



论文

川滇主要断裂带近期运动变化及与地震活动关联性

刘峡^{①②}, 马瑾^{②*}, 杜雪松^①, 朱爽^①, 李腊月^①, 孙东颖^①

① 中国地震局第一监测中心, 天津 300180;

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

* 通讯作者, E-mail: majin@ies.ac.cn

收稿日期: 2015-10-09; 接受日期: 2016-01-19; 网络版发表日期: 2016-05-05

国家自然科学基金项目(批准号: 41472180, 41172180)资助

摘要 汶川地震发生于巴颜喀拉、华南和川滇菱形块体“三联点”附近, 对周边块体和川滇地区主要断裂带也即块体边界带的影响不容忽视. 本文基于最新得到的 1999~2007、2009~2011 和 2011~2013 年 GPS 复测结果, 利用二维有限元接触模型和“块体加载”方法, 模拟强震前后断裂带的运动与受力变化. 结果显示汶川地震前龙门山断裂带为低速运动但挤压应力快速积累, 汶川地震后巴颜喀拉、滇西南、菱形块体向 E-SSE 逃逸增强, 龙门山断裂带右旋、挤压运动速率和压应力年积累量最高值分别为震前的 4.5、2.1 和 2.5 倍. 鲜水河南段、安宁河、则木河、大凉山和丽江-小金河断裂带挤压应力快速积累, 并形成横跨川滇中部沿 NE 向展布的挤压应力增强带. 鲜水河断裂带中部拉张增强并出现短暂反向. 上述变化与该区同期中强地震分布关系密切, 揭示出地震活动空间迁移与块体运动变化有关.

关键词 川滇地区, 汶川地震, 构造块体, 有限元分析, 断层

1 引言

川滇地区位于青藏高原东南缘, 地面高程变化剧烈、深大断裂纵横展布、强震频发, 是高原物质向 E 和 SE 逃逸的主要通道. 李坪等(1975)、阚荣举等(1977)根据震源机制和地震破裂带资料, 以鲜水河、安宁河、小江、曲江、金沙江和红河断裂带为界划分出“川滇菱形块体”, 认为该块体相对外围向 SSE 运动

并控制区内主要地震活动. 宋方敏等(1998)围绕菱形块体周边划分出龙门山块体、滇东块体、印支块体、腾冲-保山块体和藏东块体. 徐锡伟等(2003)根据主干活动断裂和次级活动断裂展布、全新世滑动速率、历史地震地表破裂等将川滇地区划分出马尔康、川滇菱形、保山-普洱和密支那等 4 个一级活动块体, 其中川滇菱形块体又分为川西北和滇中 2 个次级块体, 指出一系列块体通过平移、顺时针转动和垂向隆升实现

中文引用格式: 刘峡, 马瑾, 杜雪松, 朱爽, 李腊月, 孙东颖. 2016. 川滇主要断裂带近期运动变化及与地震活动关联性. 中国科学: 地球科学, 46: 706–719, doi: 10.1360/N072015-00073

英文引用格式: Liu X, Ma J, Du X S, Zhu S, Li L Y, Sun D Y. 2016. Recent movement changes of main fault zones in the Sichuan-Yunnan region and their relevance to seismic activity. Science China Earth Sciences, 59: 1267–1282, doi: 10.1007/s11430-016-5278-8

高原“有限”侧向挤出,而区内主要活动断裂带,即分割、围限各级块体的边界带,是带有一定倾滑分量的走滑断裂,其中逆冲与拉张分量是块体相对运动在边界带上的局部形变响应,与块体运动相匹配.借助GPS、跨断层形变观测和更加丰富的地震、地表破裂数据,其他学者(程万正等, 2003; 吕江宁等, 2003; 程佳等, 2012)相继进行了大体类似的块体划分,指出块体边界断裂带的错动方式、受力特征取决于各块体平移、转动速度的差异,并与发生其上的强震破裂方式基本相符.以上研究提示我们,块体与边界断裂带共同构成的运动体系是认识川滇地区现今地壳形变动态变化和区域强震孕育、发生及远场迁移的基本出发点.

2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 地震发生于龙门山断裂带中段,以逆冲为主,是巴颜喀拉块体向东移动受四川盆地阻挡所致(张培震等, 2008).由于该地震位于巴颜喀拉、华南、川滇菱形块体相交接的“块体三联点”附近,其影响不应仅局限于震源附近的同震位错和震后弛豫,更可能的是,强震巨大能量释放与断层破裂解锁导致块体相对运动发生变化,并影响到区内主要断裂带也即不同级次块体边界带的运动和应力、应变积累.实际上汶川地震后川滇地区呈现出新的中、强震活跃格局,截止2015年1月,除2013年4月20日发生于龙门山断裂带南段的芦山 $M_s7.0$ 地震以外,2008年8月30日、2009年7月9日相继发生四川攀枝花 $M6.1$ 、云南姚安 $M6.3$ 地震,2014年5月30日、8月3日、10月7日和11月22日相继发生云南盈江 $M6.1$ 、鲁甸 $M6.5$ 、景谷 $M6.6$ 和四川康定 $M6.3$ 地震.因此深入分析强震前后块体边界断裂带的运动、受力变化,探讨其与强震孕育、发生的关联性有着重要意义.

经过中国大陆地壳运动监测网络工程一期和二期项目,川滇及周边已建立~400个GPS流动测站和连续站并完成多期复测,为研究区域地壳运动奠定了基础.其中,从块体差异运动出发研究断裂带形变运动已有很多成果(乔学军等, 2004; 赵静等, 2011; 蒋峰云等, 2013; 丁开华等, 2013; 魏文薪等, 2012),集中于运动学方面,即利用GPS数据计算各块体的运动参数并将其投影至边界带,得到其走滑与张压速率.此外还有用断层位错反演确定速率(王阎昭等, 2008).这些结果均有助于认识块体与边界断裂带相互作用过程.与上述方法相比模拟计算更

为直观,为此刘峡等(2013)提出“块体加载”方法,即建立涵盖构造块体及边界带的有限元模型,利用块体内部GPS数据确定块体运动参数并进行加载计算,模拟边界断裂带的形变运动.该方法物理意义明确、易实现,能同时给出断裂带的错动量和受力状态,而基于多个GPS数据得到的块体运动信息确保了模拟结果的稳定性.利用该方法模拟山西断陷带和川滇地区主要断裂带的形变运动取得了较好效果(刘峡等, 2013, 2014).

本文利用最新得到的汶川、芦山地震前后川滇地区1999~2007、2009~2011和2011~2013年三个时段的GPS复测结果,采用川滇地区主要断裂带有限元接触模型和“块体加载”方法,模拟不同时段各断裂带运动,结合近期地震活动分析两者的关联性.

2 川滇地区 GPS 数据处理

使用GAMIT/GLOBK 10.40和QOCA软件对川滇地区1999~2013年多期GPS区域站、同时段基准站数据进行统一处理和解算,分3步进行:① 利用GAMIT软件解算得到单天解,数据采样间隔为30s,基线处理模式为Relax模式,地球重力场、固体潮和极潮模型都遵循IERS2003规范,全球海潮模型采用最新版FES2004,以LC观测量消除电离层一阶项的折射影响,对流层映射函数采用GMF模型,每2个小时估计1个天顶延迟参数;② 利用GLOBK软件将每天的多个单天解通过公共站和卫星合并,得到包含所有点的单天解;③ 利用QOCA软件综合多天的单天解进行整体平差估算各测站坐标.选取37个较为稳定的测站为框架点,解算ITRF2005框架下各测站在不同时段上的站速度.在此过程中为降低2011年3月11日日本 $M_s9.0$ 地震、2013年4月20日芦山 $M_s7.0$ 地震的影响,利用GPS连续观测数据计算得到上述地震引起的远场同震位移,然后在求解速度场时进行扣除.最后得到已扣除同震位移的1999~2007、2009~2011和2011~2013年三个时段GPS速度场.需指出的是,本文舍去了2007~2009年速度结果,该结果主要反映汶川地震同震位移和震后一年震源区快速调整,与本文研究的块体运动关系较小.对各时段GPS速度场进行坐标旋转(求取其刚性旋转的欧拉极、转动量并进行扣除),得到区域无旋转坐标框架下GPS速度分

布, 见图1, 其中误差椭圆的置信为67%. 三个时段的测点数分别为290、414和381个. 不同时段测点有相当部分是重合的, 其中391个测点具备两个时段以上观测数据, 190个测点同时有三个时段数据. 为简便计, 下文将1999~2007、2009~2011和2011~2013时段依次称为第一、第二和第三时段.

第一时段(图1a)反映出汶川地震前较长时期的水平运动状态. 第二、三时段(图1b、c)则反映汶川地震后至芦山地震前的水平运动. 其中第二时段为汶川震后1~3年的速度结果, 不含汶川同震位移和震后一年内震源区的快速调整变化, 并扣除了日本 $M_s9.0$ 地震的同震影响. 第三时段为芦山地震前两年至震后约四个月结果, 扣除了日本 $M_s9.0$ 地震、芦山 $M_s7.0$ 地震的同震形变, 主要反映芦山地震前~2年内的运动情况. 三个时段数据显示汶川地震前、后至芦山地震前变化明显, 揭示强烈地震的能量释放和断层破裂解锁可能导致周边块体相对运动发生变化: 根据图1a, 汶川地震前川滇菱形块体相对华南块体顺时针转动, 巴颜喀拉块体东部相对菱形块体向北移动, 在龙门山断裂带两侧几十公里范围内巴颜喀拉地块与四川盆地的相对运动不突出; 根据图1b和c, 汶川地震后至芦山地震前, 巴颜喀拉块体与四川盆地的“对冲”运动十分突出, 考虑到四川盆地内的GPS连续站观测显示盆地运动相对稳定, 该“对冲”应是巴颜

喀拉块体加快东移所致; 此外菱形块体顺时针转动速度似乎有所增大.

3 川滇地区主要断裂带有限元接触模型和“块体加载”计算

“块体加载”模拟块体边界即主要活动断裂带形变运动步骤为: 第一步, 建立包含构造块体和主要活动断裂带的二维有限元接触模型, 断层两盘处理为接触状态; 第二步, 利用块体内部GPS数据计算块体运动参数; 第三步, 根据块体运动参数计算块体内部有限元节点的速度并作为约束条件进行加载, 模拟断裂带运动. 计算采用ANSYS软件和弹性静态有限元接触分析, 对不同时间段GPS数据进行重复计算, 得到断裂带动态变化. 考虑到计算给出的应力增量很小、远低于岩石强度, 重复计算不考虑前一时段的应力积累, 视初始应力为零.

3.1 二维有限元接触模型和参数设定

在 $96^{\circ}\sim 109^{\circ}\text{E}$ 、 $20^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 范围内构建模型, 涵盖巴颜喀拉块体东部、滇东块体、川西北块体、滇中块体、滇南块体和藏东块体. 纳入模型的断层共计43条, 其中龙门山中央断裂带与后山断裂带合并为一条断层, 小江断裂的两个分支合并为一条. 图2a为模型构

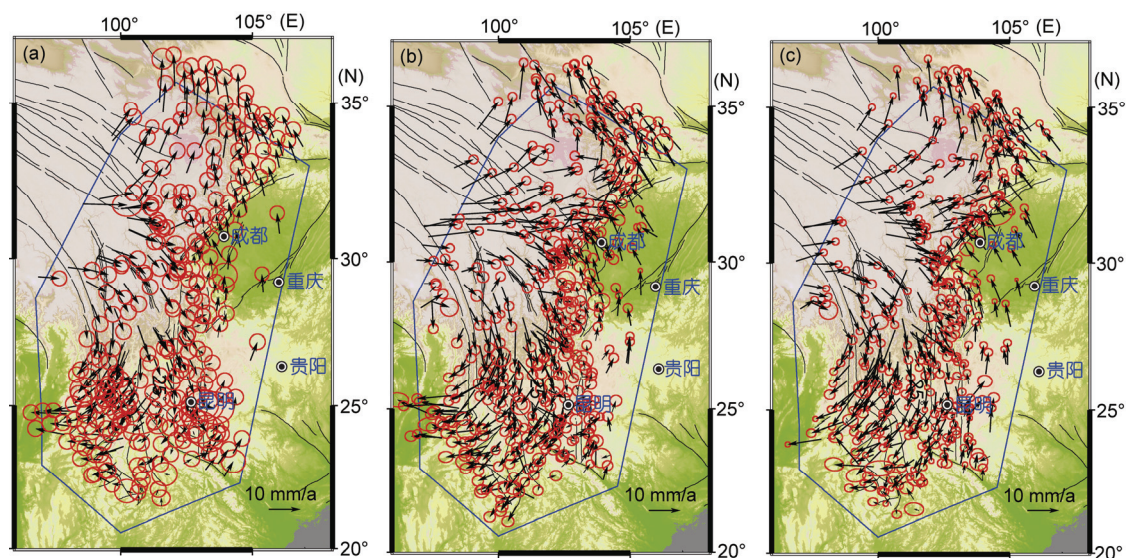


图1 川滇地区 GPS 站速度结果

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

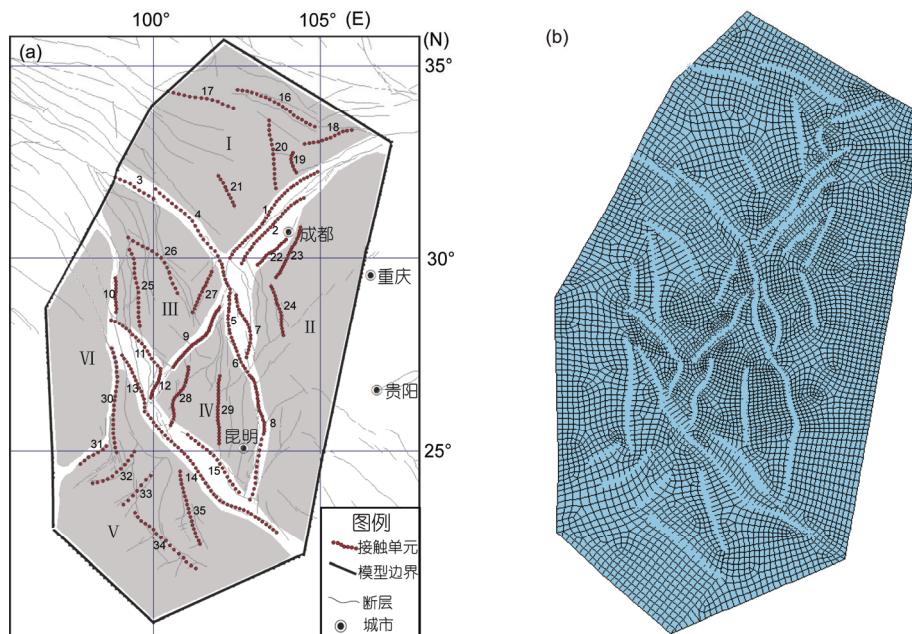


图2 川滇地区及主要断裂带有限元模型

(a) 模型构架; (b) 模型分网. 1 龙门山中央断裂、龙门山后山断裂(合并为一条); 2 龙门山前山断裂; 3 甘孜-玉树断裂; 4 鲜水河断裂带; 5 安宁河断裂带; 6 则木河断裂带; 7 大凉山断裂带; 8 小江断裂带; 9 小金河断裂带; 10 字嘎寺-德钦断裂; 11 德钦-中甸断裂; 12 玉龙雪山东麓断裂; 13 维西-巍山断裂; 14 红河断裂带; 15 南华-楚雄-建水断裂; 16 盖山-迭山断裂; 17 东昆仑断裂带; 18 文县断裂; 19 虎牙断裂; 20 岷江断裂; 21 马尔康断裂; 22 新津-德阳断裂; 23 龙泉山西缘断裂; 24 马边-盐津断裂; 25 定曲河断裂; 26 理塘-义敦、理塘-德巫断裂; 27 玉农希断裂; 28 宁蒗、永胜-宾川断裂; 29 磨盘山-绿汁江断裂; 30 怒江断裂; 31 大盈江断裂; 32 畹町-安定断裂; 33 南宁河东支、河西支断裂; 34 大扁担山-景洪断裂; 35 镇远-普洱断裂; I 巴颜喀拉块体东部; II 滇东块体; III 川北块体; IV 滇中块体; V 滇西南块体; VI 藏东块体

架. 块体区由面单元plane182组成, 断层由二维接触单元conta171、targe169组成. 刘峡等(2014)采用conta175、targe169接触单元, 由于conta175不提供接触面的应力计算结果, 为分析断层沿线受力情况, 该文章提取断层两侧~50km范围内的块体面单元plane182的应力结果并投影至断层接触面上, 严格而言, 该投影结果为断层两侧区域应力, 而非断层两盘的接触力. 为此本文改用conta171接触单元, 该单元可直接获取断层接触面应力, 更便于比较. 模型分网采用四边形单元, 边长控制在15km左右, 尽量做到网格均匀, 图2b为模型分网.

参照文献朱守彪等(2004)、郑勇等(2006)设定除四川盆地以外的模型区域的杨氏模量和泊松比分别为 7.0×10^{10} Pa和0.25, 四川盆地杨氏模量高于设定值0.7~1.0倍. 断层摩擦系数主要取决于断层面粗糙度和空隙含水等, 直接影响断层速率、受力和局部闭锁等, 本文基于下述原因将接触单元的摩擦系数统一设定为0.3, 忽略不同断层及断层不同分段的差别:

① 研究区GPS测点距离一般为15~40km且往往远离断层, 断层两侧~30km范围内的测点数过少, 因此GPS数据对于大多数断层的局部闭锁、断层不同分段的运动差异的分辨能力不足. 基于GPS数据的位错反演也证实了这一点(王阎昭等, 2008). ② 本文GPS数据扣除了汶川、日本、芦山地震的同震位移, 且未采用受汶川震后局部快速调整影响较大的2007~2009年数据, 重点分析块体运动变化对各边界断裂带的不同影响、区域中强地震空间迁移的力学背景, 不讨论与发震地点密切相关的单一断裂带的局部闭锁问题. ③ 本文“块体加载”属于相对强的约束方式, 图2a阴影区(块体区)为加载区, 相当于在断层两侧实施近距离约束. 试算显示, 若在断层两侧15~20km处进行约束, 摩擦系数在0.3~0.6范围内变化, 断层面应力变化低于5%, 断层速率变化低于15%, 这些变化不影响对整个结果的后继分析, 包括与现有地质、地震结果相比较. ④ 试算显示, 若改变约束点与断层的距离, 使之在15~50km范围内变化, 所得结果略有差异, 为

此, 本模型网格划分采用边长~15km的四边形单元, 将断层两侧的约束距离控制在15~20km, 从而确保不同断层的相互对比.

3.2 块体运动参数估计和有限元加载计算

关于川滇地区动力学问题, Royden等(1997)指出陆陆碰撞导致印、欧板块围绕东喜马拉雅构造结右旋剪切并发生壳幔解耦, 中下地壳流动驱使各级块体平移、旋转和表层构造变形. 层析成像证实该区中下地壳至上地幔、大型走滑断裂下部普遍存在低速异常(王椿镛等, 2002), 与相邻的四川盆地和华南块体形成鲜明对比. 根据GPS观测显示的地表垂向、水平向形变散布于整个区域的特征, Shen等(2005)、Gan等(2007)和Liang等(2013)也指出可能存在深部物质流拖动机. 张培震等(2008)依据川滇东界由鲜水河、安宁河、大凉山、盐津-马边、则木河和小江断裂带组成的NW-SN弧形构造带以左旋剪切为主、仅在向东北方向突出的弧形顶部出现少量逆冲挤压变形的事实, 推断其深部驱动机制可能为Poiseuille式的中、

下地壳层流. 此外地壳厚度、高程强烈变化产生的重力滑塌亦可驱动区域侧向挤出和断裂带张裂运动(Liu等, 2003). 上述研究揭示深部物质运移、重力滑脱等对构造运动影响重大, 由此引发的区域地壳形变不应仅局限于块体边界, 块体内部变形也不能忽视. 因此本文采用李延兴等(2007)给出的块体黏弹性运动模型, 利用块体内部GPS数据(图2a阴影区内的GPS点)和最小二乘法计算各块体运动参数, 在计算过程中剔除个别残差过大的站点进行重复计算, 最终结果见表1(其中形变参数略). 表1显示的模型标准差接近或略低于GPS站速度精度(误差椭圆见图1).

根据表1计算块体区(即加载区, 图2a阴影区)单元节点的速度值并进行加载计算, 模拟边界带(即模拟计算区, 图2a空白区)形变运动. 图3为GPS实测结果减去模拟结果的残差, 包括加载区和模拟计算区的结果. 根据图3, 第一时段(汶川地震前)残差值普遍低于第二、三时段(汶川地震后), 而表1也显示第一时段各块体参数的误差、模型标准差亦低于后两时段. 这一方面是由于第一时段时间跨度明显长于后

表 1 川滇地区主要构造块体的运动参数

构造块体	时间	GPS测站数	欧拉极经度Lw(°)		欧拉极纬度Bw(°)		角速度Ww(°/Ma)		模型标准差(mm/a)
			数值	误差	数值	误差	数值	误差	
巴颜喀拉	1999~2007	33	-67.376	7.863	-30.623	11.263	0.355	0.082	1.386
	2009~2011	47	100.697	3.080	35.817	6.723	1.039	0.139	2.988
	2011~2013	53	99.663	2.965	35.761	6.630	0.764	0.101	2.329
川北	1999~2007	25	-82.913	1.158	-26.532	3.243	0.954	0.072	0.862
	2009~2011	38	-87.216	4.790	-22.489	14.205	0.406	0.144	2.668
	2011~2013	36	-88.774	5.103	-22.154	15.360	0.396	0.153	2.859
滇中	1999~2007	38	-118.170	56.066	-5.984	55.834	0.081	0.136	1.500
	2009~2011	59	157.074	132.298	24.843	64.273	0.073	0.075	2.410
	2011~2013	57	-91.906	8.476	-24.728	22.429	0.230	0.135	2.063
滇南	1999~2007	56	-86.568	3.559	-32.584	10.251	0.359	0.085	1.513
	2009~2011	73	-86.395	3.091	-31.369	8.682	0.362	0.075	2.298
	2011~2013	60	-97.273	10.263	-38.875	24.769	0.203	0.101	2.616
滇东	1999~2007	41	97.404	3.640	27.029	7.770	0.519	0.092	0.993
	2009~2011	76	99.920	5.382	26.075	10.701	0.684	0.175	2.079
	2011~2013	77	96.975	4.724	24.580	10.314	0.614	0.135	2.119
藏东	1999~2007	9	-82.481	0.8613	-27.5853	2.466	1.871	0.1138	1.4639
	2009~2011	19	-82.267	1.2891	-28.1737	3.762	1.592	0.1449	3.1137
	2011~2013	14	3.583	0.2575	-27.702	1.793	-14.504	0.9732	1.4071

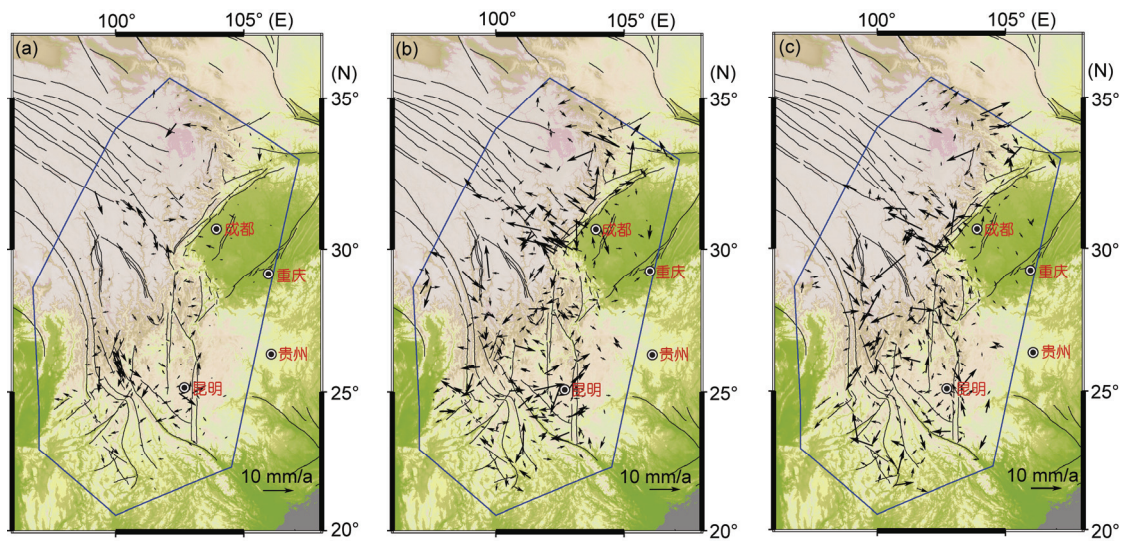


图3 GPS 结果与模拟结果的残差分布

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

两个时段, GPS结果更为稳定; 另一方面则反映出汶川地震前块体运动的整体性、区域应力、应变场的一致性均较好, 而震后块体之间及块体内部均经历显著调整, 某些局部明显偏离块体运动总趋势. 从残差的空间分布看, 第二时段龙门山断裂带附近的残差较大, 断层两侧呈“对冲”形态, 显示汶川地震后2~3年震区附近变形仍然较大, 但这些变形应该源自震后余滑或弛豫过程, 不属于块体运动范畴. 第三时段龙门山南段的残差值较大, 该时段GPS数据已剔除芦山同震位移但包含了地震后约4个月的观测数据, 故推测芦山地震后短时间内震源区变形较大, 亦不属于块体整体运动. 除上述局域外, 三个时段残差均呈无序分布, 且大部分残差值显著低于GPS实测值. 显示利用GPS数据得到的各块体运动参数是恰当的、“块体加载”方法基本反映了边界断裂带形变运动的动力条件. 仍需指出的是三时段均含一定数量残差较大测点, 推测这些实测值可能受观测条件或局部构造的影响.

4 三个时段主要断裂带运动速率与应力分布模拟结果

4.1 三个时段主要断裂带的运动速率

根据图4, 龙门山断裂带(本文模型用两条断裂

表示, 后山断裂与中央断裂合并为一条, 位于西侧, 前山断裂为另一条, 位于东侧)第一时段总体呈微弱的压性和右旋, 最大速率合计分别为1.55和1.79 mm/a, 其中后山、中央断裂挤压速率0.012~0.808 mm/a, 前山断裂带挤压速率0.019~0.738 mm/a, 后山、中央断裂带南段右旋速率为0.016~1.485 mm/a, 北段左旋速率为-0.064~-0.606 mm/a, 前山断裂带右旋速率为0.086~0.308 mm/a. 第二时段呈压性、右旋, 右旋速率合计1.954~8.034 mm/a, 挤压速率合计1.628~3.816 mm/a. 第三时段速率略低于第二时段, 右旋速率合计1.327~5.790 mm/a, 挤压速率合计1.477~2.677 mm/a.

由鲜水河、安宁河、则木河、大凉山、小江断裂带等构成的弧形构造带是菱形块体北、东边界. 模拟显示第一时段均为左旋, 鲜水河断裂带北中段左旋速度最高, 为-7.027~-7.340 mm/a, 其次是鲜水河断裂带南段康定附近和则木河断裂带北中段, 分别为-6.253~-6.709和-6.097~-6.761 mm/a. 安宁河断裂带左旋速率为-4.802~-6.337 mm/a, 小江断裂带左旋速率为-3.722~-5.586 mm/a, 大凉山断裂带左旋速率为-1.242~-2.741 mm/a. 鲜水河南段和小江断裂带北段的拉张速率分别为-3.624~-5.006和-2.411~-4.699 mm/a, 安宁河、则木河、小江断裂带南段拉张速率均较低, 为-0.040~-1.057 mm/a, 大凉山断裂带为挤压

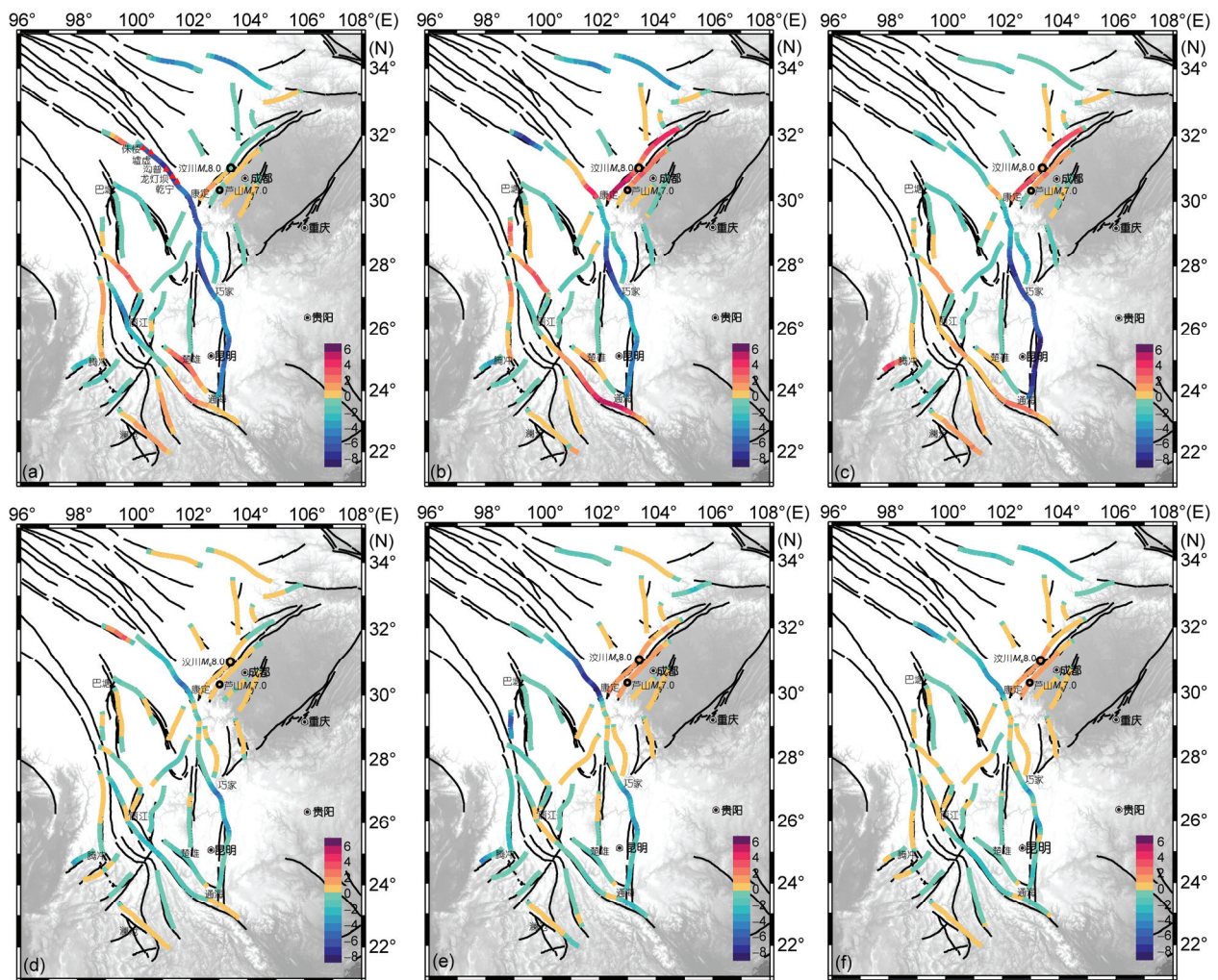


图4 主要断裂带水平运动速率

(a) 1999~2007 年走滑速率; (b) 2009~2011 年走滑速率; (c) 2011~2013 年走滑速率; (d) 1999~2007 年张压速率; (e) 2009~2011 年张压速率; (f) 2011~2013 年张压速率. 走滑速率以右旋为正; 张压速率以压为正. 单位: mm/a

运动, 速率为 $0.057\sim0.168\text{mm/a}$. 相比第一时段, 第二、三时段鲜水河、小江断裂带速率变化最突出, 第二时段鲜水河断裂带中段拉张速率增大且发生反向运动, 右旋、拉张速率最高分别为 $4.771\sim3.584$ 和 $-6.363\sim-8.407\text{mm/a}$, 第三时段鲜水河断裂带仅局部仍存在右旋走滑, 速率为 $0.396\sim1.164\text{mm/a}$, 其余恢复左旋, 拉张速率恢复至第一时段水平, 即 $-3.308\sim-3.959\text{mm/a}$. 第二时段小江断裂带走滑速率略有减小但第三时段明显增大, 第二、三时段拉张速率逐步减小甚至出现局部挤压, 两时段走滑速率分别为 $-2.514\sim-4.388$ 和 $-5.578\sim-8.551\text{mm/a}$, 张压速率分别为 $-1.582\sim-4.144$ 和 $-3.202\sim0.01\text{mm/a}$.

为进一步考证模拟结果显示的鲜水河断裂带第二、三时段的反向运动, 本文收集到沿线侏倭、格篭、虚墟、沟普、龙灯坝、乾宁等6处跨断层短基线观测1985年1月至2014年3月数据(场地位位置见图4a红色三角), 按薄万举等(1998)计算方法, 以1985年为起始点计算断层水平扭错、张压累积量见图5, 曲线斜率为正分别表示右旋、张性运动. 格篭场地尽管在汶川震后记录到大幅反向变化, 但考虑其观测条件发生变化予以舍弃. 根据图5水平扭错曲线, 1985年至汶川地震前侏倭、虚墟、沟普、龙灯坝呈较平稳的左旋, 老乾宁虽以左旋为主但从2001年起变化较大, 交替出现右旋、左旋. 汶川地震后至芦山地震前, 除沟普场

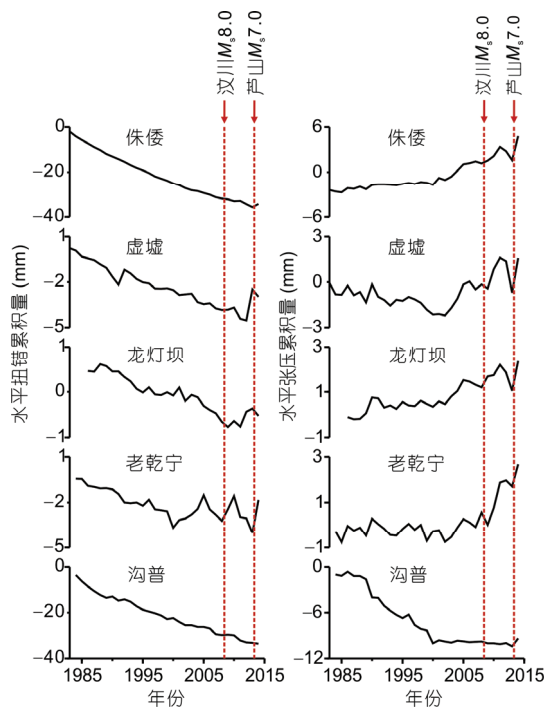


图5 1985~2014年鲜水河断裂带跨断层短基线观测的水平扭错、张压累积量

地保持原有态势以外,其余场地均记录到明显的右旋运动,即曲线反向变化.根据图5水平张压曲线,2001年以前各场地呈压性或张压活动不显著,2001年至汶川地震以前则以张性运动为主,汶川地震后至芦山地震前,除沟普场地以外其余场地均记录到快速拉张、挤压交替变化过程.上述结果显示的断裂带在汶川地震后由左旋转为右旋、快速拉张与挤压交替的特征与模拟结果较一致.

红河断裂带为菱形块体南边界,模拟显示该断裂带总体呈弱张性运动,只有局部为弱挤压,三个时段的拉张速率比较接近,为 $-0.335\sim-2.874\text{mm/a}$,但走滑速率差异较大,第一时段北段左旋、中南段右旋,速率分别为 $-0.104\sim-2.826$ 和 $0.141\sim2.167\text{mm/a}$.第二时段为右旋运动且南强北弱,南段速率最高达 $4.684\sim5.136\text{mm/a}$.第三时段右旋速率明显下降,南段速率降至 $1.909\sim2.856\text{mm/a}$.位于红河断裂带北侧的南华-楚雄-建水断裂带三个时段总体以右旋、拉张为主,但运动速率逐步减小,右旋速率依次为 $0.556\sim3.061$ 、 $0.139\sim1.389$ 和 $0.388\sim0.626\text{mm/a}$,拉张速率依次为 $-0.232\sim-1.883$ 、 $-0.106\sim-1.272$ 和 $-0.149\sim$

-0.912mm/a .丽江-小金河断裂带是川北、滇中块体的分界带,模拟显示第一时段左旋、拉张,速率分别为 $-0.092\sim-0.898$ 和 $-0.007\sim-1.574\text{mm/a}$.第二时段为左旋、挤压,速率分别为 $-0.03\sim-1.669$ 和 $0.061\sim0.433\text{mm/a}$.第三时段以左旋、挤压为主,速率分别为 $-0.77\sim-1.866$ 和 $0.775\sim0.738\text{mm/a}$,即左旋速率逐步增高并且由拉张转为挤压.

4.2 三个时段主要断裂带的应力分布

根据图6,第一时段龙门山后山、中央断裂剪应力北段为左旋,南段为右旋,剪应力分别为 $-2.82\sim-10.69$ 和 $4.42\sim68.97\text{Pa}$,挤压应力北段低南段高,为 $11.55\sim1371.43\text{Pa}$.前山断裂以右旋为主,为 $2.20\sim15.15\text{Pa}$,挤压应力南段高于北段,为 $8.39\sim1294.10\text{Pa}$.第二时段龙门山后山、中央和前山断裂带均呈右旋、挤压,并且应力值增高、向北扩展.后山、中央断裂的剪应力和压应力分别为 $85.14\sim250.00$ 和 $1737.55\sim3484.12\text{Pa}$,前山断裂分别为 $14.84\sim143.87$ 和 $1665.40\sim3394.42\text{Pa}$.第三时段右旋、挤压应力均有所降低,后山、中央断裂剪应力和压应力分别为 $52.06\sim171.62$ 和 $1470.74\sim2466.06\text{Pa}$,后山断裂分别为 $5.11\sim93.57$ 和 $1326.84\sim2431.42\text{Pa}$.

模拟显示菱形块体北、东边界非零应力即挤压应力主要出现于康定至巧家,涉及鲜水河南段、大凉山、安宁河、则木河断裂带,且挤压逐步增高、范围逐步向南扩展.上述断裂带第一时段左旋剪应力和压应力最高值分别为 ~-16.47 和 $\sim175.10\text{Pa}$.至第三时段左旋剪应力和压应力最高值分别达 ~-64.37 和 $\sim643.71\text{Pa}$.鲜水河北段、小江断裂带三个时段均以张性或纯剪切为主,即断层面接触应力为零.

红河断裂带、南华-楚雄-建水断裂带三个时段右旋、张性运动突出,仅红河断裂带北段与维西-巍山断裂带交汇部位和通海以南存在挤压形变,它们在第一时段右旋剪应力和压应力最高分别为 167.29 和 873.57Pa ,第二时段右旋剪应力和压应力最大值分别为 28.29 和 354.24Pa .第三时段红河断裂带通海附近左旋和挤压稍大,最大值分别为 -104.58 和 400.14Pa .丽江-小金河断裂带第一时段呈张性运动,第二、第三时段挤压应力逐步升高,并且南段高于北段,挤压应力最高值在第二、三时段分别为 981.52 和 1656.47Pa .剪切应力在第二、三时段均以左旋为主,最高值基本

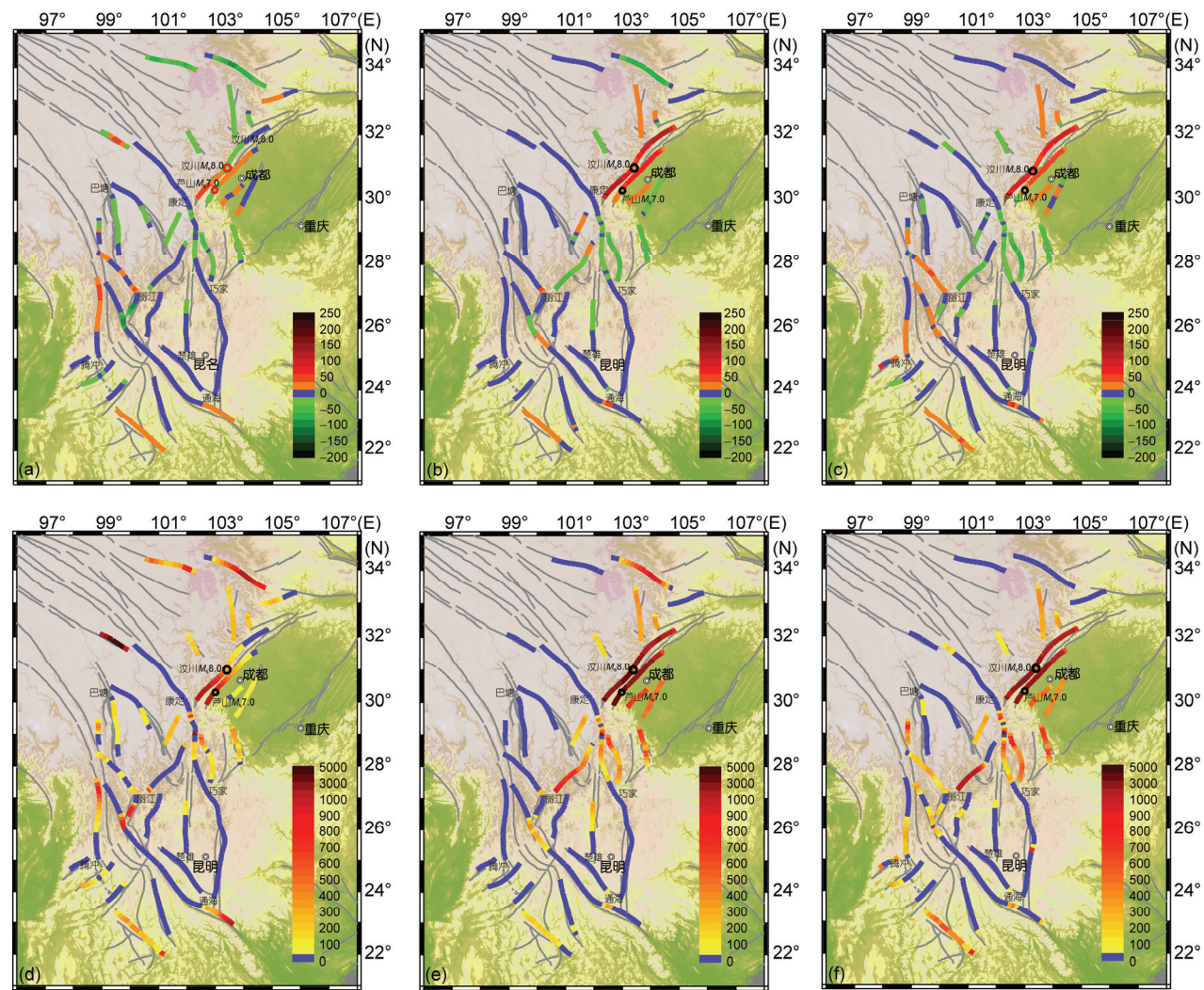


图 6 主要断裂带应力模拟结果

(a) 1999~2007 年剪应力; (b) 2009~2011 年剪应力; (c) 2011~2013 年剪应力; (d) 1999~2007 年正应力; (e) 2009~2011 年正应力; (f) 2011~2013 年正应力. 剪应力以右旋为正; 正应力以压为正. 单位 Pa

持平, 分别为96.32和89.02Pa, 但高值范围逐步由中部扩展至断层中部.

5 模拟结果揭示的汶川地震前后块体运动及相互作用的变化

根据模拟结果, 汶川地震前(第一时段)、后(第二、三时段)研究区主要断裂带的运动速率、应力积累变化显著, 从加载过程看显然与强震前后块体相对运动的变化有关.

第一时段主要断裂带运动速率与现有形变监测、

地质研究一致性较好. (1) 龙门山断裂带: 模拟显示为挤压、右旋, 总的水平错动量不超过2.2mm/a. 周荣军等(2000)给出全新世水平和垂直速率分别为1.5~2和1.1mm/a. 杜方等(2009)依据汶川地震前水准和GPS观测得到右旋和挤压速率均低于1.0mm/a. 王阎昭等(2008)利用1999~2004年GPS数据反演给出左旋和挤压速率分别为-0.5和1.1mm/a. 模拟结果与现有的形变监测、地质研究基本一致. (2) 鲜水河、安宁河、则木河、大凉山和小江断裂带: 张培震(2008)综合各类地质数据给出上述断裂带左旋走滑速率依次为-9~-11、-3.8~-6.2、-6.7、-2.6~-3.6和-8~-9mm/a,

垂向速率数倍低于走滑速率, 只有弧形构造带向东北方向突出部位(安宁河、则木河、大凉山和盐津-马边断裂带及邻区)出现少量挤压逆冲构造. 不同文献给出的基于GPS数据的位错反演结果差异较大, 如王阎昭等(2008)给出的左旋速率依次为 $-11.2 \sim -15.6$ 、 -5.1 、 -2.8 、 -7.1 和 -9.4 mm/a , 挤压或拉张速率依次为 $2.7 \sim 7.8$ 、 0.1 、 -3.8 、 -0.4 和 -1.5 mm/a . 程佳等(2012)给出的左旋速率依次为 $-9.8 \sim -12.9$ 、 -6.7 、 -6.7 、 $-3.8 \sim -4.2$ 和 $-10.4 \sim -10.9 \text{ mm/a}$, 挤压或拉张速率依次为 $0 \sim 1.2$ 、 0.8 、 -2.2 、 $0.7 \sim 1.4$ 和 $-0.4 \sim -0.9 \text{ mm/a}$. 本文模拟显示上述断裂带均为左旋运动, 除鲜水河断裂带南段、安宁河断裂带北段和大凉山断裂带呈微弱挤压以外, 其余均为纯剪切或带有少量拉张分量, 与地质研究(张培震, 2008)一致, 走滑速率模拟值也与地质结果基本一致, 但鲜水河、小江断裂带的速度略低. (3) 丽江-小金河断裂带: 徐锡伟等(2003)给出其晚第四纪左旋走滑和逆冲速率分别 ~ -3.8 和 $\sim 0.65 \text{ mm/a}$. GPS位错反演则显示其左旋速率更低且张、压兼具. 如王阎昭等(2008)给出断裂带北、中和南段左旋速率分别为 -0.8 、 -5.4 和 -0.5 mm/a , 张压速率分别为 -2.4 、 0.5 和 2.3 mm/a ; 程佳等(2012)给出左旋速率分别为 -1.2 、 -0.8 和 -0.5 mm/a , 张压速率分别为 0.7 、 -0.2 和 -0.5 mm/a . 本文模拟显示该断裂为左旋、张性, 总的错动速率低于 1.8 mm/a , 与GPS位错反演比较一致. (4) 红河断裂带: 虢顺民等(虢顺民等, 2001; 云南省地震局, 1998)指出全新世断裂带北段为右旋逆断活动, 南段为右旋正断活动, 右旋速率分别为 ~ 3.5 和 $\sim 3.3 \text{ mm/a}$. GPS位错反演给出的结果差异较大, 如王阎昭等(2008)给出断裂带北、中和南段分别为右旋压性、右旋张性和左旋压性, 走滑和张压速率均较低, 在 $0.3 \sim 1.5 \text{ mm/a}$ 范围内. 程佳等(2012)显示为右旋挤压, 速率分别为 $2.2 \sim 2.9$ 和 $-0.3 \sim -1.3 \text{ mm/a}$, 与地质研究接近, 但应指出该反演计算未考虑北侧的南华-建水-楚雄断裂带, 而该破裂带地震活动突出, 有研究认为可作为晚更新世以来活动的川滇菱形地块西南边界(向宏发等, 2000). 本文模拟为弱张性且左、右旋兼有, 速率显著低于地质结果, 与王阎昭等(2008)接近.

第二、三时段断裂带速率发生如下变化: (1) 龙门山断裂带右旋和挤压速率显著增强, 最大值分别为第一时段的4.5和2.1倍; (2) 鲜水河断裂带第二时

段断裂带中段张性运动增强且由左旋转为右旋, 第三时段恢复左旋但未达到原有运动速率; (3) 小江断裂带第三时段断裂带中南段左旋速率显著增大, 最高值分别是第一、第二时段的1.53和1.95倍, 局部区段由弱张性变为挤压运动; (4) 丽江-小金河断裂带第二时段左旋速率增大至前一时段的1.8倍, 由拉张改为挤压运动, 第三时段左旋、挤压速率进一步增强. (5) 红河断裂带第二时段断裂带中南段右旋速率显著增大, 最高值为第一时段的2.37倍, 第三时段速率有所下降, 但仍为第一时段的1.3倍.

研究区主要断裂带强震前后的速率变化映射出巴颜喀拉、滇中、川北、滇东等构造块体的相对运动发生变化. (1) 第一时段大部分断裂带的错动性质、速率与地质数据较为一致, 表明汶川地震前较长时期内各块体运动相对稳定且具有历史继承性, 与边界断裂带运动相互协调. 其中模拟结果、GPS位错反演和地质研究均显示龙门山断裂带错动量很小既受孕震期间断层局部闭锁的影响, 亦与其震间形变量较小、强震复发周期长有关. 但需引起注意的是本文结果和已有GPS位错反演均显示丽江-小金河、红河断裂带在汶川地震前保持低速运动, 张压均不突出, 与地质结果有差异. 作者认为随着汶川地震临近, 受发震断层闭锁以及区域挤压应力逐步增高的影响, 巴颜喀拉、川北块体向E-ES移动的阻力逐步增大, 使川北与滇中块体相对运动不突出, 导致丽江-小金河断裂带呈低速运动且逆冲运动不显著. 红河断裂带的低速运动则更为复杂, 一方面可能是滇西南与菱形块体相对运动与相互作用并非一成不变, 导致红河断裂带与其北侧的南华-楚雄-建水断裂带“交替”活动, 而目前红河断裂带正处于构造活动逐渐衰弱时期; 另一方面也不排除其受断层局部闭锁的影响, 即正处于强震孕育阶段. (2) 第二、三时段模拟显示鲜水河断裂带呈短期反向运动, 小江、丽江-小金河和红河断裂带速率明显增大, 表明汶川地震巨大能量释放以及断层破裂解锁、震后余滑有利于高原物质E-ES向逃逸, 尤其是引发深部物质运移加快, 导致各块体相对运动经历重大调整. 其中对块体的影响首当其冲, 促使其短期内向E移动增速并超过南侧的川北块体, 使鲜水河断裂带由震前的左旋错动变为右旋. 川北块体向ES移动加快则导致其与滇中块体的相对运动增强, 造成衔接两个块体的丽江-小金河断裂带逆

冲、左旋加剧. 滇中块体相对华南块体运动加速使得小江断裂带中南段左旋增速且局部由张性变为压性运动. 滇中、滇西南块体在红河断裂带两侧的运动方向不一致, 后者移动方向更偏南, 两块体加速移动则导致红河断裂带右旋增速.

断层面挤压应力变化(图6d-f)揭示出汶川地震前、后各块体相互作用的变化. (1) 第一时段龙门山断裂带的挤压应力为全区最高, 且南段高于北段, 两侧的新津-德阳、龙泉山西缘、虎牙、岷江、马尔康断裂等亦呈挤压状态, 反映汶川地震前巴颜喀拉块体向E移动受阻, 边界带及附近区域挤压应力快速积累. 第二、三时段龙门山断裂带挤压应力大幅提高, 该应力积累与第一时段有本质区别, 主要反映强震后断裂带运动速率显著增大, 巴颜喀拉块体向东移动加速、与四川盆地的相对运动加剧. 该运动态势有利于芦山地震的发生. (2) 汶川地震前巴颜喀拉块体内部及东侧、川北块体西部、川滇东界康定至巧家之间断层挤压应力持续积累. 汶川地震后沿龙门山断裂带向西南横跨川滇块体中部至腾冲、康定至巧家之间断层挤压应力显著增强, 其中龙门山断裂带第二、三时段挤压应力最高值为第一时段的2.5~2.6倍. 丽江-小金河断裂带第三时段挤压应力为第二时段1.68倍. 安宁河、则木河、大凉山断裂带第三时段挤压应力最高值为第一时段3.67倍. 断裂带挤压应力的空间变化格局揭示汶川震后挤压应力逐步由川北、巴颜喀拉块体向滇中块体传递, 川北块体与滇中块体、菱形块体与滇东块体相互作用明显增强. 这一应力传递过程应是高原物质加速向SE-SSE逃逸的结果.

6 汶川地震前后断裂带运动、应力变化与地震活动的关联性

川滇地区中强地震主要发生于块体边界, 破裂样式与两侧块体的作用方式密切相关, 而另一方面强震事件或可促使块体运动经历重大调整. 这一动态的相互作用过程能否从后继地震的空间迁移中有所揭示呢? 本文开始即提到, 汶川地震后, 截至2015年1月川滇地区已发生1次7级地震和6次6.0~6.9级地震, 其中4次发生于2014年, 显示该区进入新一轮地震活跃. 图7为该区1980年1月至2014年12月中强地震分布, 结合上文主要断裂带运动、应力变化模拟结

果(图4、图6), 两者存在如下关联:

(1) 根据图7, 1980~1999年川滇地区6级以上地震共22次, 最大为1996年2月3日丽江M7.0地震, 零散分布于巴颜喀拉、滇西南、菱形块体内部和边界附近. 1999~2008年汶川震前(对应模拟计算第一时段)6级以上地震共6次, 最大为2000年1月5日云南姚安M6.5地震, 其中5次位于沿龙门山断裂带向西南延伸的黄色条带内, 同期5~5.9级地震则零散分布于全区. 汶川地震后至2014年(对应模拟计算第二、三时段)6级以上地震共7次, 最大为芦山M7.0地震, 其中6次位于图7的黄色条带内, 同期大部分5~5.9级地震亦位于黄色条带内. 上述地震活动显示1999以来中强地震“逐步迁移”至横跨研究区中部沿北东方向展布的宽阔条带上, 且这一趋势在汶川地震后更为明显, 2008年8月1日攀枝花M6.1、2009年7月9日姚安M6.3和2014年8月3日鲁甸M6.5地震勾勒出条带的东边界, 2014年11月22日康定M6.3地震位于条带的西边界. 同时, 条带中部康定至巧家之间形成如图中黑色虚线圈所示的地震“围空”, 中国地震局台网数据显示, 汶川地震后该围空区西南边缘的木里、盐源一带小震震群异常活跃.

本文模拟给出的汶川地震前后断裂带挤压应力分布具有与上述中强地震迁移类似的特点. 图6d显示汶川地震前位于巴颜喀拉北、东边界和菱形块体西边界、东边界的东昆仑、光盖山-迭山、岷江、龙门山、大凉山、定曲河、怒江断裂北段等挤压应力增大. 图6e、f显示汶川地震后龙门山、岷江、新津-德阳、龙泉山西缘、安宁河、则木河、大凉山、丽江-小金河、德钦-中甸、怒江断裂带南段等挤压应力逐步增强, 即沿川滇块体中部形成一条北东走向的挤压应力增强区. 由此可见近期中强地震活动与其所处区域挤压应力增强密切相关. 此外模拟结果显示汶川地震前菱形块体东界的鲜水河南段、安宁河、大凉山、马边-盐津断裂带挤压应力增强, 汶川地震后其挤压应力增强更突出且扩展至更多断裂带, 包括则木河、丽江-小金河断裂带等. 该构造部位挤压应力持续、大幅度增强可导致断层滑动减弱甚至局部闭锁, 与图7中康定至巧家之间围绕上述断裂带形成的地震围空相吻合. 需指出的是, 挤压应力持续累积对于孕育更强烈的地震是有利的, 2014年发生于地震围空边缘的鲁甸M6.5和康定M6.4级地震可能预示该区域强震危

险正在迫近.

(2) 根据图7, 汶川地震后鲜水河断裂带炉霍和道孚附近发生两次5级地震, 即2010年4月28日道孚 $M_{5.0}$ 和2011年炉霍 $M_{5.4}$ 地震. 本文模拟显示汶川地震后鲜水河断裂带拉张运动明显增强且发生反向错动(图4a~f), 1999~2007年呈左旋, 2009~2011年断裂带中段呈右旋, 2011~2013年大部分区段恢复左旋但错动速率仍低于汶川地震之前. 本文认为上述速率变化与发生其上的5级地震可能有关.

(3) 模拟显示汶川地震前龙门山断裂带运动速率很低, 但挤压应力积累为全区最高, 且南段高于北段(图5a、d, 图6d). 与已有GPS、水准数据分析结果(杜方等, 2009; Wu等, 2015)一致. 可见长期低变形和挤压应力快速积累是汶川 $M_{8.0}$ 逆冲型强震前的主要特征. 芦山 $M_{7.0}$ 地震位于龙门山断裂带南段, 与汶川地震震中相距~90km, 发震间隔~5年. 万永革等(2009)和单斌等(2009)基于同震位错得到芦山地震位于汶川地震的库伦应力增强区. 单斌等(2013)进而指出汶川地震的黏弹松弛效应虽使芦山震区应力有所增加, 但量值不大. 本文第二、三时段模拟结果不包

含汶川同震位移, 并在提取块体运动参数的过程中剔除了部分震后蠕变、蠕滑信息, 主要反映汶川地震后巴颜喀拉、四川盆地相对运动对龙门山断裂带的影响. 从结果看, 汶川地震后龙门山断裂带挤压应力、右旋走滑速率均明显增加(图4b、c, 图6e、f), 反映两侧块体相对运动增强, 这对触发芦山地震是有利的.

7 结论

本文利用最新得到的川滇地区1999~2007、2009~2011和2011~2013年GPS复测结果, 基于二维有限元接触模型和“块体加载”计算, 模拟得到汶川地震前后主要断裂带即构造块体边界带的形变运动和应力分布, 结合地震活动分析两者的关联, 得到如下认识.

汶川地震前较长时期内, 研究区各块体运动相对稳定且具有历史继承性, 与边界断裂带形变运动相互协调, 区内主要断裂带的错动性质、速率与地质数据比较一致. 龙门山断裂带呈压性、右旋, 最大速率分别为1.55和1.79mm/a, 但挤压应力为全区最高, 年累积量最大~1371.43Pa, 且南段高于北段. 长期的低变形和挤压应力快速积累是汶川 $M_{8.0}$ 逆冲型强震的主要特征.

汶川地震后块体运动变化较大, 主要特征可归结为向E-SSE逃逸趋强, 致使区内主要断裂带运动与受力显著变化, 并与发生其上的中强地震密切相关: (1) 巴颜喀拉块体向东移动速度明显增大, 与四川盆地的相互作用增强, 导致龙门山断裂带右旋、挤压运动最高速率达8.034和3.816mm/a, 挤压应力年累积量最大~3484.12Pa, 分别是汶川地震前的4.5、2.1和2.5倍, 为之后发生的芦山 $M_{7.0}$ 地震提供了有利条件. (2) 巴颜喀拉块体东移增速在短时间内超过川北地块, 导致鲜水河断裂带拉张增强并发生短暂反向, 在此过程中相继发生道孚5.0和炉霍5.4级地震. (3) 菱形块体相对华南块体向SE-ESS运动增强、菱形块体内部的川北块体相对滇中块体运动增速. 前者导致菱形块体东边界弧形凸起部位的鲜水河南段、安宁河、则木河、大凉山断裂带挤压应力快速积累, 后者促使丽江-小金河断裂带挤压应力快速积累. 其中, 鲜水河南段、安宁河、则木河、大凉山断裂带挤压应力年累积量最高值由1999~2007年的~175.10Pa增加

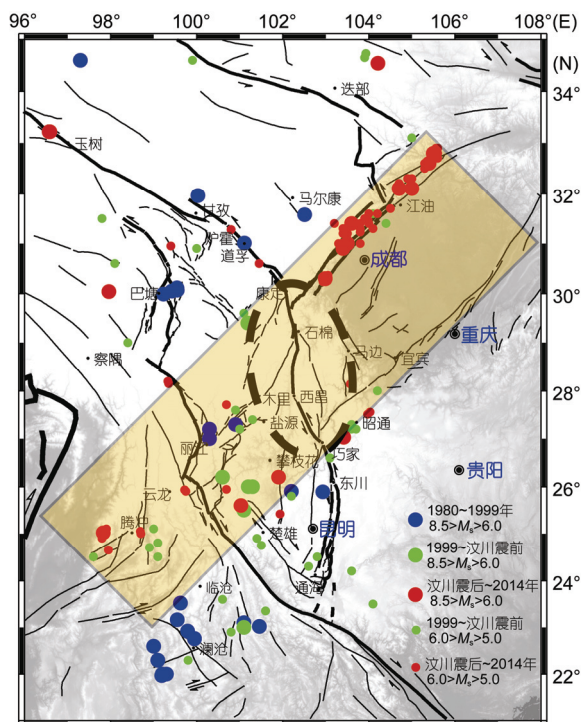


图7 川滇地区1980~2014年5级以上地震分布
橙色区为1999~2014年地震活动相对集中区

至2011~2013年的~643.71Pa。丽江-小金河断裂带1999~2007年挤压不突出, 2009~2011年和2011~2013年挤压应力年积累量最高值分别为981.52和1656.47 Pa。上述断裂带与龙门山断裂带构成沿NE向展布的挤压应力增强带, 该带横跨菱形块体中部并延伸至腾冲, 同期5级以上地震主要分布于此, 即中强地震活动与所处区域挤压应力增强密切相关。

在沿NE向展布的挤压应力增强带中部康定至巧家之间存在地震围空, 揭示围空区内断层滑动持续减弱甚至闭锁。此外菱形块体相对华南块体运动增速还造成小江断裂带左旋运动增速, 1999~2007年为-3.722~-5.586mm/a, 2011~2013年为-5.578~-8.551 mm/a, 但汶川地震后未有中等以上地震发生。这些区域的潜在强震危险值得进一步研究。

8 结束语

本文重点研究强震前、后块体运动变化对边界带的影响及与地震活动的关联。需要指出的是, 地震孕育、发生的力学因素是复杂的, 尚需兼顾区域构造运动对边界带长期的应力作用、源自断层局部闭锁的震间应力积累以及强震对后继地震的触发等。然而囿于现阶段地质、层析成像、大地测量等数据积累以及区域地壳运动动力学过程的认识, 模拟真实应力场仍有很大困难, 相信随着研究深入能够有更好进展。此外在二维接触模型中, 垂直地面方向的断层错动受到限制导致逆冲速度容易被低估。如汶川、芦山地震显示破裂带逆冲分量高于走滑分量, 本文结果也显示震后龙门山断裂带挤压应力大幅增加且远高于剪切应力增量, 三个时段最大剪应力和挤压应力分别为250.0和3394.4Pa, 同时, 模拟结果显示汶川地震后龙门山断裂带右旋走滑、挤压速率最大值分别为8.0和3.8mm/a, 挤压速率可能被低估。可见在三维模型上实现模拟计算是下一步工作需要考虑的。

致谢 本文GPS、跨断层形变数据的收集整理和部分监测工作均由中国地震局第一监测中心野外监测部门完成。在本文修改过程中, 审稿老师在计算和结果论证等方面提出了许多中肯而颇具启发性的建议, 使作者收益良多。在此作者对中国地震局第一监测中心和审稿老师的辛勤工作表示衷心的感谢。

参考文献

- 薄万举, 谢觉民, 郭良迁. 1998. 八宝山断裂带形变分析与探讨. 地震, 18: 63-68
- 程佳, 徐锡伟, 甘卫军, 马文涛, 陈为寿, 张勇. 2012. 青藏高原东南缘地震活动与地壳运动所反映的块体特征及其动力来源. 地球物理学报, 55: 1198-1212
- 程万正, 刁桂苓, 吕弋培, 张永久, 李桂芳, 陈天长. 2003. 川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式. 地震地质, 25: 71-86
- 杜方, 闻学泽, 张培震, 王庆良. 2009. 2008年汶川8.0级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变. 地球物理学报, 52: 2729-2738
- 丁开华, 许才军, 邹荣, 胡友健. 2013. 利用GPS分析川滇地壳活动地块运动与应变模型. 武汉大学学报, 38: 822-827
- 虢顺民, 计凤诒, 向宏发. 2001. 红河活动断裂带. 北京: 地震出版社. 1-172
- 蒋锋云, 朱良玉, 王双绪, 张晓亮, 张希, 黄智, 郑申宝. 2013. 川滇地区地壳块体运动特征研究. 地震研究, 36: 263-268
- 阚荣举, 张四昌, 晏风桐, 俞林胜. 1977. 我国西南地球现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨. 地球物理学报, 20: 96-109
- 吕江宁, 沈正康, 王敏. 2003. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究. 地震地质, 25: 543-554
- 李坪, 汪良谋. 1975. 云南川西地区地震地质基本特征探讨. 地质科学, 4: 317-325
- 李延兴, 李金岭, 张静华, 郭良迁, 张中伏. 2007. 弹性板块运动模型研究进展. 地球物理学, 22: 1201-1208
- 刘峡, 马瑾, 占伟, 张风霜, 梁福逊, 傅容珊. 2013. 汶川地震前后山西断陷带的地壳运动. 大地测量与地球动力学, 33: 5-10
- 刘峡, 孙东颖, 马瑾, 吕健, 李爱荣, 梁福逊, 占伟. 2014. GPS揭示的龙门山断裂带现今形变与受力——与川滇地区其他断裂带的对比研究. 地球物理学报, 57: 1091-1100
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林. 2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征. 地球物理学报, 47: 805-811
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 刁法启. 2009. 2008年5月12日 M_w 7.9汶川地震导致的周边断层应力变化. 中国科学D辑, 39: 537-545
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 金笔凯, 刘成丽, 谢祖军, 徐厚泽. 2013. 2013年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与2008年汶川地震的关系. 中国科学: 地球科学, 43: 1002-1009
- 宋方敏, 汪一鹏, 俞维贤. 1998. 小江活动断裂带. 北京: 地震出版社. 209-232
- 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉, 吴建平, 楼海, 王飞. 2002. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. 地震学报, 24: 1-16
- 魏文薪, 江在森, 武艳强, 赵静. 2012. 利用GPS数据研究川滇块体东边界主要断裂带运动特性. 武汉大学学报, 37: 1041-1063
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 徐晓枫. 2009. 2008年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报, 31: 128-139
- 王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 王敏, 甘卫军, 乔学军, 孟国杰, 李铁明, 陶玮, 杨永林, 程佳, 李鹏. 2008. 基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 582-597

- 向宏发, 龔顺民, 徐锡伟, 张晚霞. 2000. 川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析. 地震地质, 22: 253–264
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 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: 地球科学, 33: 151–162
- 云南省地震局. 1998. 一九九六年丽江地震. 北京: 地震出版社. 188
- 赵静, 江在森, 武艳强, 刘晓霞, 魏文薪. 2011. 汶川地震前后川滇块体应变与断裂变形特征研究. 大地测量与地球动力学, 30: 30–34
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 冉永康. 2008. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 51: 1066–1073
- 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. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 1041–1056
- 周荣军, 李勇, Densomre A L, Michael A E. 2000. 晚第四纪以来青藏高原东缘构造变形的最新证据. 中国地震学会第8次学术讨论大会论文摘要集. 北京: 地震出版社. 56
- 朱守彪, 石耀霖. 2004. 用遗传有限单元法反演川滇下地壳流动对上地壳的拖曳作用. 地球物理学报, 47: 232–239
- 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 2006. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟. 地球物理学报, 49: 415–427
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, Niu Z J, Wang M, Wan Y G, Zhou D M, Cheng J. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. J Geophys Res, 112: B08416, doi: 10.1029/2005JB004120
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, Xiao G R, Liu J, Chen W T, Ding X G, Zhou D M. 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. J Geophys Res, 118: 1–11
- Liu M, Yang Y Q. 2003. Extensional collapse of the Tibetan Plateau: Results of three-dimensional finite element modeling. J Geophys Res, 108: 2361, doi: 10.1029/2002JB002248
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, Wang E, Chen Z L, Shen F, Liu Y P. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. Science, 276: 788–790
- Shen Z K, Lu J N, Wang M, Burgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. J Geophys Res, 110: B11409, doi: 10.1029/2004JB003421
- Wu Y Q, Jiang Z S, Zhao J, Liu X X, Wei W X, Liu Q, Li Q, Zou Z Y, Zhang L. 2015. Crustal deformation before the 2008 Wenchuan M_s 8.0 earthquake studied using GPS data. J Geodynam, 85: 11–23