇等,2013),该地震前2—3年,川西地区的鲜水河、安宁河—则木河、龙门山断裂带上,多个场地的短基线、短水准出现了明显的长周期趋势转折,并具有群体性、准同步的特点,但初步的形态分析显示,有些变化与气温的长期波动比较相关,这些趋势转折是否为热形变,能否代表真实的断层活动有待研究。

众所周知,在地表进行的跨断层位移观测受气象、地下水位、荷载变化等干扰影响(楼关寿等,2010),此外还受到核幔耦合(地球自转速率变化)作用的调制(王庆良等,1999;Wang et al.,2000),信息成分复杂,其中,气温是一个主要的影响因素。明晰跨断层位移究竟在多大程度上反映“真实”的断层运动,是进行构造活动分析和异常判别的基本前提。以往研究中,对季节变换引起的年周期变化关注较多(曹建玲和石耀霖,2005;孙玉军等,2005;黄建平,2012),而对于1年以上的长周期热形变讨论较少,那么在相对较长的时间尺度上,气温与断层位移的趋势变化是否相关?影响的量级有多大?对于芦山地震前跨断层位移的趋势转折,在去除长周期热形变后是否仍然显著?如果这些变化并非由气温引起,能够说明川西地区的构造运动发生了什么样的转变?解答这些问题,对活断层监测及地震前兆研究都具有重要价值。

本文利用川西地区鲜水河、安宁河—则木河、龙门山断裂带上近几十年的短基线、短水准及辅助气温观测数据,致力回答上述问题。首先,将介绍川西

地区的跨断层位移观测场地分布与数据概况,重点说明芦山地震前的异常趋势转折。其次,分别在频域和时域考察跨断层位移与气温数据长周期趋势的相关性。继而,利用线性回归方法进行热形变校正,剔除长周期气温变化对跨断层位移的影响。再次,使用奇异值分解方法,提取跨断层位移和气温变化的主模式,进而分析各断裂带的运动特征。最后,初步探讨了气温对断层位移的影响机理,芦山地震前跨断层位移趋势转折的可能影响因素,以及这些变化的运动学与前兆意义。

2 观测资料概况与震前的异常趋势转折

川西地区的跨断层短基线、短水准观测,最早始于1977年,最晚始于1990年,大量的场地观测是从20世纪80年代末开始,至今已积累长达20—30余年的数据。各场地的复测周期不尽相同,有的为每年3—4次,有的为连续观测(杨永林等,2005),但绝大多数复测周期为2个月(每年观测6次)。空间展布上,这些场地位于川滇块体、巴颜喀拉块体、华南块体之间的“Y”字形构造边界带(图1),其中沿鲜水河断裂带,短基线、短水准进行配套观测,密度相对较大。安宁河—则木河、龙门山断裂带上,除汤家坪外,均为短水准观测场地。这些场地在进行跨断层位移测量的同时,同步记录气温的变化,短基线观测使用干式气温计,短水准则使用水准仪自带的气温计。

本文选用的短基线、短水准及辅助气温观测数据,起始时间从1977—1993年不等,截止日期多数为2013年3月15日,个别场地为2012年5月15日。由于不同场地的复测周期不尽相同,即便是同一

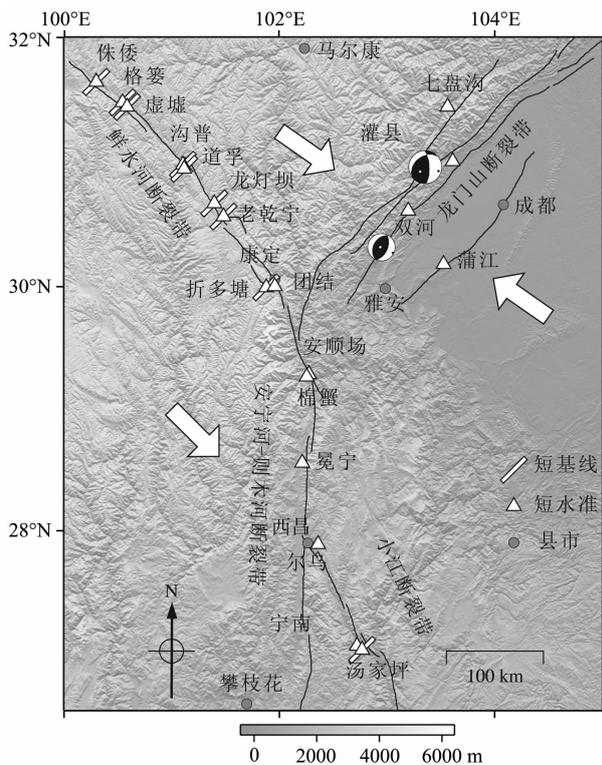


图1 川西地区跨断层位移场地分布与汶川8.0级、芦山7.0级地震(震源机制解数据来自于哈佛大学CMT, 图中大箭头示意块体间的相对运动)

Fig. 1 The distribution of fault deformation observation sites and the epicenters of the Wenchuan and the Lushan earthquake (Focal mechanism solutions are from Harvard university CMT, and the big arrows show the relative motion between active tectonic blocks).

场地,不同年份的采样数也稍有差异,因此采用三次样条插值的方法进行补齐,使各场地、各测线的采样周期均为2个月,以便后续处理和分析。

考虑多个场地的构造从属关系,同时也为清晰地展示较多的原始曲线,这里将资料分为三大类,分别为鲜水河断裂带短基线(汤家坪短基线也归入此类),鲜水河断裂带短水准,安宁河—则木河及龙门山断裂带短水准,它们的原始观测曲线分别见图2、图3、图4。

对于鲜水河断裂带的短基线观测来讲,其测线长度变化大多具有长周期的趋势变化(图2)。2013年4月20日芦山M7.0地震前2—3a(大致始于2010年),格婆、虚墟、龙灯坝场地上,多条测线的长度准同步地发生缩短的趋势转折。老乾宁、汤家坪场地上,在同一时间发生了测线伸长的趋势转折,这些变化相对于几十年的活动背景来说很显著。然而,细致观察对应的辅助气温曲线,即使在很强的年变干扰下,依然可以看出气温在同一时间也发生了趋势

转折,两者的变化形态显示出一定的相关性,令人怀疑这些转折是否由热形变引起。

鲜水河断裂带短水准观测方面(图3),直观来看格婆、道孚、龙灯坝、团结场地在2010年前后也近乎同步地发生了趋势转折,并且气温变化也具有相似的变化特点。但总体来讲,短水准观测到的现象不如短基线显著。

安宁河—则木河、龙门山断裂带上(图4),冕宁、尔乌、汤家坪场地在2010年前后的趋势转折比较突出,辅助气温似乎也有所变化。耿达场地(图1中未标识)由于建筑施工产生较大影响,其变化的真实性存在一定争论(周硕愚等,2009;苏琴等,2009;朱航等,2010),故本文未予采用。七盘沟、双河、灌县场地2008年的大幅张性变化与汶川8.0级地震有关,尽管如此,仍可识别双河、灌县场地2010年前后发生的趋势转折,以及气温的相似变化(在进一步的分析中,为去除汶川地震的同震及震后效应,首先截取出明显的影响时段,扣除其线性趋势,之后,分别计算影响时段前、后的平均活动速率,根据平均速率的差值去掉“台阶”,最后将这三段数据对接)。

总结起来,芦山地震前2—3a(2010年前后),川西地区的跨断层位移出现群体性、准同步的长周期趋势转折,而气温的趋势也呈现相似的变化,表现出一定的相关性。其中,鲜水河断裂带短基线的变化最为突出,安宁河—则木河、龙门山断裂带短水准次之,鲜水河断裂带短水准最不明显。

3 频谱分析

形态分析显示跨断层位移与气温的趋势在时域呈现一定的相关性,下面对断层位移及气温数据进行傅里叶变换和相干分析,观察其频域上的信号分布及相似性。在傅氏变换之前,需要将数据去线性和中心化,首先利用最小二乘法拟合出线性趋势,获取残差以去除超低频信号的影响,之后对残差进行中心化的平移变换,即减去数据的均值使其为零。

图5为鲜水河短基线与气温信号的振幅谱,为便于分析,将频率换算成以年为单位的周期。短基线数据中(图5上图),年变成分较明显,周期小于1a的信号相对微弱,而周期大于2a的信号幅值比较显著。气温数据中(图5下图),年变最为醒目,周期小于1a的信号较弱,而周期大于2a的信号幅值也比较突出。由此可见,除了年周期变化(并非本文关注重点),短基线和气温数据在大于2a的周期上仍

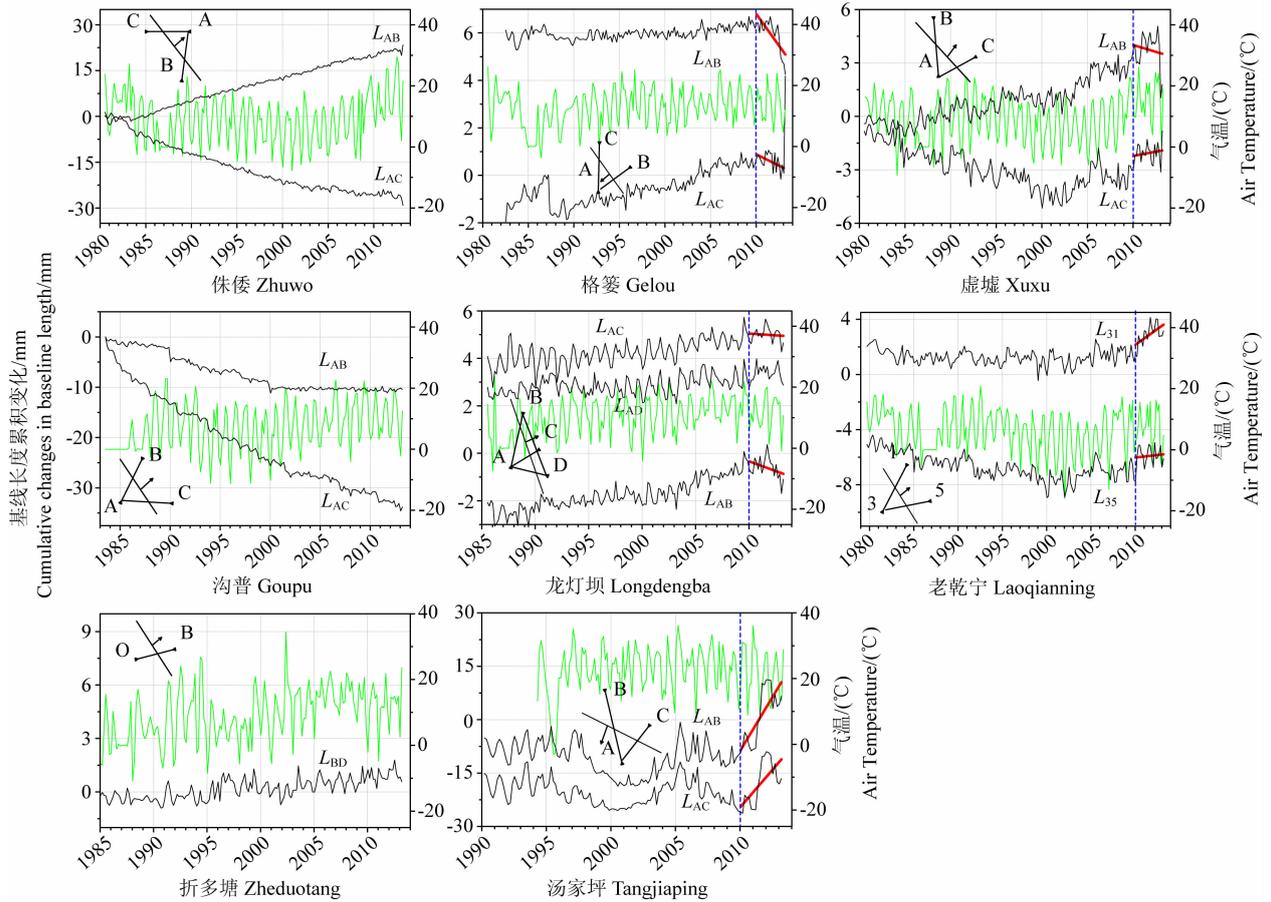


图2 鲜水河断裂带短基线(细黑)与辅助气温(细绿)原始观测曲线以及2010后的线性趋势(粗红)短基线曲线向上表示测线伸长,反之缩短,蓝色虚线示意转折时间。每个子图中给出了测线布设示意图,大写字母和数字表示点位名称,“ L_{AB} ”等表示短基线测线名称,下同。

Fig. 2 The raw data of short-baseline (thin black), linear fitting results after 2010 (thick red), and the temperature (thin green) along the Xianshuihe fault zone

For short-baseline data, the curve rise when baseline is expanded, and it drop when baseline is contracted. The dash blue lines represent the transition time. In every sub-graph, the capital letters and the numbers represent the names of monitoring point, and the symbols such as “ L_{AB} ” represent the names of short-baseline and similarly hereinafter.

有较强的信号分布。

相干函数是描述不同信号之间在频域内相似程度的一种量,图6为鲜水河短基线与气温数据的相干函数图像,当周期小于2 a时,相干性不高且波动复杂,当周期大于2 a时,相干函数值逐渐增大而趋向于1,表明短基线与气温信号的长周期成分较为相似,频域分布具有较强的相关性。同样,对短水准与气温数据进行频谱分析,也得到极其类似的结果(图略)。

为进一步说明在不同频域(周期)内断层位移与气温之间的相互关联,利用小波变换方法,分别将断层位移和气温数据分解为7个频段(0.16~0.33a、0.33~0.66a、0.66~1.32a、1.32~2.63a、2.63~5.26a、5.26~10.52a、 ≥ 10.52 a),分频段地统计两

者的相关性,之后取相关系数的绝对值,按三大类资料进行平均处理(图7),结果显示三类资料相关系数的平均值在0.33~0.66a频段内具有局部的极大值,在0.66~2.63a频段较小,而超过2.63a后,相关性均显著升高,这说明在更长的周期内,跨断层位移与气温变化仍相关。需要指出,包含年变的0.66~1.32a频段相关系数较小,是因为断层位移滞后于气温变化而存在相位差,若研究年变与气温之间的相关性需另做相关函数分析。此外,还可发现一个有趣的现象,比较三类资料的相关系数,鲜水河短基线在 ≥ 5.26 a的频段上较其他两类资料大,而鲜水河短水准在1.32~5.26a频段内最大,安宁河—则木河、龙门山短水准则在 ≤ 1.32 a的频段内最大,说明不同地区、不同测项的跨断层位移对气温的响应有

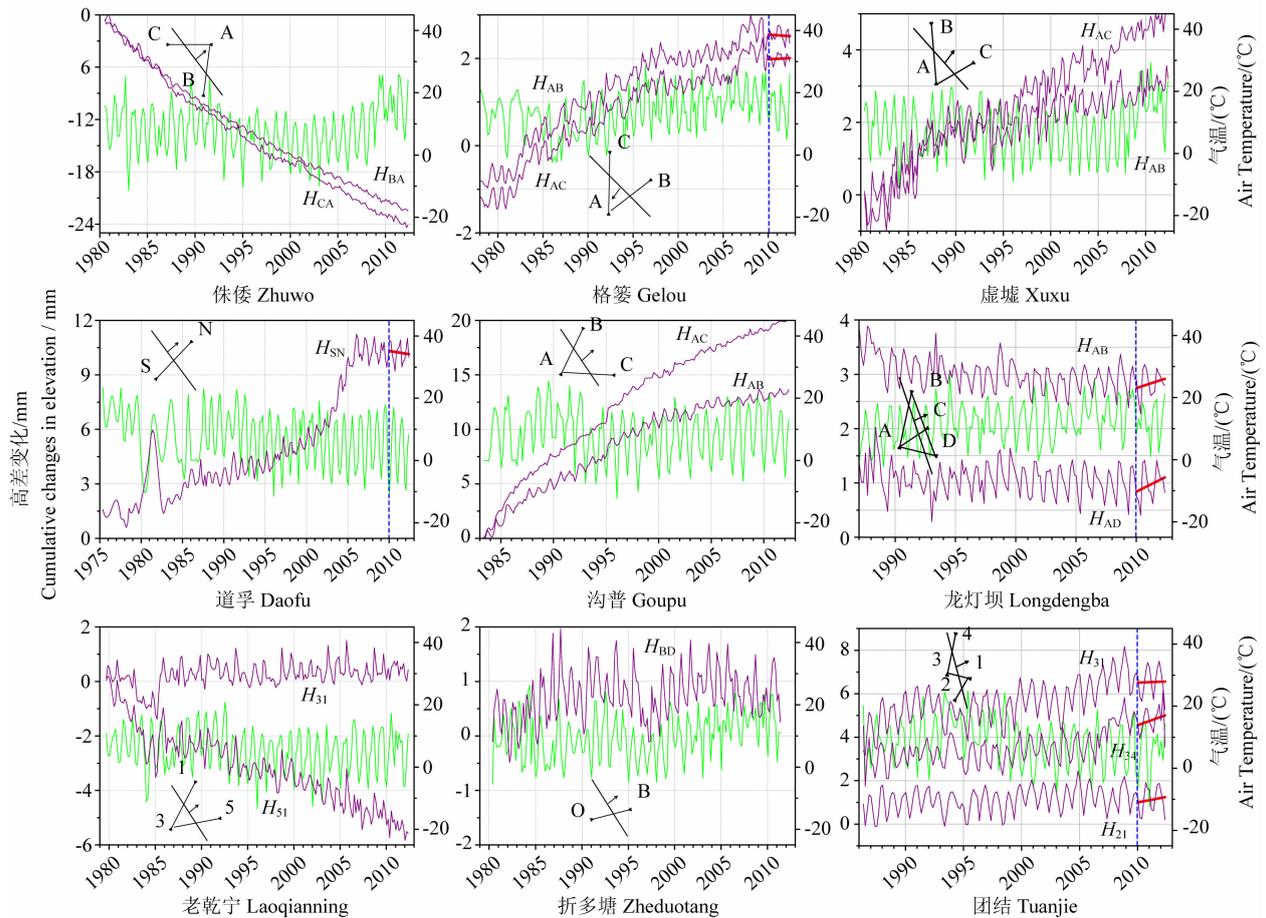


图3 鲜水河断裂带短水准(细紫)与辅助气温(细绿)原始观测曲线以及2010后的线性趋势(粗红)短水准曲线向上表示断层上盘相对下盘抬升,为压性活动,反之则为张性,蓝色虚线示意转折时间。每个子图中给出了水准测线布设示意图,大写字母和数字表示点位名称,“ H_{AB} ”等表示短水准测线名称,下同。

Fig. 3 The raw data of short-leveling (thin purple), linear fitting results after 2010 (thick red), and the temperature (thin green) along the Xianshuihe fault zone

For short-leveling data, the curve rise when the hanging wall uplift to the footwall, or vice versa. The dash blue lines represent the transition time. In every sub-graph, the capital letters and the numbers represent the names of monitoring point, and the symbols such as “ H_{AB} ” represent the names of short-leveling line and similarly hereinafter.

所区别。

综合以上分析,研究区内的短基线、短水准与气温数据在大于 2.63 a 的周期上,频率成分较为相似,显示出一定的相关性。

4 相关分析

由第 2、3 节的分析可知,跨断层位移与气温在大于 2 a 的周期上呈现一定的相关性,下面在去除线性趋势的基础上,利用小波变换方法提取周期大于 2 a 的长周期成分(刘冠中等,2013),进行相关分析与统计检验。由于采样周期为 2 个月,进行二进小波变换时,4 层近似部分为周期大于 32 个月(约 2.63 a)的信号成分,因此是利用周期大于 2.63 a 的信号成分做相关分析,结果见表 1。为更形象地展示如

上所述的相关性,作为一个示例,图 8 给出了鲜水河断裂带短基线与气温去线性后的曲线,同时叠加了周期大于 2.63 a 的趋势线。

总结表 1,对于短基线观测,在 $P \leq 0.001$ 的显著水平上,63% 的测线与气温具有统计意义的正相关(占 56%)或负相关性(占 44%),相关系数的绝对值介于 0.262~0.809。对于短水准观测,在 $P \leq 0.001$ 的显著水平上,约 50% 的测线与气温具有统计相关性(正、负相关各占 50%),相关系数绝对值介于 0.220~0.546;在 $P \leq 0.05$ 的显著性水平上,73% 的短水准测线与气温具有统计意义的正相关(占 55%)或负相关性(占 45%),相关系数绝对值介于 0.196~0.801 之间。总体来讲,大多数跨断层位移观测都受到气温的长期变化影响,它们之间为弱-中等强度的相关。

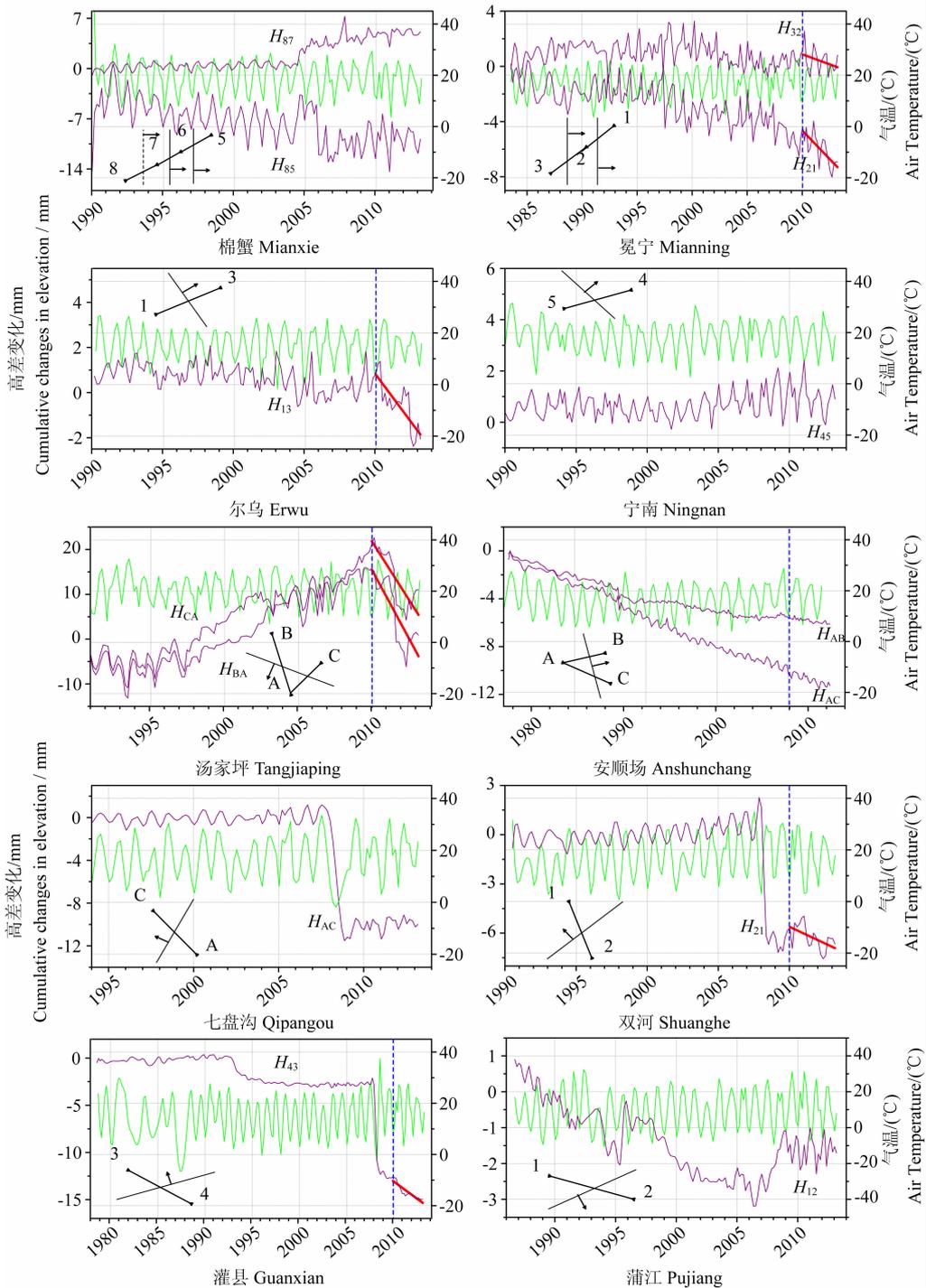


图 4 安宁河—则木河、龙门山断裂带短水准(细紫)与辅助气温(细绿)原始观测曲线以及 2010 后的线性趋势(粗红)曲线向上表示断层上盘相对下盘抬升,为压性活动,反之相反.蓝色虚线示意转折时间.

Fig. 4 The raw data of short-leveling (thin purple), linear fitting results after 2010 (thick red), and the temperature (thin green) along Anninghe-Zemuhe and Longmenshan fault zone. For short-leveling data, the curve rise when the hanging wall uplift to the footwall, or vice versa. The dash blue lines represent the transition time.

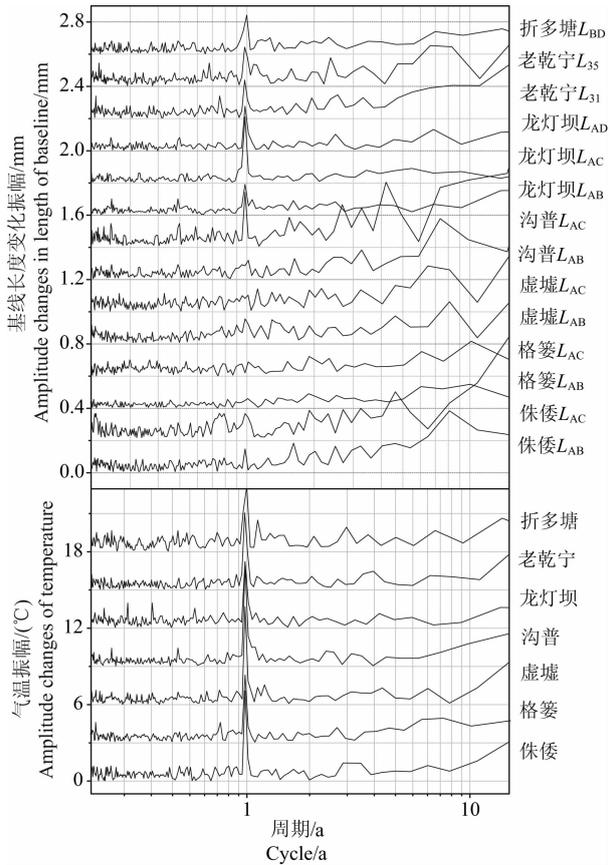


图5 鲜水河断裂带短基线(上图)与气温数据(下图)的振幅谱
Fig. 5 The spectrums of short-baseline (upper graph) and temperature (lower graph) along Xianshuihe fault zone

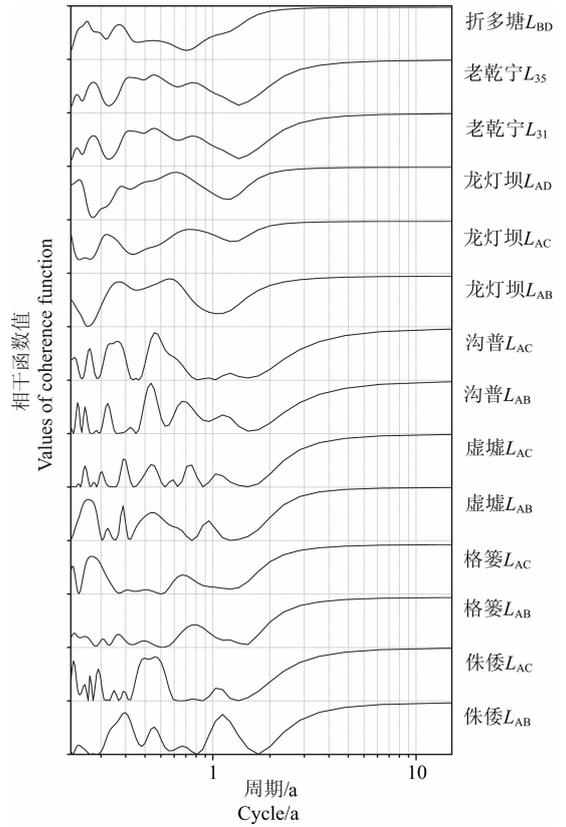


图6 鲜水河断裂带短基线与气温数据的相干性
图中纵坐标每个刻度的范围均为0~1.
Fig. 6 The coherence of short-baseline and temperature signals
The tick scale of ordinate is from 0 to 1 for every sub-graph.

表1 跨断层位移与气温的相关分析结果

Table 1 Results of correlating the fault displacement with temperature

鲜水河短基线			鲜水河短水准			安宁河—则木河、龙门山短水准		
测线	<i>r</i>	<i>P</i>	测线	<i>r</i>	<i>P</i>	测线	<i>r</i>	<i>P</i>
侏倭 L_{AB}	0.036	0.617	侏倭 H_{BA}	0.546**	0.000	棉蟹 H_{85}	-0.286**	0.001
侏倭 L_{AC}	0.809**	0.000	侏倭 H_{CA}	0.424**	0.000	棉蟹 H_{87}	0.225*	0.008
格婆 L_{AB}	0.262**	0.000	格婆 H_{AB}	-0.273**	0.000	冕宁 H_{32}	-0.172	0.021
格婆 L_{AC}	-0.055	0.457	格婆 H_{AC}	-0.220**	0.001	冕宁 H_{21}	-0.399**	0.000
虚墟 L_{AB}	0.673**	0.000	虚墟 H_{AB}	-0.208*	0.002	尔乌 H_{13}	0.123	0.150
虚墟 L_{AC}	0.637**	0.000	虚墟 H_{AC}	0.181*	0.007	宁南 H_{45}	0.442**	0.000
沟普 L_{AB}	0.331**	0.000	道孚 H_{SN}	-0.203*	0.002	汤家坪 H_{BA}	0.129	0.128
沟普 L_{AC}	-0.014	0.856	沟普 H_{AB}	-0.323**	0.000	汤家坪 H_{CA}	-0.020	0.819
龙灯坝 L_{AB}	0.006	0.940	沟普 H_{AC}	-0.210*	0.002	蒲江 H_{12}	0.083	0.299
龙灯坝 L_{AC}	-0.076	0.331	龙灯坝 H_{AB}	0.134	0.053	双河 H_{21}	0.801**	0.000
龙灯坝 L_{AD}	-0.040	0.607	龙灯坝 H_{AD}	0.074	0.283	灌县 H_{43}	0.305**	0.000
老乾宁 L_{31}	0.486**	0.000	老乾宁 H_{31}	0.420**	0.000	七盘沟 H_{AC}	0.269*	0.003
老乾宁 L_{35}	0.477**	0.000	老乾宁 H_{35}	0.252**	0.000	安顺场 H_{AB}	0.647**	0.000
折多塘 L_{BD}	-0.730**	0.000	折多塘 H_{OB}	-0.022	0.746	安顺场 H_{AC}	0.766**	0.000
汤家坪 L_{AB}	-0.490**	0.000	团结 H_{21}	-0.458**	0.000			
汤家坪 L_{AC}	-0.283**	0.000	团结 H_{31}	-0.196*	0.004			
			团结 H_{34}	-0.128	0.064			

注:*r*为断层位移与气温的 Pearson 相关系数,*P*为 t 检验显著性水平,**表示在 $P \leq 0.001$ 水平上显著,*表示在 $P \leq 0.05$ 水平上显著。

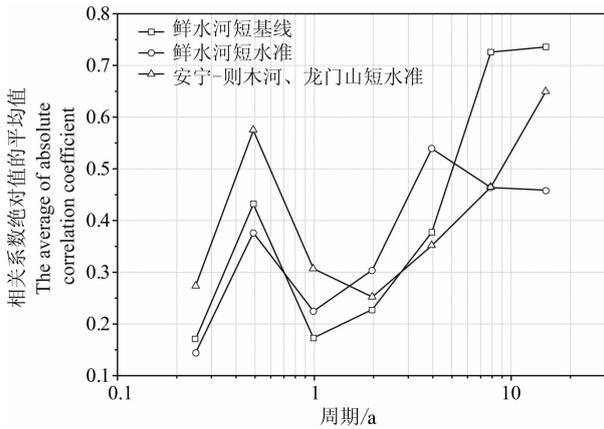


图 7 跨断层位移与气温变化在不同频段上的相关性
Fig. 7 The correlation between fault displacement and temperature on different frequency ranges

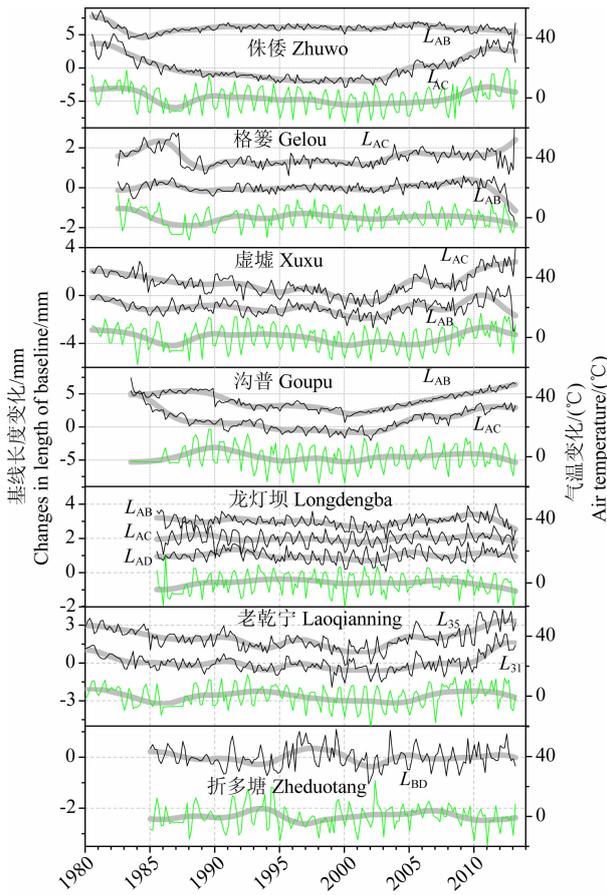


图 8 鲜水河断裂带去除线性趋势后的短基线数据(细黑)与气温(细绿)的对比(粗灰线为周期大于 2.63 a 的趋势线)

Fig. 8 Comparisons between the detrended short-baseline data (thin black) and temperature (thin green)

5 回归分析

相关分析结果说明跨断层位移与气温数据在不

同程度上包含有共同的趋势,但他们之间的定量关系并未明确,下面通过简单的线性回归,揭示气温对跨断层位移的影响大小(尽管不能确定它们之间的关系为线性).具体处理时,首先去除所有数据的线性趋势,之后选取断层位移周期大于 2.63 a 的成分作为因变量 y ,取气温数据中大于 2.63 a 的成分作为自变量 x ,这样可以对气温产生的长周期热形变进行校正,表 2 只给出了具有统计学意义的模型,没有通过检验的结果未列出.

表 2 中,按观测手段,短基线的回归模型中比例系数为正的占 70%,负的占 30%.短水准的回归模

表 2 跨断层位移与气温的回归分析结果
Table 2 The regression analysis results between fault displacement and temperature

测线	r	F	P	回归模型
休倭 L_{AC}	0.760	266.734	0.000	$y=0.371x+0.031$
格篾 L_{AB}	0.177	5.939	0.016	$y=0.022x+0.001$
虚墟 L_{AB}	0.476	57.040	0.000	$y=0.086x+0.004$
虚墟 L_{AC}	0.552	54.115	0.000	$y=0.15x+0.007$
沟普 L_{AB}	0.314	19.341	0.000	$y=0.157x+0.005$
老乾宁 L_{31}	0.385	34.867	0.000	$y=0.093x+0.004$
老乾宁 L_{35}	0.383	34.323	0.000	$y=0.109x+0.005$
折多塘 L_{BD}	-0.318	18.849	0.000	$y=-0.055x+0.002$
汤家坪 L_{AB}	-0.434	31.785	0.000	$y=-1.239x+0.002$
汤家坪 L_{AC}	-0.220	6.978	0.009	$y=-0.404x+0.001$
休倭 H_{BA}	0.522	71.087	0.000	$y=0.105x-0.006$
休倭 H_{CA}	0.409	38.204	0.000	$y=0.099x-0.001$
格篾 H_{AB}	-0.246	14.538	0.000	$y=-0.037x+0.001$
格篾 H_{AC}	-0.195	8.902	0.003	$y=-0.029x+0.001$
虚墟 H_{AB}	-0.153	4.591	0.033	$y=-0.021x+0.002$
道孚 H_{SN}	-0.183	7.692	0.006	$y=-0.083x$
沟普 H_{AB}	-0.294	16.381	0.000	$y=-0.109x-0.002$
沟普 H_{AC}	-0.204	7.483	0.007	$y=-0.078x+0.001$
老乾宁 H_{31}	0.225	10.390	0.001	$y=0.052x-0.002$
老乾宁 H_{35}	0.148	4.374	0.038	$y=0.040x-0.002$
安宁-则木、龙门山短水准				
棉蟹 H_{87}	0.185	4.869	0.029	$y=0.169x-0.001$
冕宁 H_{21}	-0.188	6.493	0.012	$y=-0.246x-0.006$
双河 H_{21}	0.299	13.282	0.000	$y=0.12x+0.006$
灌县 H_{43}	0.288	18.644	0.000	$y=0.129x+0.003$
安顺场 H_{AB}	0.602	118.341	0.000	$y=0.138x-0.006$
安顺场 H_{AC}	0.619	129.326	0.000	$y=0.116x-0.005$

注: r 为相关系数, F 为方差检验统计量, P 为 t 检验显著性水平,回归模型中 y 表示跨断层位移变量, x 表示气温变量.

型中比例系数为正的占 59%, 负的占 41%。在具有统计学意义的前提下, 1 °C 的气温长周期趋势变化, 可引起 0.022~0.371 mm 的基线长度变化和 0.021~0.246 mm 的水准高差变化。

图 9、10 为长周期热形变校正前后的曲线。总体对比发现, 气温的长周期变化对跨断层位移的影响量级有限, 校正前后跨断层位移的趋势变化形态基

本一致。但是, 对于侏倭短基线、短水准及冕宁短水准观测, 校正前后改变比较明显, 说明气温对这些测线的影响较大。

总结起来, 除侏倭短基线、短水准, 以及冕宁短水准外, 长周期热形变在总的跨断层位移中所占比重较小, 对其趋势变化的影响有限, 气温变化不是芦山地震前跨断层位移发生趋势转折的主要影响因素。

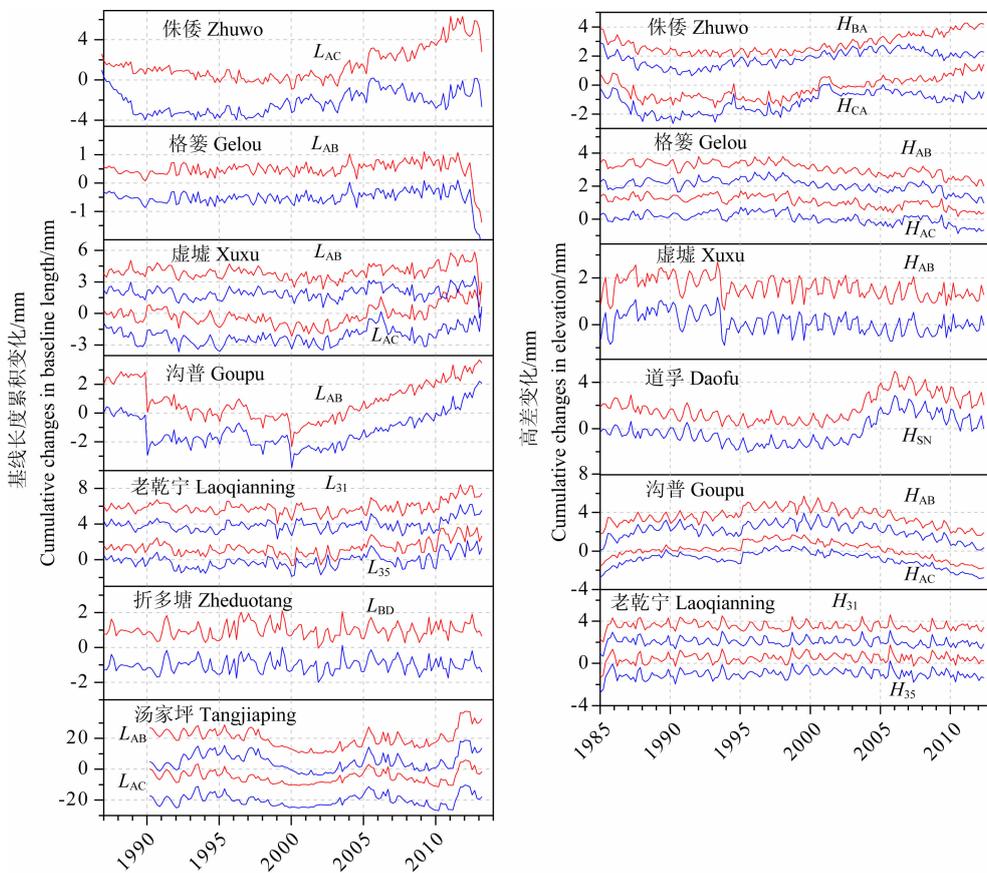


图 9 利用周期大于 2.63 a 的气温趋势变化对鲜水河断裂带短基线(左)、短水准(右)数据校正结果
红色曲线为去除线性趋势后未校正的数据, 蓝色曲线为校正后结果。

Fig. 9 The short-baseline(left graph) and short-leveling(right graph) data before (red) and after (blue) calibration by temperature trend of period larger than 2.63 years along Xianshuihe fault zone

6 主模式分析

以上分析中, 主要考虑单个场地跨断层位移的趋势变化及其与气温的关系, 并未考虑多个测点之间的联系和群体变化特征。下面将利用奇异值分解方法, 提取多条测线的变化主模式, 进而分析断裂带的整体运动特征。

主模式分析通常用于提取一个矩阵中最重要的特征和潜在模式(Langbein et al., 1990)。将多条测线的长度或高差变化组成一个矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 其行

向量代表测线长度或高差随时间的变化(采样点为 n 个), 列向量表示某一时间 m 条测线的观测值, 那么 \mathbf{A} 的奇异值分解为

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$$

其中, $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为空间特征向量, $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为时间特征向量, $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$ 是由奇异值组成的对角矩阵, 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0 (r \leq \min(m, n))$, 最大奇异值对应的特征向量可视为第一阶主模式, 代表了信号的最大变化趋势, 第二大奇异值对应的特征向量可视为第二阶主模式, 代表了与第一阶模式无关的剩余信号量的最大变化趋势, 同理可

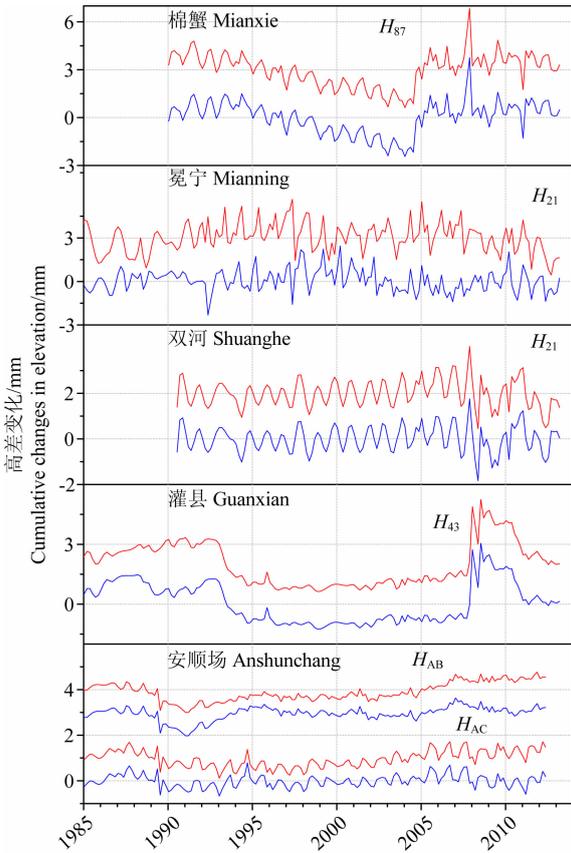


图 10 利用周期大于 2.63 a 的气温趋势变化对安宁河—则木河、龙门山断裂带短水准数据校正结果
红色曲线为去除线性趋势后未校正的数据,蓝色曲线为校正后结果。

Fig. 10 The short-leveling data before (red) and after (blue) calibration by temperature trend of period larger than 2.63 years along Anninghe-Zemuhe and Longmenshan fault zone

类推至更高阶. 在本文中,第一阶主模式代表了跨断层位移的长期变化背景,第二阶主模式代表与背景运动无关的、剩余的趋势变化特征。

同第 1 部分,将观测资料分为鲜水河断裂带短基线、鲜水河断裂带短水准、安宁河—则木河及龙门山断裂带短水准三类,图 11 给出了三类资料时间特征向量 \mathbf{V} 的第二阶主模式,我们重点关注 2010 年前后的变化. 鲜水河短基线的测线伸长速率在 2010 年后开始减缓(斜率变小,图 11a),说明其左行走滑运动相对于 2010 年前有所减弱. 高差变化显示鲜水河断裂带的张性运动开始减弱,或者说压性增强(曲线转平,图 11b),张压性变得不明显. 安宁河—则木河、龙门山断裂带高差变化的第二主模式,与鲜水河断裂带类似,在 2010 年左右曲线开始转平(压性增强,图 11c),之后近三年没有显著的张压运动。

此外,图 11 中给出了相应的气温变化第二主模

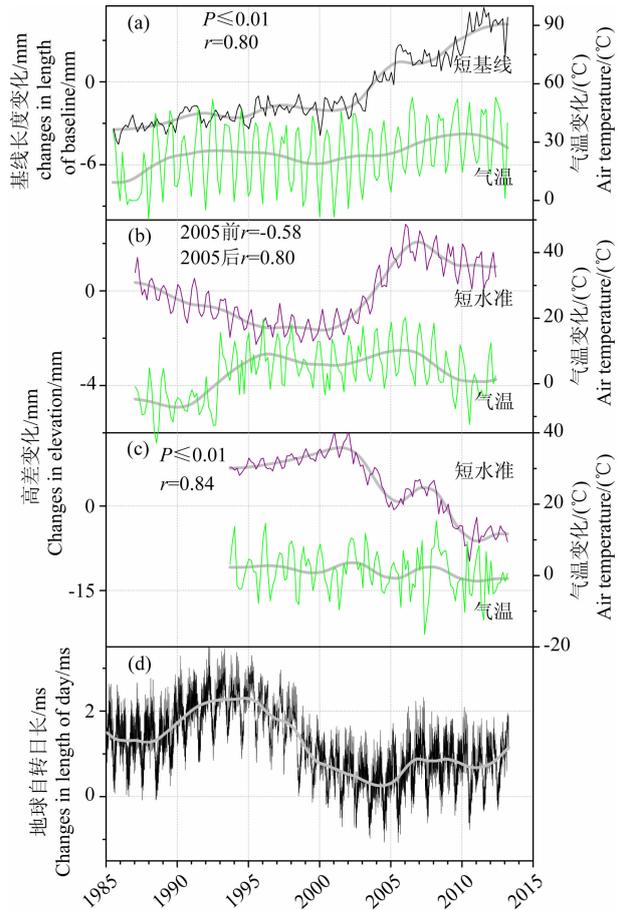


图 11 鲜水河短基线与气温群体变化的第二阶主模式,向上表示左行走滑(a);鲜水河短水准与气温群体变化第二主模式,向上表示压性(b);安宁河—则木河及龙门山断裂带短水准与气温的第二主模式,向上表示压性(c);地球自转日长变化曲线(图中所有粗灰线均表示长周期趋势线)(d)

Fig. 11 The second order principal mode for short-baseline data along Xianshuihe fault zone (a); The second order principal mode for short-leveling data along Xianshuihe fault zone (b); The second order principal mode for short-leveling data along Anninghe-Zemuhe and Longmenshan fault zone (c); The curve of day's length variation, (For all graphs, the thick gray lines are their low frequency components) (d)

式,结果显示断层位移与气温仍具有一定的同步性,虽然影响量级有限,但进一步印证了它们之间的长期相关性。

汇总以上结果,2010 年前后,研究区内的跨断层位移出现了群体性准同步转折,鲜水河断裂带的左行走滑和张性运动有所减弱,安宁河—则木河、龙门山断裂带的张性运动也开始减弱(或者说压性增强),张压性变得不明显。

7 讨论

7.1 气温对断层位移的影响机理

诸多研究表明,气温是跨断层位移观测的主要干扰因素,但由于场地观测条件等差异,气温与短基线、短水准之间有的呈正相关,有的呈负相关,热形变的幅度、形态也复杂多样. 尽管观测中已考虑测线的热膨胀系数并进行了校正,但是,断层上下两盘岩体的热胀冷缩效应是天然耦合在观测值当中的,在这种情况下,如果要精确地剔除气温影响,一种方法是对观测系统做实地标定与校正,另一种方法是配套辅助气温观测,结合台站详细的构造地质条件进行后期处理.

本文的统计结果显示,川西地区大多数跨断层位移观测都受到气温的长期变化影响,并且相关性各异,为探寻这种差异的原因,本文分别考虑了测线长度和场地高程的影响,结果显示,测线长度越长,短基线与气温之间的相关性越强(图 12a);短水准点位距离的影响不显著(图 12b);高程对短基线与气温的相关性影响同样不明显(图 12c),但不排除样本点过少的原因;短水准场地高程越大,短水准与气温的相关性越小,呈负相关关系(图 12d). 因此从统计角度讲,短基线与气温之间的相关性,基线长度是影响因素之一,而短水准与气温之间的相关性,高

程有一定影响.

关于气温对跨断层位移的影响机理,考虑一种简单而普遍的模式,即假设热形变是由断层上下两盘岩体、断层破碎带的热胀冷缩综合引起的(许寿椿和蒋承恩,1984),下面分 4 种情况来讨论.

(1)气温与短基线正相关:这是实际观测中比较常见的一种模式,当气温升高时,断层上下两盘岩体及断层物质均产生膨胀,使基线伸长.

(2)气温与短基线负相关:这种情况似乎难以理解,即当气温升高,测线长度反而缩短. 这时,应考虑测量点所处的位置. 一般来说,断层破碎带物质的强度和热膨胀系数都小于两盘岩体的相应值,当测点的构造地质条件比较特殊时,两盘岩体的膨胀受到约束,可能反过来挤压断层破碎带物质,由于测线的长度有限,如果点位处于破碎带内,可能记录到这种局部的缩短变化.

(3)气温与短水准正相关(气温升高,产生压性变化):如果断层上下两盘的热膨胀系数相同,理论上两盘岩体的热形变相对一致,有可能抵消. 但当断层两盘的物理参数有差异时,情况就变得很复杂. 假设断层上盘岩体的热膨胀系数大于下盘,区域气温升高时,上盘岩体的膨胀大于下盘,使位于上盘的水准点相对下盘的水准点抬升,这时气温便与压性断层活动正相关.

(4)气温与短水准负相关(气温升高,产生张性

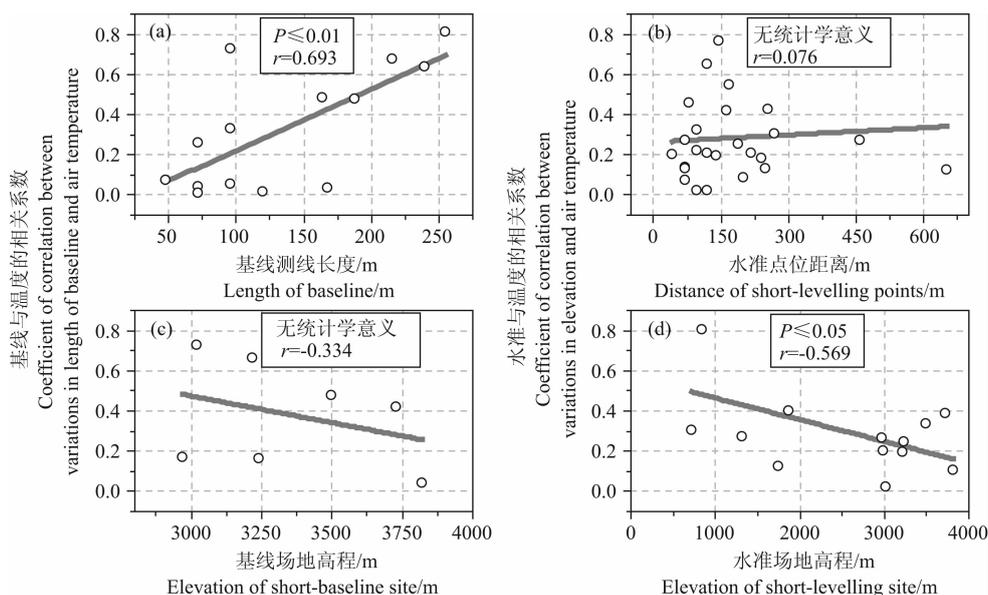


图 12 基线、气温的相关系数与基线长度散点图(a);短水准、气温的相关系数与水准点距离散点图(b);基线、气温的相关系数与场地高程散点图(c);短水准、气温的相关系数与场地高程散点图(d)(粗灰线表示线性拟合结果)
Fig. 12 Scatter graph of correlation coefficient and baseline length (a); Scatter graph of correlation coefficient and distance between benchmarks (b); Scatter graph of correlation coefficient and elevation of baseline site (c); Scatter graph of correlation coefficient and elevation of leveling site (d) (For all graphs, the thick gray lines are their linear fitting results)

变化):同理,如果断层下盘岩体的热膨胀系数大于上盘,那么气温升高时,下盘水准点相对上盘水准点抬升,使气温与压性断层活动负相关。

当然,具体台站的详细构造情况、热力学参数有所不同,可能存在其他的机制和影响因素,以上分析只作为一种探讨,并不具有普适性。

7.2 芦山地震前跨断层位移趋势转折的可能影响因素

本文结果显示,在进行长周期热形变校正后,芦山地震前川西地区跨断层位移的趋势转折仍较显著,那么能否确定这些变化是真实的断层活动?以往研究表明,跨断层位移可能受降雨、地下水位、核幔耦合作用的调制,影响因素较多。由于欠缺降雨、地下水位的资料,这里无法探讨其影响,但并不排除这两种可能性,尤其是降雨的影响。近年来,王庆良等发现断层形变与地球自转有一定的关系,地球自转速率变化的转折点往往也是构造变形的转折点,具有大范围的协调性和同步性,并认为最可能的机理是地球自转速率十年波动、相关地壳形变变化为同源过程,核幔耦合作用是其主要的驱动源(王庆良等,1999;Wang et al., 2000)。本文中,川西地区跨断层位移的趋势转折也具有较大范围、准同步的特点,因此,尽管人们认为跨断层位移与地球自转速率之间可能不是因果关系,而更可能是一种同源关系(王庆良等,1999;Wang et al., 2000;薄万举和王广余,2006),对它们进行相关分析也有一定的必要。

图 11d 显示了 1980—2013 年地球自转日长原始曲线及其趋势线,篇幅所限,这里只给出统计结果。对于鲜水河断裂带的短基线观测,在 $P \leq 0.05$ 的显著性水平上,超过 50% 的测线与地球自转日长变化具有相关关系,相关系数的绝对值在 0.213~0.249 之间,与 1 ms 的地球自转速率变化相关的基线长度变化可达 0.061~0.143 mm。鲜水河断裂带短水准近 50% 的测线与日长变化相关,相关系数绝对值介于 0.161~0.31,相关的高差变化幅度介于 0.029~0.217 mm。安宁河—则木河、龙门山断裂带的短水准 70% 以上与日长变化相关,相关系数绝对值在 0.122~0.475 之间,高差变化幅度大部分介于 0.080~0.567 mm(汤家坪影响较大,为 2.584 mm)。大部分跨断层测线与日长变化之间为弱-中等强度相关,多数测线在剔除与地球自转速率变化相关的形变成分后,残差的趋势转折仍然存在。由此可以看出,即使假设地球自转日长变化与断层形变之间是因果关系,所能引起的断层形变比重也比较小,因此

它们更可能是同一地球物理过程中呈弱相关的两种不同现象。

由上述分析可知,尽管气温、地球自转速率变化与跨断层位移存在一定的相关性,但气温、核幔耦合作用大多只能引起零点几毫米的断层形变,难以解释芦山地震前几个毫米量级的趋势转折。然而,目前尚无法排除降雨和地下水的影响,如果能综合水文、气象、核幔耦合等作用做多元统计分析,这些趋势转折的可靠性将进一步提高。

7.3 芦山地震前跨断层位移趋势转折的运动学与前兆意义

川西地区的鲜水河、安宁河—则木河、龙门山断裂带,形成了川滇、巴颜喀拉、华南块体之间的“Y”字形构造边界带。长期以来,川滇块体与巴颜喀拉块体 SE-SEE 向的差异运动,使鲜水河断裂带为左行走滑。华南块体阻挡了巴颜喀拉块体 SE-SEE 向的运动,它们之间为龙门山推覆构造带。川滇块体与华南块体之间是以左行走滑为主并伴有正倾滑分量的安宁河—则木河断裂带(徐锡伟等,2003)。

最近十几年来,巴颜喀拉块体边界上发生了一系列大地震,成为这一时期青藏高原大地震的主体活动地区,它们可能具有共同的孕育条件,反映了巴颜喀拉块体向东南方向滑动的最新活动(马瑾等,2010;邓启东等,2010)。本文的主模式分析表明,2010 年后,巴颜喀拉块体西南边界的鲜水河断裂带左行走滑减弱,东南边界的龙门山断裂带压性增强,从运动学的角度,这些变化特征可能反映了巴颜喀拉块体(或龙门山次级块体)在这一时期 SE-SEE 向的运动有所加剧(图 1 中块体相对运动示意图)。芦山地震是一个高角度逆冲地震(曾祥方等,2013;吕坚等,2013),无论它是不是汶川地震的余震(刘杰等,2013;王卫民等,2013;杜方等,2013,张广伟和雷建设,2013),在运动学上,其主震的断层面解与巴颜喀拉块体 SE-SEE 向运动加剧都是吻合的。

接下来,我们探讨这些异常断层活动的预测意义。尽管跨断层位移观测的跨距较短(一般为几十米到几百米),不能全面地反映断层活动信息,但是,相对软弱的破碎带恰恰是反映构造活动最为直接和敏感的部位,比较典型的震例包括 1975 年海城 7.3 级地震前跨海城—金州断裂的金县短水准变化(朱凤鸣,1982;Wang et al., 2006),1976 年唐山 7.8 级地震前位于唐山断块边缘的宁河台短水准异常(国家地震局编辑组,1982),1992 年美国加州兰德斯 7.5 级地震前电子测距仪和短基线观测到的同步异

常变化(Shifflett et al., 1996). 对于前兆异常现象的机制,如成核模型、扩容模型(Scholz, 2002),在本质上均属于物理模型,而用这些模型难以解释芦山地震前大范围的断层形变异常,因此,我们仅通过半经验式的推理和归纳来讨论.

首先,我们从证伪的角度出发,假设芦山地震前川西地区的异常断层活动是地震前兆.那么,这些地震前兆异常应具有如下几个自然判据和特性(邱泽华,2010):(1)有正常背景;(2)非干扰影响;(3)与地震相关.笔者认为,这样的判据更倾向于与孕震区有直接关系的“物理前兆”,或者说“源兆”.对于第(1)点,川西地区的跨断层位移观测持续了几十年,能够得到他们的长期变化规律,相对于2010年之前所谓“正常”的断层活动背景,多个场地在2010年前后的趋势转折是比较明显的;对于第(2)点,目前尚无法排除水文因素的影响;对于第(3)点,这要求跨断层位移趋势转折的演化能与地震孕育、发生、消亡的过程密切相关,如果把震前的趋势转折与地震的孕育相对应,那么当地震发生时和发生后,应出现同震和震后效应.但是,从震后的短期资料来看,这些趋势转折尚无显著变化,因此也就无法确定是否与地震密切相关.其他的可能是震后观测时间过短,趋势转折的变化不突出,或者由于地震后效,断层需要一定的时间才能恢复到稳定的滑动.因此,仅根据地震前的跨断层位移趋势转折,较难判定其为芦山地震前兆,有待震后资料的进一步积累.

其次,我们从构造前兆(Ishibashi, 1988)的角度考虑,假设川西地区异常断层活动与芦山地震,是同一构造活动过程的不同表现形式,它们之间具有内在关联性.鲜水河、龙门山断裂带作为巴颜喀拉块体的西南边界和东边界,根据它们在2010年后的活动特征,可以推测巴颜喀拉块体在这一时期SE-SEE向的运动加剧,与逆冲型的芦山地震所反映的块体运动特征相协调,这两种不同形式的构造活动,可能都是块体整体运动的一个环节或局部伴生过程,其预测意义仍需深入地做工作.

值得一提,芦山地震前,川西地区的流动重力观测曾发现区域性和局部的重力异常(祝意青等,2013),在时间上与跨断层位移的趋势转折异常大致吻合,在空间上重力异常的范围与跨断层异常所围限的区域有所重叠,这说明对于同一构造活动,不同的形变观测手段都有可能记录到一些重大的变化,在研究和预测中应发挥各自的优势相互补充与验证,例如大范围的流动重力在地点预测方面具有优

势(祝意青等,2013),而跨断层位移观测由于复测周期短,能够监测到临震前的加速或反向变化,所以在时间预测上更具优势.

综上所述,芦山地震前川西地区跨断层位移的趋势转折,可能反映了巴颜喀拉块体SE-SEE向的运动加剧.如果将其视为“物理前兆”,尚缺乏与地震直接相关的判据,有待震后资料的积累和进一步研究;如果将其视为“构造前兆”,尚需更精确地排除其他干扰影响,并得到其他观测手段的佐证.

8 结论

为检验芦山地震前川西地区跨断层位移的趋势转折是否为气温干扰所致,本文使用频谱分析和统计分析方法,研究了川西地区跨断层位移与气温之间的相互关联与影响量级,并对跨断层位移数据进行了长周期热形变校正,最后利用主模式分析方法提取各断裂带的运动特征,结果显示:

(1)在大于2.63a的周期上,短基线、短水准与气温数据仍有较强的信号分布,且频率成分较为相似,显示出一定的相关性.跨断层位移与气温的长周期趋势变化之间为弱-中等强度的相关.在 $P \leq 0.001$ 的显著性水平上,63%的短基线与气温具有统计意义的正相关或负相关性,相关系数的绝对值介于0.262%~0.809.50%的短水准与气温具有统计相关性,相关系数绝对值介于0.220~0.546.

(2)气温变化不是芦山地震前跨断层位移发生趋势转折的主要影响因素.在具有统计学意义的前提下,1℃的气温长周期趋势变化,可引起0.022~0.371 mm的基线长度变化和0.021~0.246 mm的水准高差变化.除侏倭短基线、短水准及冕宁短水准外,长周期热形变在总的跨断层位移中所占比重较小,对其趋势变化的影响有限.

(3)主模式分析表明,2010年前后,研究区内的跨断层位移观测出现群体性、准同步变化,鲜水河断裂带的左行走滑和张性运动有所减弱,安宁河—则木河、龙门山断裂带的张性运动也开始减弱(或者说压性增强),张压性变得不明显.这些变化特征可能反映了在这一时期巴颜喀拉块体SE-SEE向运动的加剧.

References

- Bo W J, Wang G Y. 2006. Researches on relations among earth rotation, fault deformation and seismicity. *Journal of*

- Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 26(2): 43-47.
- Cao J L, Shi Y L. 2005. Stress and tilt induced by annual variation of surface temperature. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 22(3): 303-308.
- Deng Q D, Gao X, Chen G H, et al. 2010. Recent tectonic activity of Bayankala fault block and the Kunlun Wenchuan earthquake series of the Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 17(5): 163-178.
- Du F, Long F, Ruan X, et al. 2013. The $M7.0$ Lushan earthquake and the relationship with the $M8.0$ Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(5): 1772-1783.
- Editorial Group of State Seismological Bureau. 1982. 1976 Tangshan Earthquake. Beijing: Seismological Press.
- Huang J P, Shi Y L, Sun Y J, et al. 2012. Effect of air temperature variation on the cross-fault deformation observations at the Tangshan seismic station. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 28(2): 222-230.
- Langbein J O, Burford R O, Slater L E. 1990. Variations in fault slip and strain accumulation at Parkfield, California initial results using Two-Color geodimeter measurements, 1984-1988. *Journal of Geophysical Research*, 95(B3): 2533-2552.
- Ishibashi K. 1988. Two categories of earthquake precursors, physical and tectonic, and their roles in intermediate-term earthquake prediction. *Pure and Applied Geophysics*, 126(2-4): 687-700.
- Liu G Z, Ma J, Zhang H X, et al. 2013. Study on activity features of Xianshuihe fault zone with fault creep and short baseline observation for the last 20 years. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(3): 878-891.
- Liu J, Yi G X, Zhang Z W, et al. 2013. Introduction to the Lushan, Sichuan $M7.0$ earthquake on 20 April 2013. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1404-1407.
- Lou G S, Zhou W, Jin P, et al. 2010. Investigation on interference factors of cross-fault deformation observation. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 30(SII): 68-74.
- Lü J, Wang X S, Su J R, et al. 2013. Hypocentral location and source mechanism of the $M_s7.0$ Lushan earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(5): 1753-1763.
- Ma J, Chen S Y, Hu X Y, et al. 2010. Spatial-temporal variation of the land surface temperature field and present-day tectonic activity. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 17(4): 1-14.
- Qiu Z H. 2010. How to identify earthquake precursor? *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 30(B11): 1-5, 9.
- Scholz C H. 2002. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. (2nd ed). New York: Cambridge. University Press
- Shifflett H, Witbaard R. 1996. Multiple precursors to the Landers earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(1): 113-121.
- Su Q, Zhu H, Yang Y L. 2009. Short-line leveling anomaly at Gengda and Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 29(S1): 103-105.
- Sun Y J, Li J, Cao J L, et al. 2008. Small variation of annual temperature in deep tunnel can produce annual variation in tilt and strain. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 30(5): 464-473.
- Wang K L, Chen Q F, Sun S Y, et al. 2006. Predicting the 1975 Haicheng earthquake. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 96(3): 757-795.
- Wang Q L, Chen Y T, Cui D X, et al. 2000. Decadal correlation between crustal deformation and variation in length of day of the earth. *Earth Planets Space* (in Chinese), 52: 989-992.
- Wang Q L, Cui D X, Wang W P, et al. 1999. The Relativity Between the Length of Earth Rotational Period, the Crustal Deformation and Stress; the Significance of Earth Dynamics and Earthquake Prediction. Selected papers for the 20th anniversary of China Seismological Society (in Chinese). Beijing: Seismological Press.
- Wang W M, Hao J L, Yao Z X. 2013. Preliminary result for rupture process of Apr. 20, 2013, Lushan earthquake, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1412-1417.
- Xu S C, Jiang C E. 1984. Annual periodic variations caused by the change of temperature in geodetic displacement measurements across faults. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 6(3): 294-303.
- Xu X X, Wen X Z, Zheng R Z, et al. 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 46(S2): 210-226.
- Yang Y L, Su Q, Zhu H. 2005. Active characteristic of several faults in Yunnan and Sichuan provinces based on the results from the observation data of both leveling and base line. *Earthquake Research in Sichuan* (in Chinese), (3): 17-21.
- Zeng X F, Luo Y, Han L B, et al. 2013. The Lushan $M_s7.0$ earthquake on 20 April 2013: A high-angle thrust event. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1418-1424.
- Zhang G W, Lei J S. 2013. Relocations of Lushan, Sichuan strong earthquake ($M_s7.0$) and its aftershocks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(5): 1764-1771.
- Zhang Y, Xu L S, Chen Y T. 2013. Rupture process of the Lushan 4.20 earthquake and preliminary analysis on the disaster-causing mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1408-1411.
- Zhou S Y, Wu Y, Shi S Y, et al. 2009. Anomalous change of fault deformation before Wenchuan $M_s8.0$ earthquake and its comparison with response of other large earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 31(2): 140-151.
- Zhu F M. 1982. 1975 Haicheng Earthquake. Beijing: Seismological Press.
- Zhu H, Su Q, Yang T, et al. 2010. Identifying anomalous change of short-line leveling on Gengda site pre-and after $M_s8.0$ Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in

Chinese), 32(6): 649-658.

Zhu Y Q, Wen X Z, Sun H P, et al. 2013. Gravity changes before the Lushan, Sichuan, M_s 7.0 Earthquake of 2013. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(6): 1887-1894.

附中文参考文献

薄万举, 王广余. 2006. 地球自转、断层形变与地震活动关系研究. 大地测量与地球动力学, 26(2): 43-47.

曹建玲, 石耀霖. 2005. 地表温度年变化对地应力和地倾斜的影响. 中国科学院研究生院学报, 22(3): 303-308.

邓起东, 高翔, 陈桂华等. 2010. 青藏高原昆仑—汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动. 地学前缘, 17(5): 163-178.

杜方, 龙锋, 阮祥, 等. 2013. 四川芦山 7.0 级地震及其与汶川 8.0 级地震的关系. 地球物理学报, 56(5): 1772-1783.

国家地震局编辑组. 1982. 一九七六年唐山地震. 北京: 地震出版社.

黄建平, 石耀霖, 孙玉军等. 2012. 气温变化对唐山地震台跨断层形变观测的影响. 中国地震, 28(2): 222-230.

刘冠中, 马瑾, 张鸿旭等. 2013. 二十年来蠕变和短基线观测反映的鲜水河断裂带活动特征. 地球物理学报, 56(3): 878-891.

刘杰, 易桂喜, 张致伟等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M 7.0 级地震介绍. 地球物理学报, 56(4): 1404-1407.

楼关寿, 周伟, 金鹏等. 2010. 跨断层形变观测干扰因素的调查. 大地测量与地球动力学, 30(SII): 68-74.

吕坚, 王晓山, 苏金蓉等. 2013. 芦山 7.0 级地震序列的震源位置与震源机制解特征. 地球物理学报, 56(5): 1753-1763.

马瑾, 陈顺云, 扈小燕等. 2010. 大陆地表温度场的时空变化与现今构造活动. 地学前缘, 17(4): 1-14.

邱泽华. 2010. 关于地震前兆的判据问题. 大地测量与地球动力学, 30(B11): 1-5, 9.

苏琴, 朱航, 杨永林. 2009. 耿达短水准异常与汶川 8.0 级地震. 大地测量与地球动力学, 29(S1): 103-105.

孙玉军, 李杰, 曹建玲等. 2008. 深部洞室中微小温度年度变化足以造成地应变年度变化. 地震学报, 30(5): 464-473.

王庆良, 崔笃信, 王文萍等. 1999. 地球自转日长变化与地壳形变及应力相关性—地球动力学及地震预报意义. 中国地震学会成立 20 周年纪念文集. 北京: 地震出版社.

王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果. 地球物理学报, 56(4): 1412-1417.

许寿椿, 蒋承恩. 1984. 温度变化引起跨断层位移测量结果的年周期变化. 地震学报, 6(3): 294-303.

徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章等. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. 中国科学(D辑), 33(S1): 151-162.

杨永林, 苏琴, 朱航. 2005. 短水准短基线观测资料反映出的川滇几个断层活动特点. 四川地震, (3): 17-21.

曾祥方, 罗艳, 韩立波等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M_s 7.0 地震: 一个高角度逆冲地震. 地球物理学报, 56(4): 1418-1424.

张广伟, 雷建设. 2013. 四川芦山 7.0 级强震及其余震序列重定位. 地球物理学报, 56(5): 1764-1771.

张勇, 许力生, 陈运泰. 2013. 芦山 4.20 地震破裂过程及其致灾特征初步分析. 地球物理学报, 56(4): 1408-1411.

周硕愚, 吴云, 施顺英等. 2009. 汶川 8.0 级地震前断层形变异常及与其他大震的比较. 地震学报, 31(2): 140-151.

朱凤鸣. 1982. 一九七五年海城地震. 北京: 地震出版社.

朱航, 苏琴, 杨涛等. 2010. 耿达短水准观测资料在汶川 M_s 8.0 地震前后异常的辨别. 地震学报, 32(6): 649-658.

祝意青, 闻学泽, 孙和平等. 2013. 2013 年四川芦山 M_s 7.0 地震前的重力变化. 地球物理学报, 56(6): 1887-1894.

(本文编辑 汪海英)