

全国主要构造区 GPS 水平运动负位错反演 与应变积累特性*

张希, 郝明, 贾鹏, 崔笃信

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 利用 2009~2011 年全国 GPS 水平运动速度场资料, 借助负位错反演, 寻找新疆、青藏块体东北缘、川滇、华北地区主要活动断裂能量积累闭锁段, 研究其积累速率、闭锁深度、分区分段差异性, 及与强震孕育一发生的可能关系。结果表明: (1) 新疆天山地区应变积累速率最强, 平均闭锁深度也最深, 约 20.9 km。其次为川滇地区, 平均深度约 16.3 km。青藏块体东北缘存在一定程度应变积累, 平均深度约 15.7 km。华北地区应变积累最弱, 平均深度约 16.0 km; (2) 南天山西段、川滇交界东部、红河断裂中段至滇西、祁连山断裂带西段、西秦岭北缘断裂甘青交界段、晋冀蒙交界区近期能量积累相对显著。

关键词: GPS; 构造断裂; 负位错反演; 应变积累

中图分类号: P315.24

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)01-0001-08

0 引言

新疆天山、青藏块体东北缘、川滇、华北地区是我国大陆主要的构造运动与地震活动区域, GPS 站点分布也比较密集。本文利用其 2009~2011 年 GPS 水平运动速度场结果 (利用 GIMIT/GLOBK 软件对中国地壳运动观测网络与陆态网络工程 GPS 资料处理所得, 全国范围约 2 000 个站点, 已去掉运动方向或速率量值与周围站点差异过大的数个站点), 分区构建非震负位错模型, 借助反演研究我国大陆近期主要构造区活动断裂的应变积累特性、积累速率与其分段差异性、闭锁深度, 及与强震孕育一发生的可能关系。

1 地壳水平运动的非震负位错模型

Matsu'ura 负位错模型 (Matsu'ura *et al.*, 1986) 认为受现今地壳运动驱动下的各活动地块间的相对运动在地块边界处有可能受到阻碍。假设块体边界下部的塑性区可自由滑动, 其上部的弹脆性区却因摩擦阻力等因素限制了这种相对运动从而导致应力应变积聚, 则可认为这个弹脆性区是部

分锁定的。即视块体边界区域的地表位移为块体 (刚性假设) 平移减去边界上部 (由若干断层段构成, 每条断层段用 Okada (1985) 弹性均匀介质半空间的矩形位错模拟) 对块体相对运动的部分锁定在地表产生的位移。它具有联系块体与其边界断裂, 以寻求以块体边界负位错变形体现的、可能与强震孕育有关的高应变能积累闭锁段的研究和预报意义 (何玉梅, 姚振兴, 2002; 伍吉仓, 许才军, 2002; 张希等, 2003)。考虑到较大尺度区域地壳变形还应包含块体内部的变形, 张希等 (2005a, b; 2010) 探索建立块体弹性变形与边界负位错部分锁定的复合模型, 较刚性块体假设更符合地壳实际运动。

具体建模时, Matsu'ura 等 (1986)、伍吉仓和许才军 (2002)、何玉梅和姚振兴 (2002) 均采用若干弹性半空间的单一矩形位错模型来模拟块体边界的各段, 其中后两篇文献的研究范围都达到了数百、甚至上千公里。理论上球面分层位错模型更接近大尺度区域地壳运动实际, 但考虑到本文研究区 (即使部分区域如川滇地区) 块体及边界带 (多具有分段活动特性) 数量较多, 若位错模型太复杂实际求解非常困难, 故而在测点分布支持的情况下, 对边界带尽可能细划 (每条断层

* 收稿日期: 2012-11-16.

基金项目: 地震行业专项“GNSS 系列产品在监测预报中的应用”(201208006) 资助。

段作用范围有限, 仅两侧数十、至多百余公里, 可近似为平面) 较为可行。

若模型由 p 个块体和 q 个断层段组成, GPS 站点 (x_i, y_i) 位于第 j 个块体上。 V_{0x}^j, V_{0y}^j 为此块体质心 (x_0^j, y_0^j) E 向及 N 向平移量, $\varepsilon_x^j, \varepsilon_{xy}^j, \varepsilon_y^j, \omega^j$ 为在 Matsu'ura 负位错模型基础上借助 Taylor 展式增加的块体 (相对质心) 均匀应变分量 (即 x 向正应变、剪应变、 y 向正应变与旋转)。进而考虑到矩形位错产生的位移场可能存在 E 向、N 向平移 u_0^k, v_0^k 与旋转量 $\alpha^k (k = 1, \dots, q)$; 旋转中心为 (x_c^k, y_c^k) (顾国华, 1990)。借助 1985 年 Okada 矩形位错在地表产生的位移变化解析式, 第 i 个站点的水平运动观测方程可表示为

$$V_x^i + \gamma_x^i = V_{0x}^j + \varepsilon_x^j \Delta x + \varepsilon_{xy}^j \Delta y + \omega^j \Delta y - \sum_{k=1}^q F_x^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k), \quad (1)$$

$$V_y^i + \gamma_y^i = V_{0y}^j + \varepsilon_{xy}^j \Delta x + \varepsilon_y^j \Delta y - \omega^j \Delta x - \sum_{k=1}^q F_y^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k). \quad (2)$$

等式左边第 1、2 项分别为观测与改正值, $\Delta x = x_i - x_0^j, \Delta y = y_i - y_0^j$; 而 3 个未知参量 $\omega^j (= \omega^j - \sum_{k=1}^q \alpha^k)$ 、 $V_{0x}^j (= V_{0x}^j - \sum_{k=1}^q [u_0^k + (y_0^j - y_c^k) \alpha^k])$ 和 $V_{0y}^j (= V_{0y}^j - \sum_{k=1}^q [v_0^k - (x_0^j - x_c^k) \alpha^k])$ 参与反演 (因 $\omega^j, V_{0x}^j, V_{0y}^j, u_0^k, v_0^k$ 相对独立, 也为减少未知参量个数, 避免增加不确定性)。而 $D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k$ 分别为第 k 个断层段的锁定位错量、错动角、倾角及宽度 (假设断层延伸至地表, 并由地质资料已知断层轨迹, 以避免断层段起点、终点坐标作为参量反演在断层段交汇时导致的奇异问题)。

将 GPS 水平运动资料作为地表位移观测, 通过贝叶斯—最小二乘法 (Matsu'ura *et al*, 1986; 张希等, 2003, 2005a, b, 2010) 可以反演块体及其边界断层段的各项参数。先利用只有块体运动与应变参量的地壳运动模型根据最小二乘法则确定等式右边前 4 项 6 个参数的近似初值; 再通过块体运动参量初值、断裂附近站点观测值反映的块体间相对运动及边界断裂活动状况, 参考已知地质或地球物理成果确定断层参数初值。反演时加约束以保证锁定位错量在水平面上分别沿断层走向和法线方向的投影小于其两侧块体间相对运动量

在这两个方向的投影。并采用年均地震矩积累量 $M_0^k = \mu L^k W^k D^k$ 反映能量积累速率, 这里的 μ 为地壳的刚性系数 (取 $4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$), L^k 为断层长度。基于计算中扣除正好位于断裂及其延伸线上的观测站点及贝叶斯—最小二乘法的特性, 这样的反演过程较为稳定, 不会造成奇异问题。

2 负位错模型构建与断裂带地质信息

根据我国大陆主要构造区断裂发育及 GPS 站点分布情况, 笔者构建了图 1 所示 31 个块体的负位错模型, 相关断裂的地质背景与倾角、产状信息见表 1 (由马杏垣 (1989)、邓起东等 (2002) 地质资料, 以及基于 GIS 的地震预报分析系统 Mapsis 软件“中国断层.tab”与“中国断层_邓起东.tab”文件综合总结于表 1)。具体反演时: ① 断裂倾向与活动特性参考表 1。若表 1 给出了断裂倾角的取值范围, 原则上约束倾角在此范围内, 若在此范围内确实无法使拟合效果较好, 可适当放松几度 (规定小于 10°); 若未查到具体的倾角取值范围, 即约束倾向与表 1 一致、倾角 $40^\circ \sim 85^\circ$ 。② 因难查到断层深度或宽度的准确信息, 考虑到研究区以往发生的基本为浅源地震, $10 \sim 20 \text{ km}$ 震源深度相对居多, 结合倾角约束, 反演时约束断层宽度 60 km 以内, 分别在 $15, 25, 35 \text{ km}$ 取值通过试算粗略选取拟合效果相对较好的断层宽度初值。③ 大多数断层段反演所得左旋或右旋、逆断或正断特性与表 1 相符, 个别断层段不一致时, 以研究时段实测资料反映的块体间运动差异特征为准, 毕竟地质资料是长时间尺度的总体结果, 本文则反映近期地形变观测可能揭示的活动断裂应变积累特征。④ 因为块体内部均匀应变参数也在反演模型中, 如果其内站点分布密度差异太大, 所得应变量未必是想要的, 故对巴颜喀拉地块, 只取站点较密的东部进行计算 (图 1 中地块 3-1)。⑤ 理论上可以对全国数十个块体、断层段统一反演, 但鉴于每条断层段 4 个参数、每个块体 6 个参数, 实际应用时参数过多, 导致程序运行、参数调整很慢, 故本文对全国主要构造断裂区即新疆 (天山构造为主, 图 1 中块体 1-1 ~ 1-5)、青藏块体东北缘 (图 1 中块体 2-1 ~ 2-8)、川滇 (图 1 中块体 3-1 ~ 3-12)、华北地区 (图

1 中块体 4-1~4-6) 分别反演。即仅对地区内部的断裂段(两侧块体都属该地区)进行反演、地区间公共边界断裂不参与反演,因断层位错作用范围有限,块体变形只与该块体内部站点间相对差异运动有关,故分区反演与全国所有块体、断裂统一反演的效果是一致的,有对比分析意义。⑥川滇反演区外围发生 2010 年玉树 7.1 级, 2011 年缅甸 7.2 级地震,但震级不是很高,距其最近的

鲜水河与金沙江断裂、永德—龙陵与南汀河断裂,震中距 300 km 以上;2011 年日本 9 级巨震距华北反演区东缘 2 000 多公里,而同震影响在我国东北比较显著(杨少敏等, 2012),本文未反演发震断裂及巨震显著影响区,所用速度场未扣除同震位移,这样反演更可能反映两年里构造变形的实际情况,也可为以后与其它时段做动态对比、进而为推测大震影响时提供参考。

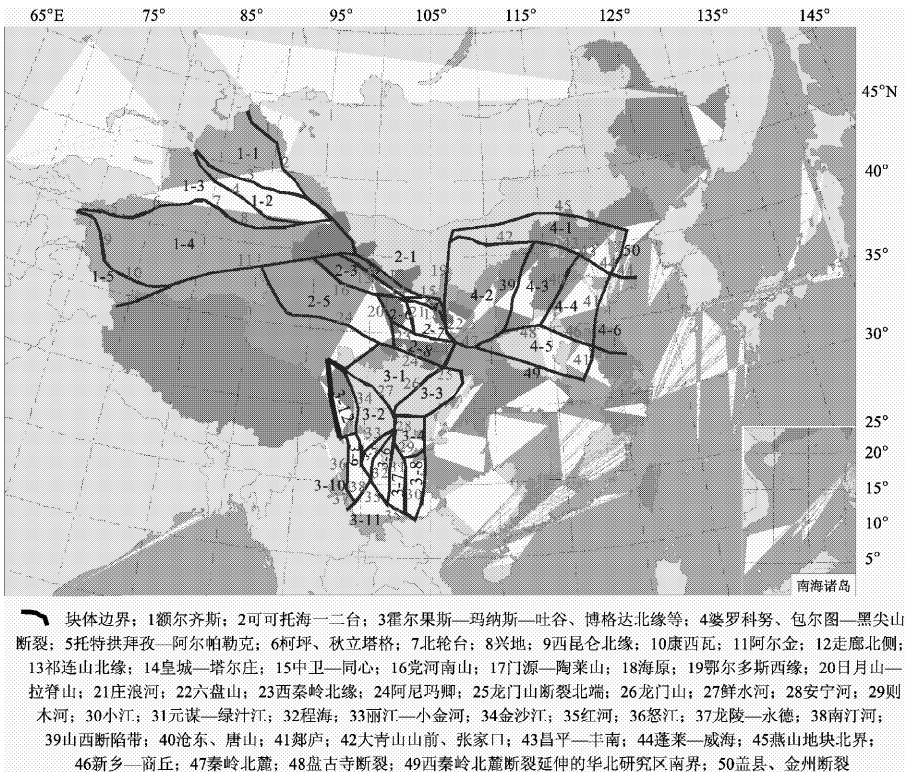


图 1 块体编号与边界、相关断裂名称(块体 1-1、1-3、1-5、2-1、3-10、3-11、4-6 包含中国大陆边界)

Fig. 1 Blocks numbering and the name of boundaries and related faults (Block 1-1、1-3、1-5、2-1、3-10、3-11、4-6 include boundary of China mainland)

3 我国大陆主要构造区负位错反演分析

3.1 新疆地区

对 2009~2011 年新疆地区速度场资料建立了 5 个块体、5 条断层段的负位错模型(西昆仑北缘与康西瓦断裂西南侧站点少或分布不均匀,不作为参数反演),反演结果、拟合效果见图 2、3 与表 2、3(拟合均方差 2.1 mm/a;模型理论与观测值之差的绝对值在 1 mm/a、2 mm/a、

3 mm/a 以下的站点数分别占站点总数的 68%、90%、96%)。逆断为主、兼弱左旋或右旋,断层活动特性及倾角与表 1 所示地质信息比较一致。块体变形显著的地块即天山地块(图 2、表 2 中块体 1-3);而应变能积累显著(反映积累速率的年均地震矩积累量 $15 \sim 25 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m/a}$ 、位错量 4.0~4.7 mm/a)段落为南天山西段(图 2 中 B₁B₂ 段)、北天山中东段与南天山中东段所在的稍大区域(2012 年 6 月 30 日和静—新源 6.6 级强震发生在该区边缘,见图 2 中绿色圆圈标注,有背景预测效能)。

表 1 研究区相关断裂带活动特性

Tab. 1 Activity features of the related fault belts in study area

断裂	特性	倾角/ (°)	断裂	特性	倾角/ (°)
额尔齐斯断裂	右旋逆断	NE80	柯坪断裂	逆断	NW50 ~ 53
可可托海—二台断裂	右旋	NEE68 ~ 70	秋立塔格断裂	左旋逆断	无信息
霍尔果斯—玛纳斯—吐谷断裂	逆断	N45	北轮台断裂	走滑逆断	无信息
博格达北缘断裂	逆断	S60 ~ 70	兴地断裂	右旋逆断	N60
巴里坤断裂	逆断	S60 ~ 70	西昆仑北缘断裂	走滑	SSW50 ~ 80
婆罗科努断裂	右旋逆断	SW50 ~ 60	康西瓦断裂	左旋逆断	N70 ~ 80
包尔图—黑尖山断裂	左旋	N70	阿尔金断裂	左旋	SSE80
托特拱拜孜—阿尔帕勒克	左旋逆断	N25 ~ 60	走廊北侧断裂	逆断	NNE
祁连山北缘断裂	左旋逆断	SSW	中卫—同心断裂	左旋	SW50 ~ 70
皇城—塔尔庄断裂	逆断走滑	无信息	门源—陶莱山断裂	逆断	NE
党河南山断裂	无信息	无信息	鄂尔多斯西缘	正断兼右旋	W
海原断裂	左旋	SW40 ~ 60	六盘山断裂	左旋逆断	SW
日月山—拉脊山断裂	右旋逆断	SW60 ~ 70	庄浪河断裂	右旋逆断	SW45 ~ 80
西秦岭北缘断裂	左旋逆断	SW40 ~ 80	程海断裂	左旋正断	W
阿尼玛卿断裂	左旋逆断	NNE55 ~ 85	丽江—小金河断裂	左旋正断	SE
龙门山（中央）断裂	逆断兼右旋	NW60 左右	红河断裂	右旋正断为主	NNE60 ~ 85
鲜水河断裂	左旋	NE50 ~ 80	金沙江断裂	右旋逆断	E60 左右
安宁河断裂	左旋逆断	E	南汀河断裂	左旋	NW80 ~ 90
则木河断裂	左旋逆断	NE50 ~ 70	龙陵—永德断裂	右旋	SW45 左右
小江断裂	正断左旋	E70 ~ 80	怒江断裂	逆断	W70 左右
元谋—绿汁江断裂	左旋逆断	E70 ~ 80	山西断陷带	正断为主兼右旋	NW/SE
唐山断裂	正断右旋	SE80	沧东断裂	正断	SE30 ~ 60
蓬莱—威海断裂	逆断走滑	N60 ~ 70	昌平—丰南断裂	左旋	无信息
秦岭北麓断裂	正断	N60 ~ 80	郯庐断裂（F1）	正断右旋	NWW70 ~ 80
大青山山前断裂	左旋正断	S70 左右	张家口断裂	正断	S60 左右

3.2 华北地区

对 2009 ~ 2011 年华北速度场建立了 6 个块体、11 条断层段的负位错模型，反演结果、拟合效果见图 2、3 与表 2、3（拟合均方差 2.6 mm/a；模型理论与观测值之差的绝对值在 1 mm/a、2 mm/a、3 mm/a 以下的站点数与站点总数之比分别为 57%、79%、89%）。断层活动特性与地质背景比较一致，其中晋冀蒙交界区附近（图 2 中 C₂D₁ 与 C₁C₂ 段）应变积累相对明显（年均地震矩积累量在 6 × 10¹⁷ N · m/a 以上，位错量 1.9 ~ 2.5 mm/a）、山西断陷带南端及与陕西交界的中条山北麓断裂次之（图 2 中 D₃D₄ 段，年均地震矩积累量 4 × 10¹⁷ N · m/a 以上，位错量 2 mm/a）。此外，汾渭断陷带中段（图 2 中 D₁ - D₂ - D₃ 段）积累偏弱、或出现与地质背景相反的逆断特性，可能与 2008 年汶川 8.0 级、2011 年日本 9.0 级巨震影响，或与 2009 ~ 2010 年该区及附近 4 级多地震活跃有一定关联。

3.3 青藏块体东北缘地区

对 2009 ~ 2011 年青藏块体东北缘地区速度场资料建立了 8 个块体、9 条断层段的负位错模型，反演结果、拟合效果见图 2、3 与表 2、3（拟合均方差 2.8 mm/a；模型理论与观测值之差的绝对值在 1 mm/a、2 mm/a、3 mm/a 以下的站点数与站点总数之比分别为 62%、82%、91%）。显著变形的地块有祁连山地块、西宁与甘南地块（图 2、表 2 中块体 2 - 3、2 - 6、2 - 8），甘南地块挤压量值在本区最强、靠近汶川震区，结合杨国华等（2012）研究结果，大震影响可能尚未结束。而本区断层活动特性与地质背景基本一致，祁连山断裂带西段、西秦岭北缘断裂的甘青交界段应变积累相对明显（图 2 中 F₁F₂、G₂G₄ 段，年均地震矩积累量 4 × 10¹⁷ Nm/a 以上、位错量 2 mm/a 以上）。

3.4 川滇地区

对 2009 ~ 2011 年川滇速度场资料建立了 12

个块体、18 条断层段的负位错模型，反演结果、拟合效果见图 2、3 与表 2、3（拟合均方差 3.2 mm/a；模型理论与观测值之差的绝对值在 1 mm/a、2 mm/a、3 mm/a 以下的站点数与站点总数之比分别为 49%、72%、86%）。变形显著的地块主要位于龙门山断裂东侧、金沙江断裂两侧（不排除玉树地震影响；结合贾鹏等的（2012）研究结果，汶川大震影响也未结束，发

震的龙门山断裂 H2 – H3 段近两年几乎不积聚能量）及滇西地区。断层活动特性与地质背景基本一致，其中，安宁河断裂应变积累居川滇之首，其次是红河断裂中段（图 2 中 I3I4、PN2 段，年均地震矩积累量 $5 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m/a}$ 以上、锁定位错量 3.2 ~ 4.3 mm/a）；龙门山断裂南端、则木河断裂、元谋—绿汁江断裂南段、小江断裂南段存在一定程度应变积累。

表 2 2009 ~ 2011 年我国大陆主要地块变形参数反演结果
Tab. 2 Inversing results of deformation parameters of main blocks from 2009 to 2011 in China Mainland

块体	最大剪应变率 ($10^{-8}/\text{a}$)	面膨胀应变率 ($10^{-8}/\text{a}$)	块体	最大剪应变率 ($10^{-8}/\text{a}$)	面膨胀应变率 ($10^{-8}/\text{a}$)	块体	最大剪应变率 ($10^{-8}/\text{a}$)	面膨胀应变率 ($10^{-8}/\text{a}$)
1-1	0.4	-0.6	2-7	1.9	-1.7	3-10	4.7	2.8
1-2	0.9	0.3	2-8	3.7	-2.9	3-11	2.7	0.5
1-3	2.4	-1.8	3-1	3.0	0.3	3-12	5.6	-3.2
1-4	1.2	-0.7	3-2	4.6	-1.1	4-1	2.2	-0.5
1-5	1.7	-1.4	3-3	3.1	-2.2	4-2	0.3	0.6
2-1	1.5	-2.0	3-4	3.4	-1.4	4-3	1.2	-0.9
2-2	1.7	0.2	3-5	6.7	7.9	4-4	0.3	-0.3
2-3	3.2	-2.0	3-6	2.2	2.7	4-5	1.5	-0.5
2-4	4.2	-1.1	3-7	5.5	1.1	4-6	0.8	0.8
2-5	2.1	-0.7	3-8	2.6	0.8			
2-6	11.0	0.4	3-9	3.1	3.2			

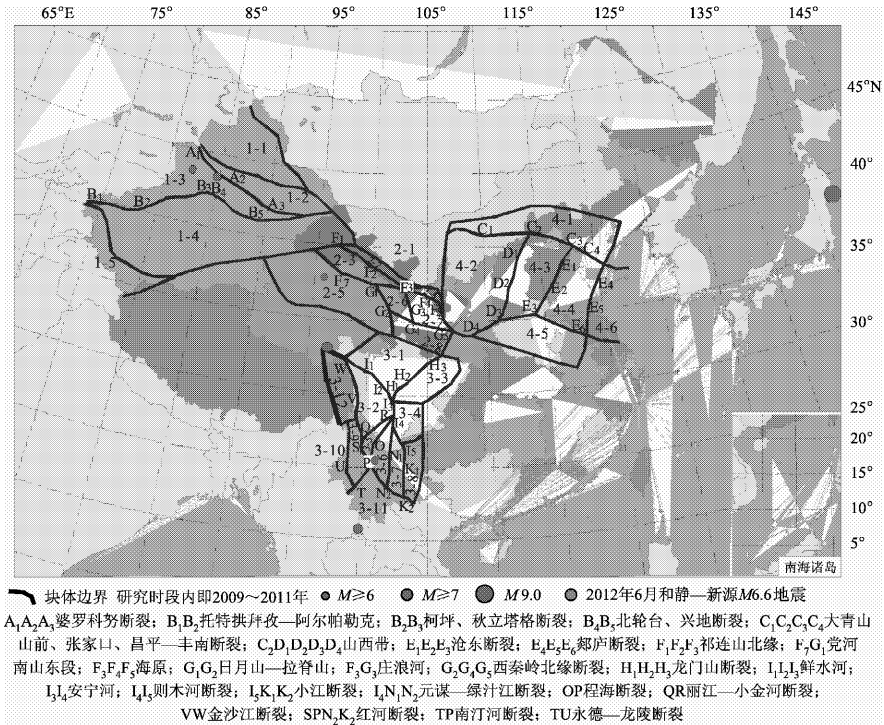


图 2 2009 ~ 2011 年我国大陆 GPS 速度场资料的负位错模型
Fig. 2 Model of negative dislocation for GPS velocity field from 2009 to 2011 in China Mainland

表 3 2009 ~ 2011 年我国大陆主要活动断裂锁定负位错参数反演结果

Tab. 3 Inversing results of locking negative dislocation parameters of main faults from 2009 to 2011 in China Mainland

断裂	分段	时段 /年	D /mm·a ⁻¹	λ /(°)	δ /(°)	W /km	h /km	L /km	$M_0/10^{17}$ N·m·a ⁻¹	锁定特性
北天山构造 婆罗科努断裂	A ₁ A ₂	2009 ~ 2011	2.1 ± 0.4	114.0 ± 10.2	SW55.7 ± 7.2	12.2 ± 0.2	10.1	315.9	3.2	逆断弱右旋
	A ₂ A ₃	2009 ~ 2011	4.7 ± 0.5	104.2 ± 4.8	SW50.5 ± 5.9	24.9 ± 1.4	19.2	329.5	15.0	逆断弱右旋
南天山构造托特拱 拜孜—阿尔帕勒克、 柯坪、秋立塔格、 北轮台、兴地断裂	B ₁ B ₂	2009 ~ 2011	4.4 ± 0.4	78.9 ± 3.8	N65.8 ± 7.4	26.9 ± 0.6	24.5	368.8	17.4	逆断弱左旋
	B ₂ B ₃	2009 ~ 2011	4.0 ± 0.5	50.7 ± 3.0	N62.0 ± 4.0	32.1 ± 0.2	28.3	479.8	25.0	逆断左旋
	B ₄ B ₅	2009 ~ 2011	4.1 ± 0.5	102.3 ± 7.6	N59.6 ± 9.0	26.2 ± 0.6	22.6	391.1	17.0	逆断弱右旋
大青山山前、张家口断裂	C ₁ C ₂	2009 ~ 2011	1.9 ± 0.4	289.7 ± 6.4	SE65.8 ± 3.4	23.5 ± 0.8	21.4	383.2	6.9	正断弱左旋
昌平—丰南断裂中西段	C ₂ C ₃	2009 ~ 2011	0.3 ± 0.1	288.1 ± 2.3	N62.9 ± 6.0	15.4 ± 0.9	13.7	239.7	0.4	几乎不锁定
昌平—丰南断裂东段	C ₃ C ₄	2009 ~ 2011	0.9 ± 0.3	312.5 ± 8.7	N68.2 ± 6.8	19.7 ± 0.9	18.3	87.3	0.6	弱左旋正断
山西断陷带 六棱山与恒山北麓 系舟山北麓断裂等 霍山山前断裂等 中条山北麓断裂等	C ₂ D ₁	2009 ~ 2011	2.5 ± 0.3	247.6 ± 10.2	NW72.7 ± 2.2	24.0 ± 0.8	22.9	252.9	6.2	正断弱右旋
	D ₁ D ₂	2009 ~ 2011	0.8 ± 0.3	253.4 ± 9.3	NW60.7 ± 3.3	13.6 ± 0.4	11.9	222.4	1.0	正断弱右旋
	D ₂ D ₃	2009 ~ 2011	1.8 ± 0.3	107.0 ± 9.6	NW74.8 ± 3.3	12.9 ± 0.3	12.4	245.8	2.3	逆断弱右旋
	D ₃ D ₄	2009 ~ 2011	2.0 ± 0.2	239.5 ± 9.2	NW72.4 ± 5.7	21.9 ± 0.8	20.9	247.9	4.3	正断右旋
沧东断裂	E ₁ E ₂	2009 ~ 2011	0.3 ± 0.1	252.4 ± 10.5	SE54.0 ± 7.7	14.7 ± 1.4	11.9	174.3	0.3	几乎不锁定
	E ₂ E ₃	2009 ~ 2011	1.3 ± 0.4	265.0 ± 2.3	SE54.9 ± 7.4	13.7 ± 0.8	11.2	146.8	1.1	正断为主
郟庐断裂	E ₄ E ₅	2009 ~ 2011	0.5 ± 0.3	249.8 ± 9.0	NWW71.8 ± 7.5	13.3 ± 0.8	12.6	220.9	0.6	正断弱右旋
	E ₅ E ₆	2009 ~ 2011	1.3 ± 0.7	244.7 ± 8.9	NWW76.0 ± 6.6	19.4 ± 1.8	18.8	204.9	2.1	正断弱右旋
祁连山北缘断裂为主(东 端为皇城—塔尔庄断裂)	F ₁ F ₂	2009 ~ 2011	2.4 ± 0.6	76.2 ± 7.9	SSW57.0 ± 7.0	14.0 ± 1.2	11.7	303.0	4.0	逆断弱左旋
	F ₂ F ₃	2009 ~ 2011	1.9 ± 0.6	71.7 ± 7.1	SSW69.3 ± 8.6	18.3 ± 1.4	17.1	285.3	4.0	逆断弱左旋
海原断裂	F ₃ F ₄	2009 ~ 2011	1.3 ± 0.2	37.1 ± 8.3	SW56.7 ± 9.5	14.9 ± 1.4	12.5	182.6	1.4	左旋弱逆断
	F ₄ F ₅	2009 ~ 2011	1.8 ± 0.3	38.6 ± 7.9	SW52.8 ± 7.9	20.2 ± 0.8	16.1	141.9	2.1	左旋弱逆断
党河南山断裂东段 (延伸至日月山断裂北端)	F ₇ G ₁	2009 ~ 2011	1.4 ± 0.6	65.0 ± 8.7	SW50.4 ± 8.2	22.7 ± 1.4	17.5	204.2	4.0	逆断弱左旋
日月山—拉脊山断裂	G ₁ G ₂	2009 ~ 2011	1.8 ± 0.6	141.2 ± 8.6	SW66.9 ± 5.1	17.9 ± 1.3	16.5	147.0	1.9	右旋逆断
庄浪河断裂	F ₃ G ₃	2009 ~ 2011	1.3 ± 0.7	131.9 ± 8.9	SW62.0 ± 9.2	13.6 ± 0.8	12.0	128.7	0.9	逆断右旋
西秦岭北缘断裂	G ₂ G ₄	2009 ~ 2011	2.9 ± 0.6	76.4 ± 5.5	SW66.7 ± 8.5	22.6 ± 1.1	20.8	204.4	5.4	逆断弱左旋
	G ₄ G ₅	2009 ~ 2011	1.4 ± 0.4	62.5 ± 8.7	SW58.6 ± 8.2	20.6 ± 1.3	17.6	319.0	3.7	逆断左旋
龙门山断裂	H ₂ H ₃	2009 ~ 2011	0.4 ± 0.2	124.4 ± 10.7	NW62.7 ± 8.8	15.7 ± 1.4	14.0	225.2	0.5	几乎不锁定
	H ₁ H ₂	2009 ~ 2011	2.6 ± 0.5	143.5 ± 8.8	NW55.5 ± 10.7	20.8 ± 1.5	17.1	140.5	3.0	右旋逆断
鲜水河断裂	I ₁ I ₂	2009 ~ 2011	1.9 ± 0.8	56.0 ± 6.8	NE70.5 ± 9.7	19.9 ± 1.1	18.8	144.6	2.2	左旋逆断
	I ₂ I ₃	2009 ~ 2011	1.3 ± 0.9	317.5 ± 10.8	NE63.0 ± 6.8	19.2 ± 0.3	17.1	163.3	1.5	左旋正断
安宁河断裂	I ₃ I ₄	2009 ~ 2011	4.3 ± 0.8	41.7 ± 9.3	E59.2 ± 8.9	19.9 ± 1.0	17.2	149.9	5.1	左旋逆断
则木河断裂	I ₄ I ₅	2009 ~ 2011	2.3 ± 0.7	318.6 ± 10.1	NE56.7 ± 9.3	20.0 ± 1.7	16.7	146.5	2.6	左旋正断
小江断裂	I ₅ K ₁	2009 ~ 2011	1.9 ± 0.2	314.3 ± 10.7	E73.7 ± 8.7	14.9 ± 1.2	14.3	164.0	1.7	左旋正断
	K ₁ K ₂	2009 ~ 2011	2.3 ± 0.6	35.5 ± 9.7	E71.6 ± 10.7	16.5 ± 2.0	15.7	177.3	2.7	左旋逆断
元谋—绿汁江断裂	I ₄ N ₁	2009 ~ 2011	1.2 ± 0.5	48.4 ± 10.9	E66.7 ± 10.1	16.2 ± 1.2	14.9	198.3	1.5	逆断左旋
	N ₁ N ₂	2009 ~ 2011	2.2 ± 0.8	37.1 ± 9.7	E70.7 ± 8.7	19.8 ± 1.9	18.7	172.9	3.0	左旋逆断
程海断裂	OP	2009 ~ 2011	0.7 ± 0.2	314.8 ± 10.0	W64.3 ± 9.9	17.7 ± 1.4	15.9	141.5	0.7	左旋正断
丽江—小金河断裂	QR	2009 ~ 2011	1.7 ± 0.8	107.7 ± 9.7	SE60.8 ± 10.1	14.6 ± 1.2	12.7	183.6	1.8	逆断为主
红河断裂	SP	2009 ~ 2011	1.1 ± 0.2	239.4 ± 8.8	NNE69.4 ± 9.9	16.6 ± 1.5	15.5	129.8	0.9	右旋正断
	PN ₂	2009 ~ 2011	3.2 ± 0.8	224.9 ± 10.7	NNE66.8 ± 9.7	21.8 ± 1.0	20.0	206.6	5.4	右旋正断
	N ₂ K ₂	2009 ~ 2011	0.7 ± 0.5	134.3 ± 9.6	NNE58.6 ± 9.7	17.8 ± 1.0	15.2	150.2	0.7	右旋逆断
南汀河断裂	TP	2009 ~ 2011	1.8 ± 0.8	41.0 ± 8.8	NW74.6 ± 10.1	19.0 ± 1.4	18.3	187.8	2.5	左旋逆断
龙陵—永德断裂	TU	2009 ~ 2011	1.7 ± 0.5	221.4 ± 10.0	SW52.8 ± 9.7	16.8 ± 1.6	13.4	118.8	1.2	右旋正断
金沙江断裂	VW	2009 ~ 2011	2.0 ± 0.8	139.9 ± 10.3	E64.5 ± 10.0	19.7 ± 1.0	17.8	191.6	3.0	右旋逆断

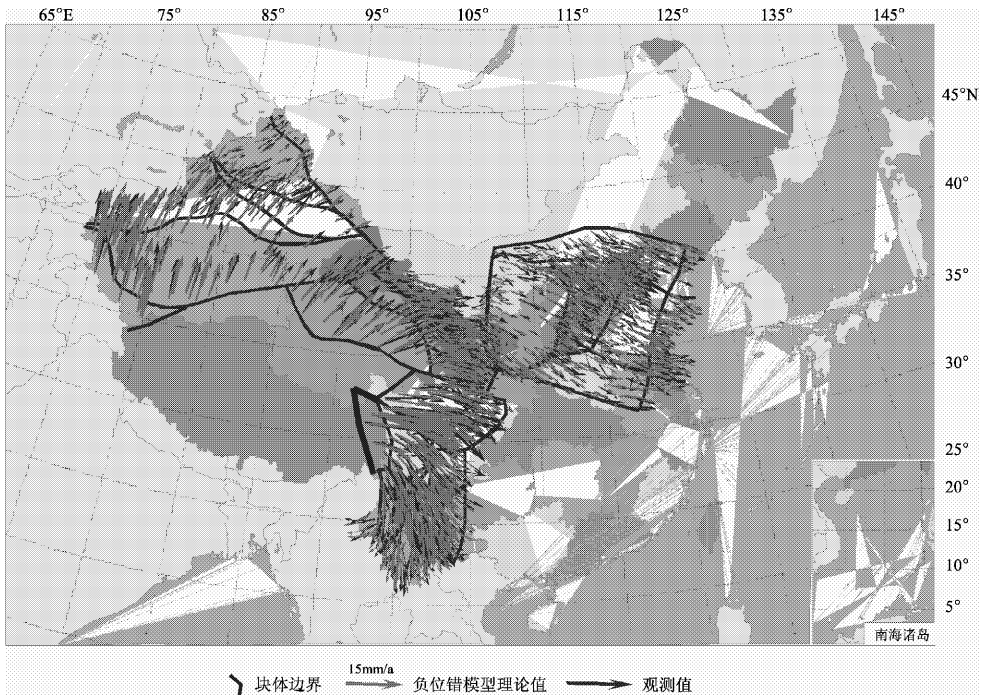


图 3 2009 ~ 2011 年 GPS 速度场(相对欧亚板块)资料的负位错拟合效果对比
Fig. 3 Simulation effect comparison of negative dislocation for GPS velocity field (related to Eurasia) from 2009 to 2011

4 结论与讨论

(1) 2009 ~ 2011 年新疆天山地区应变积累最强(位错量最弱为 2.1 mm/a, 80% 段落超过 4 mm/a, 平均 3.9 mm/a), 可能与近几年大震相对平静有关(对 2012 年 6 月 30 日天山中部 6.6 级强震孕育背景反映较好), 平均闭锁深度最深约 20.9 km; 其次为川滇地区, 位错量最高 4.3 mm/a, 但 61% 的段落位错量 2 mm/a 以下, 强弱差异明显, 平均 1.9 mm/a, 较天山地区低得多, 应与近几年测区内及周边强震尤其汶川 8.0 级和玉树 7.1 级等大震活跃、能量释放调整有关, 平均闭锁深度约 16.3 km。青藏块体东北缘存在一定程度应变积累(位错量最高近 3 mm/a, 78% 段落低于 2 mm/a, 平均 1.8 mm/a), 平均深度约 15.7 km。华北地区应变积累最弱(位错量最高仅 2.5 mm/a, 64% 段落不超过 1.3 mm/a, 平均 1.2 mm/a), 平均深度约 16.0 km。

(2) 4 个地区拟合均方差 2.1 ~ 3.2 mm/a、平均 2.7 mm/a (稍高于速度场基本 2 mm/a 以下的中误差值, 但差异不大, 鉴于大多数站点速率量值十几甚至数十毫米, 反演结果合理)。目前强震

孕育背景相对显著的构造区域有南天山西段、川滇交界东部(安宁河—则木河断裂尤其安宁河断裂)、红河断裂中段至滇西、祁连山断裂带西段、西秦岭北缘断裂甘青交界段、晋冀蒙交界, 及上述区域附近。

(3) 本文较以往时段负位错反演(张希等, 2003, 2005a, b, 2010) 多了新疆、华北全部 GPS 站点, 以及南北地震带陆态网络工程 GPS 站点, 速度场处理也非同一人完成, 故没有对比负位错具体量值变化, 仅反映近期应变积累特性与分区、分段相对差异。

(4) 本文所用速度场未扣除 2010 年玉树 7.1 级、2011 年缅甸 7.2 级和日本 9.0 级巨震同震位移, 这些地震距待反演且最近的鲜水河与金沙江断裂、永德—龙陵与南汀河断裂、郯庐断裂 300 多公里甚至 2 000 km 以上, 非发震构造, 作为负位错参数反演是为了以后与其它时段做动态对比分析时提供参考。

参考文献:

- 邓超东, 张培震, 冉勇康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑), 32(12): 1 020 - 1 030.
顾国华. 1990. 形变监测网的基准与形变模型反演[J]. 地壳形变与

- 地震,10(1):21-29.
- 何玉梅,姚振兴. 2002. 中国台湾南部及其周边岛屿现今地壳形变的位错模型[J]. 地球物理学报,45(5):638-645.
- 贾鹏,张希,张晓亮,等. 2012. 汶川地震前后川滇及其邻区 GPS 水平运动演化特征[J]. 西北地震学报,34(3):264-267.
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学图集[M]. 北京:中国地图出版社.
- 伍吉仓,许才军. 2002. 利用 GPS 资料反演华北块体运动的负位错模型参数[J]. 武汉大学学报信息科学版,27(4):352-357.
- 杨国华,杨博,占伟,等. 2012. GPS 资料反映大震前后青藏高原东北缘的水平形变[J]. 地震研究,35(3):295-302.
- 杨少敏,聂兆生,贾志革,等. 2011. GPS 解算的日本 $M_w 9.0$ 地震的远场同震地表位移[J]. 武汉大学学报信息科学版,36(11):1336-1339.
- 张希,江在森,王琪,等. 2003. 1999~2001 年青藏高原块体东北缘地壳水平运动的非震反位错模型及变形分析[J]. 地震学报,25(4):374-381.
- 张希,江在森,王琪,等. 2005a. 青藏块体东北缘弹性块体边界负位错反演与强震地点预测[J]. 地震学报,27(6):620-629.
- 张希,江在森,王双绪,等. 2005b. 川滇地区地壳水平运动的弹性块体边界负位错模型与强震地点预测[J]. 地震研究,28(2):119-124.
- 张希,江在森. 2010. 南北地震带中南段地壳水平运动负位错反演与汶川等地震背景[J]. 西北地震学报,20(3):238-246.
- Matsu'ura M, Jackson D D, Cheng A. 1986. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California[J]. J of Geophysical Research, 91(B12):12661-12674.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. BSSA, 75(4):1135-1154.

Inversion of Negative Dislocation for GPS Horizontal Movement and Features of Strain Accumulation in Main Tectonic Areas of China

ZHANG Xi, HAO Ming, JIA Peng, CUI Du-xin

(The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, Shannxi, China)

Abstract

Firstly, using data of GPS horizontal velocity field in China Mainland from 2009 to 2011, aided by inversion of negative dislocation, we found locked segments with energy accumulation at main fractures in Xinjiang, the northeastern margin of Qinghai-Tibet Block, Sichuan-Yunnan and the North China. Secondly, we studied the accumulation rate and locked depth and difference at different regions or segments of main fractures and their possible relationship with preparation of strong earthquakes. The result indicated that: (1) Strain-accumulating rate was the highest in Xinjiang area, average locked depth was about 20.9 km; Strain-accumulating rate in Sichuan-Yunnan area was the second, average locked depth was about 16.3 km; There existed strain accumulation to some degree in northeastern margin of Qinghai-Xizang Block, average locked depth was about 15.7 km, and the strain accumulation rate in North China was the lowest, average locked depth was 16.0 km. (2) At present, there existed relatively higher energy accumulation in west of Southern Tianshan, the eastern of the boundary between Sichuan and Yunnan, from the middle segment of Honghe Fault to the western Yunnan, the western segment of Qilianshan Fault, the segment of the northern margin fault of West Qinling Mountain near boundary between Gansu and Qinghai, the boundary among Shanxi, Hebei and Inner Mongolia Autonomous.

Key words: GPS; tectonic faults; inversion for negative dislocation; strain accumulation