

南北地震带近期地壳水平运动变化分析*

蒋锋云¹, 张晓亮¹, 张希¹, 王伟²

(1. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国地震局地震研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 对2009、2011及2013年3期陆态网络流动GPS观测资料进行了处理, 获得了2009~2011及2011~2013年两个时间段南北地震带地壳水平运动速度图像。参考1999~2007年网络工程流动GPS速度场结果, 分析了南北地震带近期地壳水平运动场与应变场变化特征, 认为近期地壳运动变化受汶川地震震后影响较大。2013年芦山7.0级地震和岷县漳县6.6级地震是2008年汶川8.0级地震震后应力场调整触发的结果。

关键词: 南北地震带; GPS; 应变场; 汶川8.0级地震; 芦山7.0级地震; 岷县漳县6.6级地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-0229-08

0 引言

中国大陆中部发育着著名的南北向构造带, 由于其控制着一系列历史强震的发生也称为南北地震带, 该带北起鄂尔多斯地块西缘, 跨越秦岭、穿过龙门山, 再沿鲜水河—安宁河—小江断裂带向南延伸至缅甸境内, 成为分隔中国大陆东部相对稳定的鄂尔多斯高原、四川盆地和华南地块与西部强烈隆升的青藏高原之间的边界活动构造带(张培震, 2008)。深部地球物理探测和大地测量及地形地貌表明, 该带不仅是地壳厚度梯度带和重力梯度带(马杏垣, 1978), 也是中国大陆现今地壳运动和构造活动最为强烈的区域之一。自2008年南北地震带中段的龙门山断裂发生汶川8.0级地震后, 该区域地壳形变发生了显著的变化。许多学者从不同的时间和空间尺度对该区域近期地壳运动特征进行了分析与研究(蒋锋云等, 2013; 唐红涛等, 2014; 方颖等, 2014)。在分析该区域构造形变背景特征的基础上, 本文主要分析了利用流动GPS观测获得的汶川地震震后两个时段地壳水平速度场及计算的应变场的变化特征。

1 资料来源及处理

资料主要来源于2009、2011及2013年“中国大陆构造环境网络”项目(简称“陆态网络”)在

南北地震带观测的GPS数据。采用GAMIT-GLOBK软件对数据进行处理: 首先利用GAMIT软件获得GPS测站坐标、卫星轨道及台站对流层天顶延迟等参数及其方差协方差矩阵的周日松弛解(H文件), 解算时采用SOPAC数据中心提供的精密星历文件, 并将中国大陆及周边分布均匀、稳定性较好的19个国际IGS永久跟踪站一并参与解算, 对这些IGS站坐标根据实际情况给出合理的坐标约束, 对区域站则进行较为宽松的约束。其次, 利用GLOBK软件(卡尔曼滤波)进行多时段综合解, 获得网平差结果。在此过程中, 我们把解算获得的区域站周日松弛解和全球IGS站周日松弛解捆绑在一起, 并选取全球均匀分布的90多个稳定站为基准点, 将区域站速度场固定到ITRF2008框架下。最后通过基准变化, 获得相对稳定欧亚板块的2009~2011年及2011~2013年两个时间段速度场。1999~2007年速度场主要采用郑文俊等(2009)给出的结果。

2 水平运动速度场及应变率场

2.1 水平运动特征分析

为了便于后续的分析, 将区域的主要断裂及发生的主要地震在图1中标出。断裂分布位置以邓起东等(2002)给出的断裂为主要依据。

图2为南北地震带3个不同时间段GPS水平

* 收稿日期: 2014-07-21.

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2014JM2-4039)和国家自然科学基金青年基金—海原断裂震间滑动和地震周期变形的GPS研究与构造意义(41404015)联合资助。

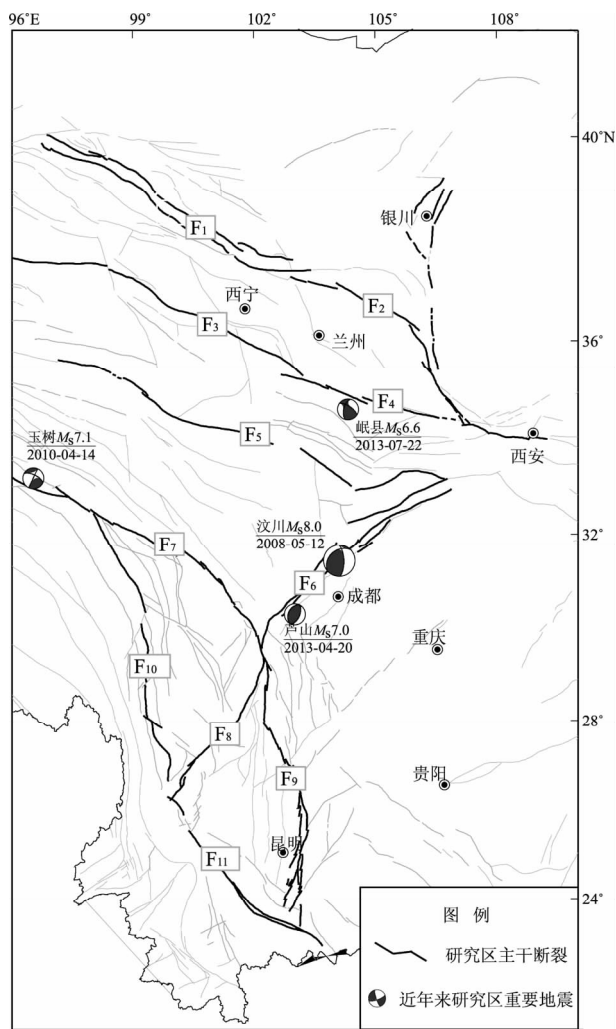
运动速度场, 总体来看其运动趋势较为一致。从构造上来看, 由于印度板块向欧亚板块俯冲, 使得青藏高原向北、向东扩展, 在这一过程中, 由于受到周边稳定阿拉善地块、鄂尔多斯地块及华南地块的阻挡, 其运动主要被高原内部及边缘的地壳缩短增厚 (England *et al.*, 1986) 和一系列大型走滑断裂切割形成的块体的挤出、旋转 (Tapponnier *et al.*, 1982) 所调整和吸收。鉴于“网络工程”建立后, 1999~2007 年南北地震带没有发

生过 $M_s \geq 7.0$ 、尤其是 8 级特大地震, 因此可将汶川地震前的 1999~2007 年较长时间段 GPS 水平运动速度场近似看作研究区水平运动的底趋势形态来分析其运动特征, 而用震后的 2009~2011 年及 2011~2013 年的运动状态来分析与大地震发生有关的水平运动变化的时间阶段性特征。

从图 2a 可以看出, 现今水平运动的空间差异性主要体现在运动强度和运动方式上:

(1) 不同构造部位运动强度的差异性主要表现在青藏高原与华南地块、鄂尔多斯地块和阿拉善地块交界地带地壳水平运动速率较小, 而在高原内部运动速率较大, 反映了青藏高原的强烈活动与周边相对稳定地块活动的差异。如: 青藏高原东北缘的柴达木—祁连山地区 GPS 速度矢量由高原内部的 15~20 mm/a 减小到高原边界地带的 5~10 mm/a, 甚至更小, 地壳缩短明显; 汶川震前的龙门山断裂带发震构造附近 GPS 站点水平运动速率较小, 只有巴彦喀拉地块内部 GPS 站点水平运动速率的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$, 尤其是跨龙门山断裂带的相对运动速率小于 1 mm/a, 2008 年汶川 8.0 级地震就发生在青藏高原东北部巴彦喀拉地块向东运动受华南地块阻挡而长期挤压积累应变的背景下。另外, 滇西南地区的红河断裂西南侧至中缅边界附近顺时针旋转的水平运动速度由北向南明显减小。

(2) 运动方式的差异主要表现在: 青藏高原东北部自西向东运动方向由 NE、NEE、逐渐转向 E 偏 S 的顺时针缓慢扭转运动, 若以祁连—海原主干断裂带为界, 则南侧的这种扭转运动显著大于北侧, 形成显著的剧烈挤压和左旋剪切变形区, 运动总体呈剪切、挤压逆冲和扭动特征。研究区中部主要以巴彦喀拉地块为主体, 其向东运动受到华南地块的阻挡, 而在龙门山构造带呈现挤压为主、兼具走滑的运动特点。其北边界东昆仑断裂则主要表现为走滑为主, 兼具逆冲的变形特征。而南边界鲜水河断裂两侧地壳运动基本上平行于断裂, 且南侧运动速率明显大于北侧, 反映了鲜水河断裂以左旋走滑为主。在南北地震带南部, 地壳运动主要呈现为围绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动, 这一顺时针运动的外围边界以鲜水河—大凉山—则木河—小江断裂巨形弧形左旋剪切带为界, 主体区域主要为川滇菱形块体及其以南至缅甸板块的区域。具体表现为: 川滇菱形



F₁: 连山北缘—昌马鄂博断裂; F₂: 海原—六盘山—陇县—宝鸡断裂; F₃: 青海南山—循化南山断裂; F₄: 西秦岭北缘断裂; F₅: 东昆仑—塔藏断裂; F₆: 龙门山断裂; F₇: 甘孜—玉树断裂及鲜水河断裂; F₈: 丽江—小金河断裂; F₉: 川滇块体东边界 (安宁河—则木河—小江断裂); F₁₀: 金沙江断裂; F₁₁: 红河断裂

图 1 研究区域主干断裂分布及近期发生的主要地震

Fig. 1 The location of main fault and the recent major earthquake in the study area

地块以 NE 向的剑川、丽江—小金河断裂为界，运动方向由 SE 向 SSE 偏转；滇西南地区以 NW 向的红河断裂为界，运动速率明显弱于川滇菱形地块，运动方向也逐渐由 SSE 向 S 偏转，而接近西缘近 NS 向的怒江—永德龙陵和澜沧—勐遮断裂对本区顺时针运动速率起到一定的屏蔽和吸收作用，其西侧 GPS 点甚至呈现 SSW 向运动。这些与新构造

时期以来的本研究区构造运动的继承性趋势较一致。反映了现今水平运动受控于青藏高原北向推挤、东向挤出和绕东构造结旋转作用。

相比图 2a、b 反映了该区域几次主要地震，特别是汶川 8.0 级地震对区域地壳运动的震后影响，图 2c 为震后更长时间区域地壳水平运动。为了从一个较大的空间尺度定量地反映这些变化对主要

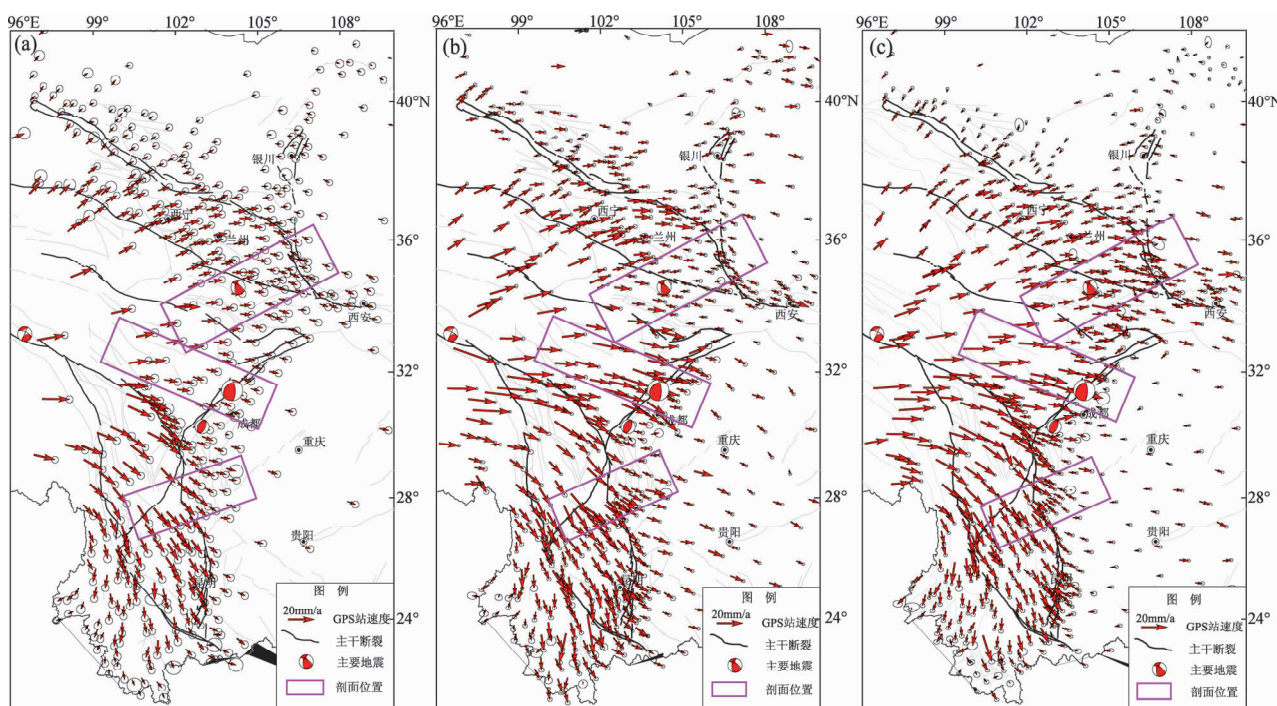


图2 南北地震带 GPS 水平运动速度场（相对欧亚板块）

(a) 1999~2007 年; (b) 2009~2011 年; (c) 2011~2013 年

Fig. 2 The GPS horizontal velocity field at the north-south seismic belt (relative to Eurasia Plate)

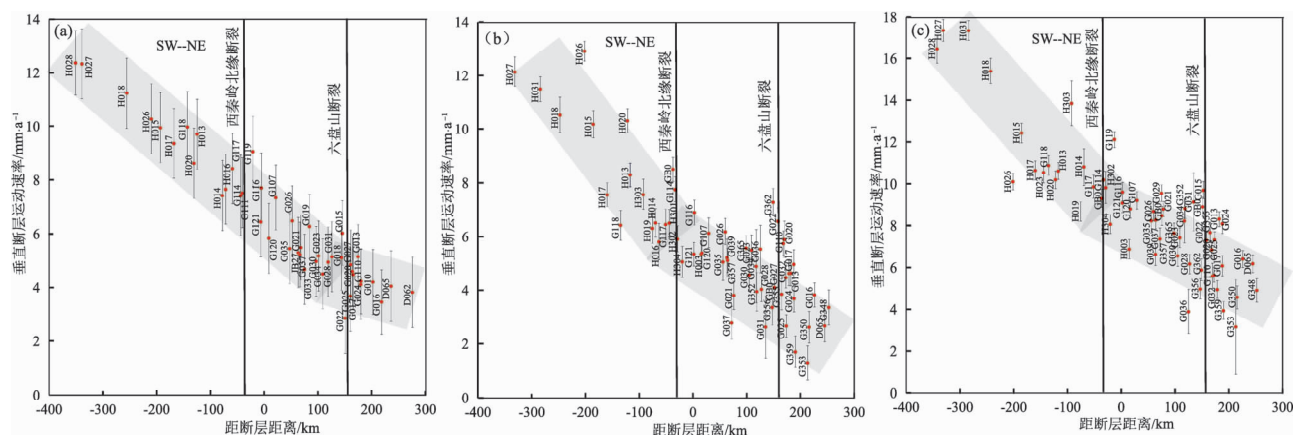


图3 汶川震区北部跨越西秦岭—六盘山构造带 GPS 站水平运动速度投影（NE 向）

(a) 1999~2007 年; (b) 2009~2011 年; (c) 2011~2013 年

Fig. 3 The projection of Station horizontal movement velocity at GPS crossing the Western Qinling and Liupan Mountain tectonic zone in the north of Wenchuan epicenter area (the direction is NE)

构造部位的影响,借助剖面分析方法,选取3个剖面(图2中矩形框)进行投影。SE向剖面主要跨越龙门山断裂汶川地震主破裂段;NE向剖面主要跨越西秦岭、六盘山断裂带;EW向剖面跨越川滇菱形块体东边界安宁河北段、大凉山断裂、马边—盐津断裂。对于SE向剖面,由于GPS运动优势方向主要沿着剖面裂的远近投影得到跨断裂地壳水平运动速度投影图3、图4。而对于EW向剖面,由于剖面走向基本上垂直于断裂的走向,而GPS速度运动方向主要平行于断裂走向(垂直于剖面走向),所以我们沿平行于断裂方向(垂直于剖面走向)投影,按距离断裂的远近投影得到跨断裂地壳水平运动速度投影图5。

从图3可以看出,汶川地震前(1999~2007年),在六盘山断裂的西南侧沿NE向剖面走向地壳运动表现为明显的线性缩短,在将近500 km的范围内地壳运动速率缩为10 mm/a,线应变达到 $2 \times 10^{-8}/a$ 。在六盘山附近则表现为明显的位移亏损(运动受阻),应变明显减小。这可能反映了六盘山断裂处于长期的强闭锁特征。汶川地震后(2009~2011年),NE向剖面投影显示,在西秦岭断裂附近出现明显的运动受阻,西秦岭以北相对以南应变减弱。可能反映了汶川地震发震构造的剧烈逆冲和右旋错动导致西秦岭构造带挤压增强,从而引起相关断裂闭锁(王双绪等,2013)。而2013年7月22日甘肃岷县漳县6.6级地震正是发生在西秦岭北缘断裂附近。2011~2013年图像和2009~2011年较为相似,只是西秦岭北缘断裂

以南地壳北东向运动相对前两个时间段有所增强。

从巴彦喀拉地块东缘至成都平原,沿着GPS速度运动的优势方向,跨越汶川地震主破裂段的GPS站水平运动速度投影(图4)结果显示:汶川地震前(1999~2007年),龙门山发震断裂附近地壳水平相对运动速度较小,存在位移亏损特征,具有孕震背景(图4a);2009~2011年龙门山断裂及其西侧附近GPS站SEE向运动速度高达25 mm/a,而成都平原GPS站速度仍与前一段时间相差不大,断裂两侧运动幅度差异悬殊(图4b),反映了汶川地震发震构造破裂错动,地震破裂带西侧巨幅逆冲为主的地壳运动释放了长期挤压闭锁积累的应变能之后,震后仍存在非常明显的余滑,幅度达到15 mm/a;2011~2013年结果反映了随时间的推移,断层两侧震后余滑减弱(10 mm/a),断层西侧GPS站水平运动速度趋势特征和2009~2011年相反,逐渐恢复到震前的特征。

跨越川滇块体北东边界的近EW向剖面(图5)显示,1999~2007年平行于断裂速率,从西向东呈逐渐衰减的特征。由于剖面内地壳运动主要为平行与断裂的运动,且断裂西侧速度明显大于其东侧,表明该区域主要以左旋剪切变形为主。剖面所跨安宁河—则木河断裂、昭觉—小江断裂及马边—盐津断裂正处在水平剪切变形梯度带上,该区域也是历史构造活动相对活跃的区域,特别是安宁河—则木河断裂和马边—盐津断裂历史上多次发生 $M \geq 6.0$ 强震。2009~2011年相比1999

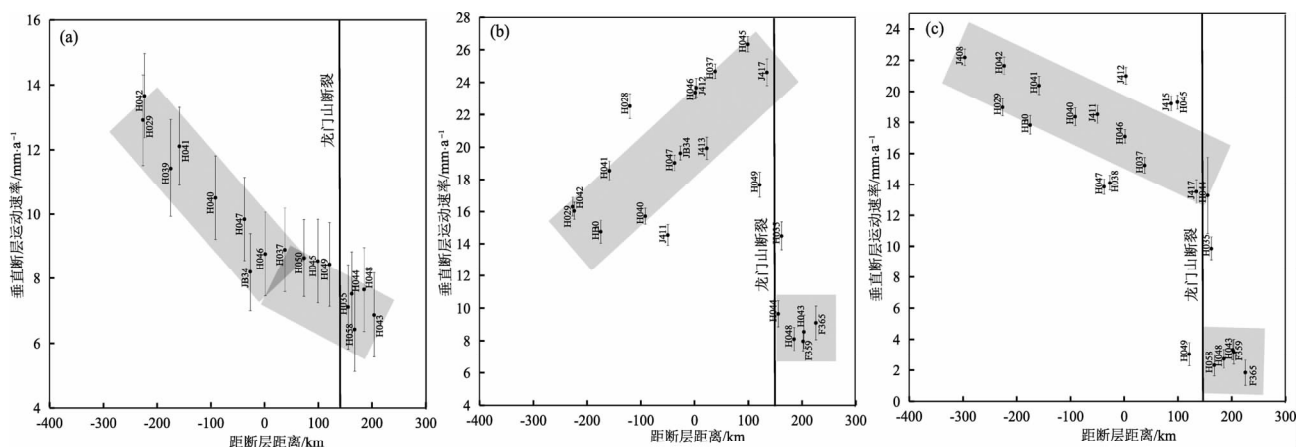


图4 跨越龙门山断裂汶川地震主破裂段GPS站水平运动速度投影(SE向)

(a) 1999~2007年; (b) 2009~2011年; (c) 2011~2013年

Fig. 4 The projection of horizontal velocity at GPS Station of the main rupture section of Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake crossing Longmen Mountain Fault (the direction is SE)

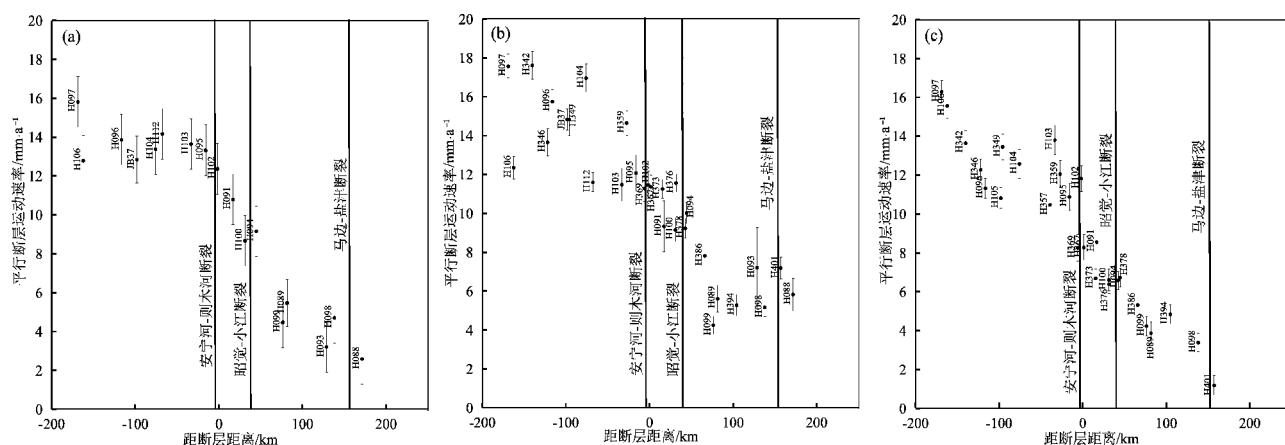


图5 跨越川滇块体北东边界 GPS 站水平运动速度投影 (近 EW 向)

(a) 1999 ~ 2007 年; (b) 2009 ~ 2011 年; (c) 2011 ~ 2013 年

Fig. 5 The projection of horizontal movement velocity at GPS Station crossing the east-north boundary of Sichuan-Yunnan Block (the direction is nearly EW)

~2007 年, 安宁河断裂的西侧平行于断裂的速度有所增强, 表明断裂附近汶川震后应变能积累存在一定的加速, 这种加速有可能触发中强地震的发生。到 2011 ~ 2013 年, 剖面投影形态和 1999 ~ 2007 年接近, 反映了随着时间的推移汶川震后影响逐渐减弱。

2.2 应变率场特征分析

有关应变率与强震活动之间的关系, 许多学者做了大量的研究。张国民等 (1999) 结合垂直形变资料, 通过理论分析、实际资料对比与计算机模型研究等方面讨论了地壳应变速率与地震活动水平之间的关系, 并认为在地震孕过程中, 应变率的增大可能是强震临近的反映。江在森等 (2003) 对 GPS 水平面应变率及最大剪应变率的震例分析总结认为, 与构造背景相一致的面应变、剪应变的高值区及其边缘梯度带是未来强震可能发生的危险区域。

以上结论具有普遍的指导意义, 但在具体应用时, 由于实际地壳运动非常复杂, 不仅包含弹性变形, 而且包含断层的蠕滑、强震的同震错动、震后余滑等等, 需要在分析应变场的时候, 不仅要考虑区域构造背景特征, 而且要考虑显著地震的影响。下面我们主要对南北地震带上述 3 个时间段水平面应变率和最大剪应变率场, 结合该区域几次显著地震和继承性构造变形背景, 在探讨该区形变应变机理的基础上, 分析汶川震后形变应变场变化特征。主应变率、面应变率和最大剪应变率采用最小二乘配置计算获得 (张希等, 1998)。

1999 ~ 2007 年主应变率和面应变率 (图 6a) 反映了南北地震带背景应变场特征, 由图可见, 以逆冲推覆构造为主的祁连山构造带、西秦岭构造带、六盘山构造带及龙门山构造带面应变均表现为显著压性特征。川滇块体东边界虽然构造上以左旋走滑为主, 但仍然表现为压性特征, 显示其具有一定的逆冲特征。而在羌塘块体的东部和川滇菱形块体中西部及其西南部的保山地块面应变为张性, 可能是由于高原物质沿着喜马拉雅东构造结顺时针旋转逃逸过程中, 中下地壳流变层拖拽、隆升、分流等多种作用力共同影响的结果 (张培震, 2008; 王庆良等, 2008; 王双绪等, 2013)。

2009 ~ 2011 年主应变率和面应变率 (图 6b) 分布相比 1999 ~ 2007 年量值明显偏大, 空间分布非均匀性也增强。变化主要体现在: (1) 龙门山断裂西北部的东昆仑断裂至西秦岭北缘断裂区域, 表现为与背景应变场 (图 6b) 一致的增强特征, 有利于该区域中强地震的发生; (2) 由于断层震后余滑效应, 龙门山断裂带呈现显著的压应变增强特征, 而巴彦喀拉地块内部由于震后松弛表现为张性; (3) 祁连山构造带至海原断裂北东向压性应变均存在不同程度的增强; (4) 小江断裂中南段则由之前的压性转换为张性。此外 2010 年玉树地震的同震动影响显著, 沿断裂在震区东南侧出现压应变高值区。

2011 ~ 2013 年面应变率和主应变率空间分布和 2009 ~ 2011 年基本一致, 只是量值普遍有

所减弱,反映了汶川地震、玉树地震后该区域应力场的调整、恢复过程。具体表现为:(1)东昆仑至西秦岭一带仍然处于汶川震后恢复阶段,显示出高应变积累特征;(2)龙门山断裂震后余滑

有所减弱,而其南部的川滇块体东边界安宁河—则木河段仍处于高应变积累特征;(3)祁连山构造带至海原断裂带基本上恢复到背景场一致的特征。

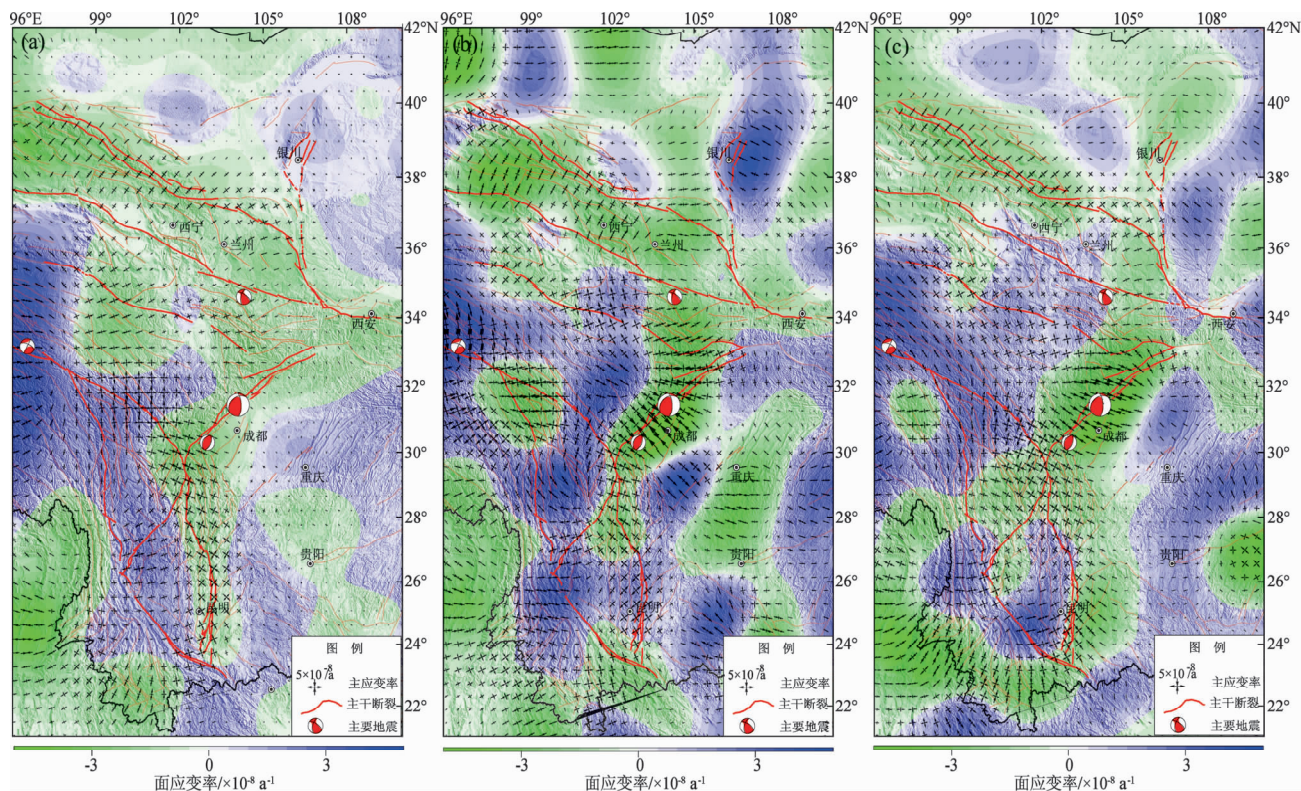


图6 南北地震带 GPS 水平运动面应变率和主应变率场

(a) 1999 ~ 2007 年; (b) 2009 ~ 2011 年; (c) 2011 ~ 2013 年

Fig. 6 The plane strain rate and principal strain rate field of GPS horizontal movement at the north-south seismic belt

图7显示了3个时间段最大剪应变率的大小和主应变率,1999~2007年最大剪应变率显示,整个南北带最显著的高值区为川滇块体东边界,主要包括鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂,反映了高原物质东南向逃逸过程中和巴彦喀拉块体、华南地块之间显著的相对运动。其次,祁连山—海原构造带也显示较高的最大剪应变分布,反映了青藏高原物质北东向运动受到阿拉善地块和鄂尔多斯地块阻挡之后,在其东北边缘产生强烈的逆冲推覆、旋转走滑等构造运动。最后,东昆仑构造带东段和西秦岭构造带之间,主要包括东昆仑断裂东段、塔藏断裂、迭部—白龙江断裂、临潭—宕昌断裂等,也显示相对较高的最大剪应变率分布,反映了巴彦喀拉地块东部北边界和甘东南区域强烈的逆冲推挤、剪切走滑作用。以上3个部位也是区域内历史地震发

生相对密集的区域。2009~2011年最大剪应变率由于受到汶川地震的影响,相对1999~2007年整个区域量值明显偏高,特别是上述三个背景应变场高值区域。此外,由于汶川地震震后、玉树地震同震的影响,在龙门山断裂带和鲜水河断裂北段存在显著的最大剪应变高值分布。2011~2013年最大剪应变相比2009~2011年整体有所减弱,可能反映地壳运动处于汶川地震、玉树地震震后随时间的恢复调整阶段。而相对2009~2011年最大剪应变率有所增强的部位为鲜水河断裂东段、龙门山断裂和安宁河断裂北段的交汇部位,也是川滇块体、巴彦拉地块和华南地块三大块体的交界区,考虑到该区是背景应变高值区,未来一年及稍长时间应注意中强地震的发生。

就应变场与强震的对应关系上来看,该区域

几次中强地震,均发生在背景应变场应变值较高、且近期应变显著增强区域或其边缘部位。如2013年4月20日发生于龙门山南段的芦山7.0级

地震、2013年7月22日发生于临潭—宕昌断裂的岷县漳县6.6级地震。2014年5月30日发生的云南盈江6.1级地震也具有相似的应变场特征。

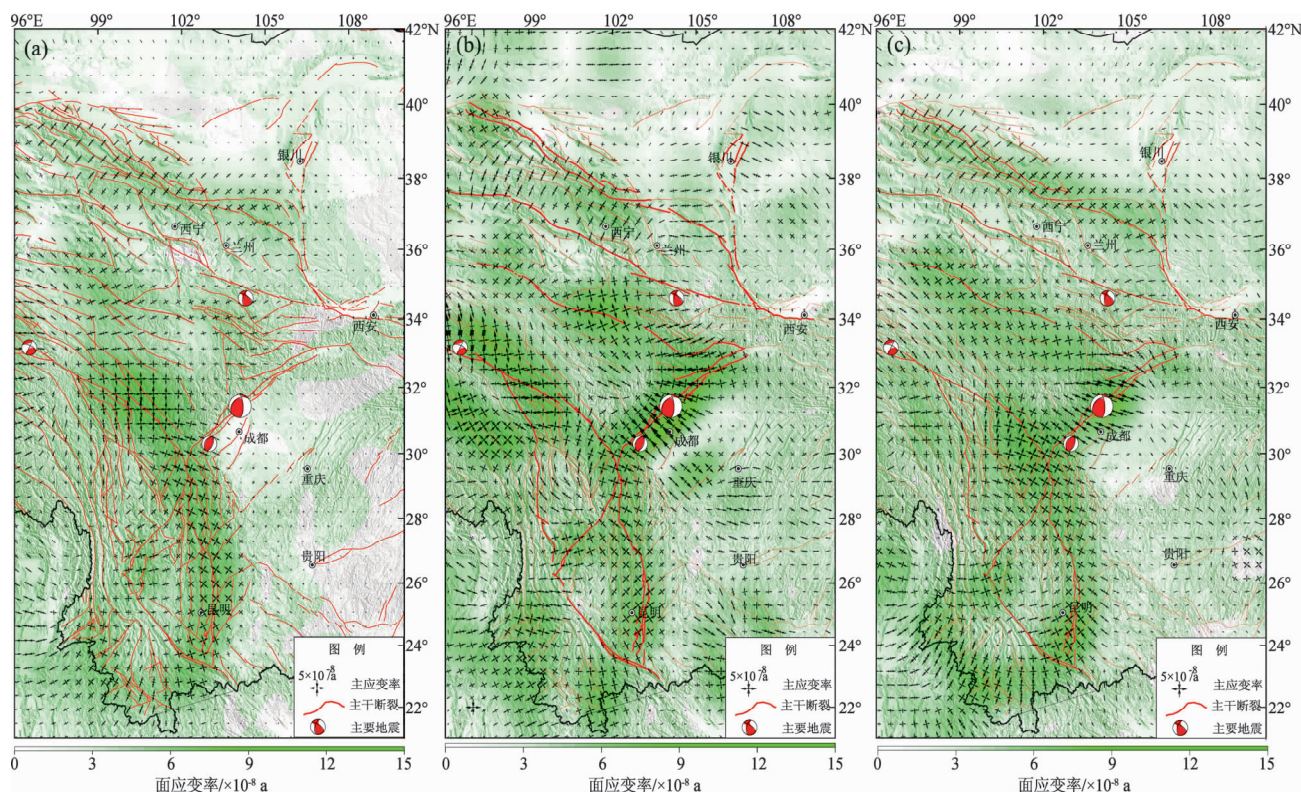


图7 南北地震带GPS水平运动最大剪应变率和主应变率场

(a) 1999~2007年; (b) 2009~2011年; (c) 2011~2013年

Fig. 7 The calculated maximum shear strain rate field and principal strain rate field of GPS horizontal movement at the north-south seismic belt

3 结论

通过上述对南北地震带地壳背景形变应变场和近期地壳形变应变场的动态分析,可以看出,汶川地震震后变形对研究区形变应变场影响较大,芦山地震和岷县漳县地震是汶川地震震后应力场调整过程中,在已有中强地震形变孕育背景的构造部位形成应力触发作用的结果。由于没有汶川地震之前玉树地震之后的水平形变资料,本文没有进一步研究汶川地震之后玉树地震之前该区域形变应变特征。但相关研究(程佳等,2011)认为汶川地震同震及震后变形对玉树地震具有触发作用。就大尺度近期地壳形变应变场而言,应注意东昆仑断裂东段至西秦岭北缘断裂之间和鲜水河断裂东段至安宁河断裂北段之间发生

6级以上强震的危险性。

参考文献:

- 程佳,刘杰,甘卫军,等. 2011. 1997年以来巴喀拉块体周缘强震之间黏弹性触发研究[J]. 地球物理学报, 54(8): 1997-2010.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学(D辑), 32(12): 1020-1030.
- 方颖,江在森,邵志刚,等. 2014. 利用GPS连续资料分析川滇地区的地壳变形特征[J]. 地震研究, 37(3): 204-209.
- 江在森,马宗晋,王双绪,等. 2003. GPS初步结果揭示的中国大陆水平应变场与构造变形[J]. 地球物理学报, 46(3): 352-358.
- 蒋锋云,朱良玉,王双绪,等. 2013. 青藏东北缘块体水平运动特征研究[J]. 大地测量与地球动力学, 33(2): 13-17.
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学图集[M]. 中国地图出版社: 1-68.
- 唐红涛,孙兴华,保长燕,等. 2014. 近年来龙门山断裂GPS剖面变形与应变积累分析[J]. 地震研究, 37(3): 373-378.
- 王庆良,崔笃信,王文萍,等. 2008. 川西地区先进垂直地壳运动研究

- [J]. 中国科学(D 辑), 38(5):598–610.
- 王双绪, 蒋锋云, 郝明, 等. 2013. 青藏高原东缘现今三维地壳运动特征研究[J]. 地球物理学报, 56(1):3335–3345.
- 张国民, 李丽, 石耀林, 等. 1999. 地壳应变率与地震活动关系的研究[J]. 中国地震, 15(1):1–13.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学(D 辑), 38(9):1041–1056.
- 张希, 江在森, 张四新, 等. 1998. 借助最小二乘配置整体解算地壳视应变场[J]. 地壳形变与地震, 18(2):57–62.
- 郑文俊, 张培震, 袁道阳, 等. 2009. GPS 观测及断裂第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形[J]. 地球物理学报, 52(10):2491–2580.
- England P., Houseman G.. 1986. Finite strain calculations of continental deformation 2: comparison with the India – Asia collision zone[J]. J. Geophys. Res., 91(3):3664–3676.
- Tapponnier P., Peltzer G., Dain A. Y. L., et al.. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine[J]. Geology, 10(12):611–615.

Analysis on Recent Crustal Horizontal Movement Variation of South-North Seismic Belt

JIANG Feng-Yun, ZHANG Xiao-liang, ZHANG Xi¹, WANG Wei²

(1. The Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, shaanxi, China)

(2. Institute of seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract

We derived the crustal horizontal velocity field at North-South Seismic Belt in two periods of 2009 ~ 2011 and 2011 ~ 2013 by processing the GPS observation data from TEONC (China Tectonic Environment Observation Network) in 2009, 2011 and 2013. Contrast with the GPS velocity field during 1999 and 2007 from CMONC (China Crustal Movement Observation Network), we analyzed the recent variations characteristic of crust horizontal velocity field and strain field at the north-south seismic belt and considered that the recent variation of crust movement was mainly influenced by post-seismic effect of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. The Lushan $M_s7.0$ earthquake and Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake were the triggering result of post-seismic stress field adjustment of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake.

Key words: North-South Seismic Belt; GPS; strain field; Wenchuan $M_s8.0$ earthquake; Lushan $M_s7.0$ earthquake; Minxian-Zhangxian $M_s6.6$ earthquake