

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

张希^{1,2}, 江在森¹

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要:利用南北地震带中南段1999-2001年、2001-2004年、2004-2007年GPS水平运动速度场资料,借助非震负位错反演,研究了该区主要活动断裂应变积累状态及其时空演化特征;分析了2001年11月14日昆仑山口西 $M_s8.1$ 、2004年12月26日苏门达腊 $M_s8.7$ ($M_w9.0$)巨大地震可能的震后影响,以及与2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 、8月30日攀枝花-会理 $M_s6.1$ 等地震孕育有关的应变积累背景。

关键词:南北地震带中南段; GPS; 负位错; 大震影响; 背景

中图分类号: P315.72⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2010)02-0105-07

Inversion of Negative Dislocation for Crustal Horizontal Movement in Middle-southern Segment of the China South-north Seismic Belt

ZHANG Xi^{1,2}, JIANG Zai-sen¹

{1. Institute of Earthquake Prediction, CEA, Beijing 100036, China;

2. The Second Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China}

Abstract: Using the velocity field result of horizontal movement observed by GPS in the periods of 1999-2001, 2001-2004 and 2004-2007, based on the inversion of aseismic negative dislocation, strain accumulation of the main boundary faults and their time-space evolution features are researched. Possible influences of the $M_s8.1$ earthquake at west the pass of Kunlun Mountains on Nov. 14, 2001 and the Sumatera $M_s8.7$ ($M_w9.0$) earthquake on Dec. 26, 2004 are analyzed, together with the strain accumulation background related to the Wenchuan $M_s8.0$ and the Panzhihua-Huilu $M_s6.1$ earthquakes in 2008.

Key words: Middle-southern segment of the China South-North Seismic Belt; GPS; Negative dislocation; Influence of great earthquakes; Background

0 引言

作为青藏块体东部大型边界地带,南北地震带中南段即川滇及其相邻的甘东南地区(图1)以构造运动和地震活动之强烈、地学研究和减灾意义之重要而倍受重视。中国地震局地质研究所王敏研究员对中国地壳运动观测网络工程观测所得多时段GPS资料统一处理,获得了1999-2001年、2001-2004年、2004-2007年我国大陆水平运动速度场结果(当年的6-9月实施观测)。我们从中选取南北地

震带中南段(21~37°N, 97~107°E)范围内,以海原断裂为北界,澜沧-勐遮断裂为西南界,阿尼玛卿断裂东段、怒江断裂与金沙江断裂等为西界,小江断裂与龙门山断裂、固关-功县断裂等为东界(研究区内自北向南还发育有西秦岭北缘断裂、鲜水河断裂、安宁河-则木河断裂、红河断裂与程海断裂等^[1-3])的GPS站点,借助弹性块体边界非震负位错反演,研究该区主要活动断裂的应变积累状态及其时空演

收稿日期:2009-02-09

基金项目:国家自然科学基金课题(编号40674010)

作者简介:张希(1967-),女(汉族),福建福州人,研究员,主要从事地壳形变研究与地震预报工作。

化特征;分析2001年11月14日昆仑山口西 M_s 8.1、2004年12月26日苏门达腊 M_s 8.7(M_w 9.0)地震可能的震后影响,以及与2008年5月12日汶川 M_s 8.0、8月30日攀枝花-会理 M_s 6.1等地震孕育有关的应变积累背景。

的研究和预报意义^[4,6,9]。考虑到较大尺度区域地壳变形还应包含块体内部的变形,张希等探索建立的块体弹性变形与其边界负位错部分锁定的复合模型,较刚性块体假设更符合南北地震带地壳运动实际^[10-11]。

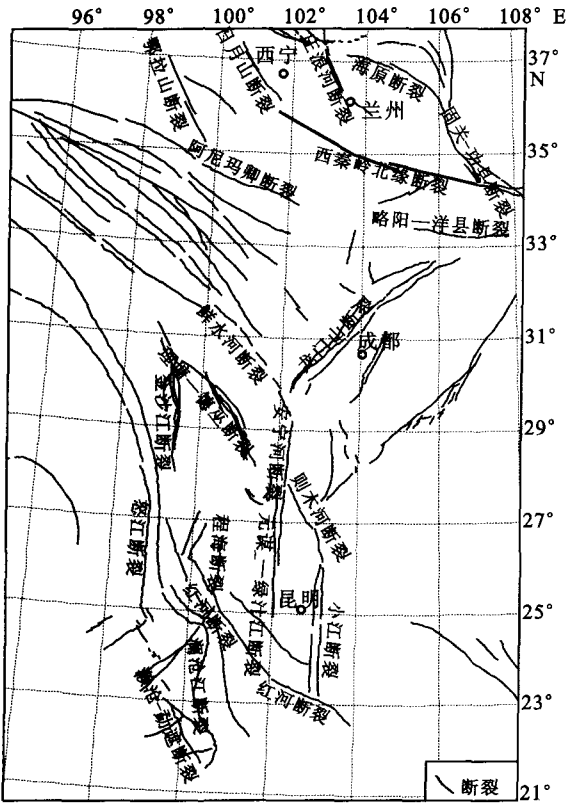


图1 南北地震带中南段主要构造断裂分布
Fig.1 Main faults in middle-southern segment of the China South-North Seismic Belt.

1 地壳水平运动的弹性块体边界非震负位错模型

具体建模时, Matsu'ura 等^[4]、伍吉仓等^[6]、何玉梅等^[7]均采用若干个弹性半空间的单一矩形位错模型来模拟块体边界的各段。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。但考虑到研究区块体及边界带数量较多且多具有分段活动特性,若位错模型太复杂将导致实际求解困难,故而在测点分布支持的情况下,对边界带尽可能细划(每条断层段作用范围有限,可近似为平面)较为可行^[8-11]。

如果模型由 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, $\epsilon_x^j, \epsilon_{xy}^j, \epsilon_y^j, \omega^j$ 为在 Matsu'ura 负位错模型^[4]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) ^[12]。那么由 Okada 矩形位错模型^[5], 第 i 个站点的水平运动观测方程可表示为

$$\begin{aligned}
 V_x^i + \gamma_x^i &= V_{0x}^j + \epsilon_x^j \Delta x + \epsilon_{xy}^j \Delta y + \omega^j \Delta y - \sum_{k=1}^q F_x^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k) \\
 V_y^i + \gamma_y^i &= V_{0y}^j + \epsilon_{xy}^j \Delta x + \epsilon_y^j \Delta y + \omega^j \Delta x - \sum_{k=1}^q F_y^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

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 $\omega^j (= \omega^j - \sum_{k=1}^q \alpha^k)$ 、 $V_{0x}^j (= V_{0x}^j - \sum_{k=1}^q [u_0^k + (y_0^j - y_c^k) \alpha^k])$ 和 $V_{0y}^j (= V_{0y}^j - \sum_{k=1}^q [v_0^k - (x_0^j - x_c^k) \alpha^k])$ 作为 3 个未知参量参与反演(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)^[10-11]。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, 并由地质等资料已知断层轨迹, 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)^[4]。

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^[10-11]可以反演块体及其边界断

Matsu'ura 负位错模型^[4]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部分阻碍, 假设每个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, 这个弹脆性区可认为是部分锁定的。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 弹性均匀介质半空间的矩形位错模拟^[5])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

层段的各项参数。先利用只有块体运动与应变参数的地壳运动模型根据最小二乘法确定等式右边前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,参考已知断层性质调查结果(左旋或右旋、逆断或正断特性^[1-3])确定锁定位错量和错动角初值。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。而断层倾角和宽度初值的给定则相对困难。事实上,尽管我们主要依据文献[1、2]选取图1所示研究区主要活动断裂,实际绘图和划分地块还需借助基于GIS的地震预报分析系统 Mapsis 软件 2.9.3 版“知识库”里“中国断层.TAB”与“中国断层_邓起东.TAB”表。这两个表给出了比较详细的断裂倾向、活动特性信息。之所以要综合两个表的结果,是因为“中国断层.TAB”里断层倾角信息比“中国断层_邓起东.TAB”详细,但缺西秦岭北缘断裂。即使如此,也只能给出倾角的大致范围,比如西秦岭北缘断裂倾角为 $40^{\circ} \sim 80^{\circ}$,最小与最大值相差 40° ;部分断裂只能查到倾向哪一侧,无具体角度值。这种情况下为实现使负位错模型理论值与实际观测值拟合最好的目的,我们将倾角放松,只要求倾向与这两个表一致, $30^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 即可;此外,因为很难查到断层深度或宽度的较准确信息,考虑到该研究区以往所发地震基本为浅源地震, $10 \sim 20$ km 震源深度的相对居多,结合倾角约束($30^{\circ} \sim 85^{\circ}$),反演时约束断层宽度 70 km 以内,分别在 10、20、30、40 km 取值通过试算来粗略选择拟合效果相对较好的断层宽度初值。经贝叶斯最小二乘法反复迭代获得最终反演结果。这样一来计算结果必然会受到不同时间段 GPS 速度值、站点分布及其个数等的影响,同一断层段不同时间段反演所得倾角、深度值就出现了差异(但倾向一致)。大多数断层段其反演所得左旋或右旋、逆断或正断特性与地质资料^[1-3]相符,个别断层段不一致时,以研究时段 GPS 实测资料反映的块体间差异运动特征为准。毕竟地质资料是长时间尺度的总体结果,而本文的研究目的是为了反映不同时间段地形变观测所得微动态变化,以及可能揭示的活动断裂应变积累及与地震孕育-能量释放-震后调整动态过程可能有关的特性。

反演完成后,利用位错量 D^k ,以及增加的年均地震矩积累量 $M_0^k = \mu L^k W^k D^k$ (偏于反映能量积累速率)与年均应力积累量 $S_d^k = \pi \mu D^k / 8 W^k$ (主要反映

剪应力变化强度)度量锁定能量强度。这里的 μ 为地壳刚性系数(取 4×10^{10} N/m²), 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^[4,10-11]。

2 南北地震带中南段 GPS 观测资料的负位错反演分析

本文所用 GPS 观测资料是王敏研究员处理获得的南北地震带中南段相对欧亚板块水平运动速度场结果(图略,各站点速率中误差基本在 2 mm/a 左右及其以内),已基本扣除昆仑山口西 $M_s 8.1$ 、苏门达腊 $M_s 8.7$ ($M_w 9.0$)大震同震变化。我们再扣除测区整体平移与旋转量,得到相对运动矢量图,突出了站点间或断裂两侧差异运动特性^[13](见图2中黑色箭头,绝大多数站点与负位错反演所得表示模型理论值的红色箭头重合,为节省篇幅绘在一张图上)。可看到,以鲜水河-安宁河-则木河断裂为界,其东北侧呈 NNE-N 向运动,西南侧以 SSE-S-SSW 向运动为主,差异显著。印度板块 NE 向推挤主动力作用传递到青藏块体东部时受到相对稳定的华南地块、鄂尔多斯地块、南面东南亚地块不同程度阻挡,四川盆地也相对稳定;研究区东面还受到太平洋板块和菲律宾海板块的西进作用影响。川滇菱形地块及其以南区域的顺时针旋转运动(相对欧亚板块)明显,与鲜水河断裂-安宁河断裂-则木河断裂东北侧大范围区域(相对欧亚板块也呈现顺时针旋转趋势,但较川滇菱形地块及其以南区域弱)呈现相对运动差异。从速率量值来看,“南强北弱”特征显著。尽管 2001 年 11 月 14 日、2004 年 12 月 26 日研究区以西六百多公里、西南两千公里以外发生了昆仑山口西 $M_s 8.1$ 与印尼苏门达腊 $M_s 8.7$ ($M_w 9.0$)巨大地震,1999-2001、2001-2004 与 2004-2007 年这三个大震前后相关时段 GPS 水平运动方向、量值并没有出现大的差异变化,说明这两次大震震后影响程度并不显著。王双绪等^[14]、杨国华等^[15]利用 2004-2005 年 2 月 GPS 水平运动结果分析的大震影响实际是短期同震影响,与本论文所用已扣除大震同震变化的 3 年尺度速度场结果无法比较。

根据图1、图2所示主要断裂构造与测点分布,我们建立了 14 个块体、1999-2001 年(302 个站点)

23 条断裂,2001-2007 年(2001-2004 年 302 个站

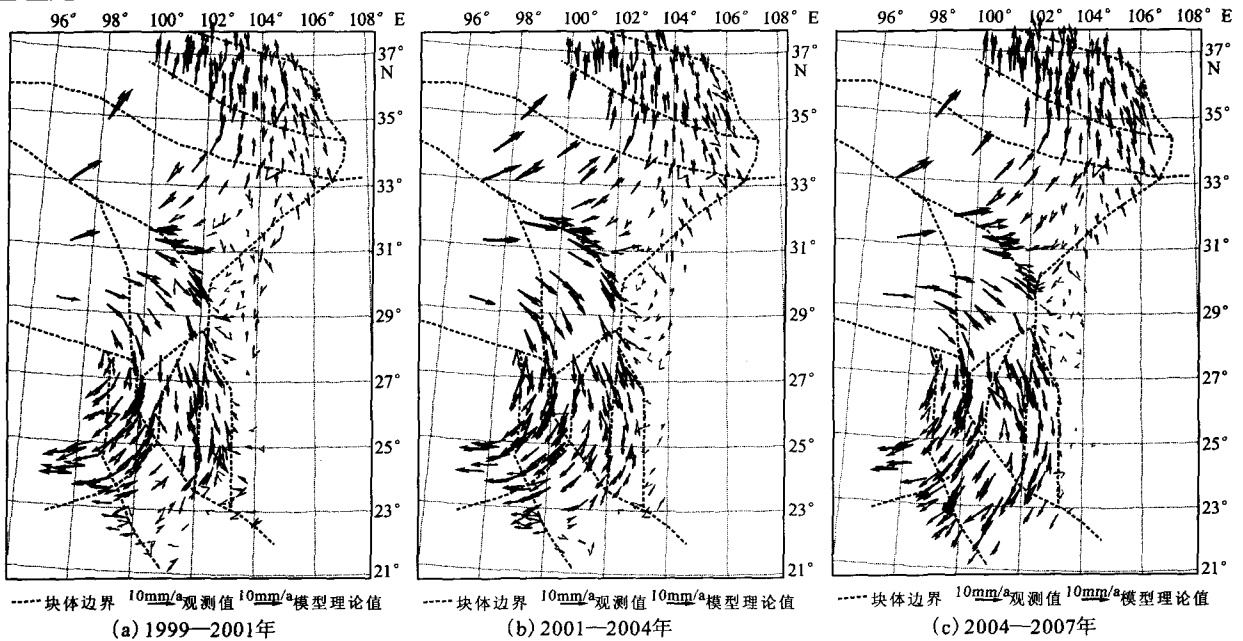


图2 南北地震带中南段 GPS 负位错反演模拟值与观测值对比

Fig. 2 Comparison between observed values and simulated values from negative dislocation inversion for GPS data in middle-southern segment of the China South-North Seismic Belt.

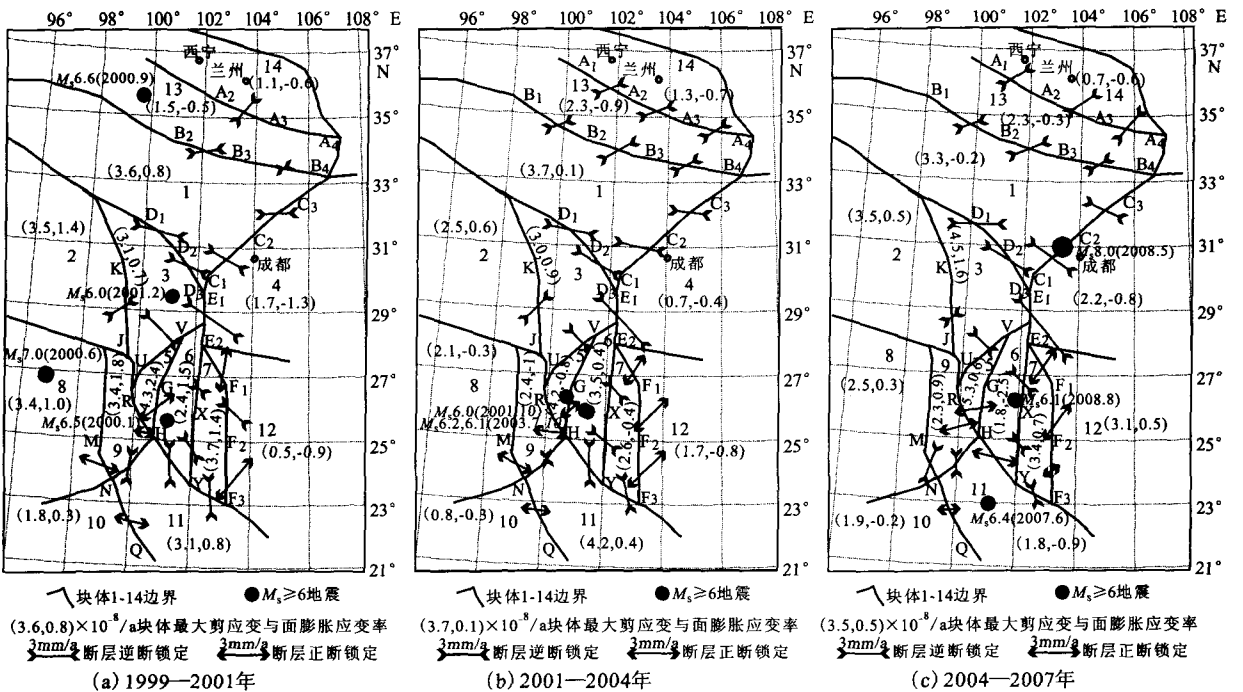


图3 南北地震带中南段 GPS 资料的负位错反演结果(A₁-A₂-A₃-A₄:西秦岭北缘断裂; B₁-B₂-B₃-B₄:阿尼玛卿断裂东段与略阳-洋县断裂; C₁-C₂-C₃:龙门山断裂; D₁-D₂-D₃:鲜水河断裂; E₁, E₂:安宁河断裂; E₂F₁:则木河断裂; F₁-F₂-F₃:小江断裂; E₂-X-Y:元谋绿汁江断裂; GH:程海断裂; KJ:金沙江断裂; UV:丽江-小金河断裂; NH:南定河断裂; R-H-Y-F₃:红河断裂; MN:永德-龙陵断裂; NQ:澜沧劫逆断裂)

Fig. 3 Inversion results of negative dislocation for GPS data in middle-southern segment of the China South-North Seismic Belt.

表1 南北地震带中南段主要的锁定负位错参数反演结果

断层名	断层段	时段	$D/$ [$\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$]	$\lambda/^\circ$	$\delta/^\circ$	W/km	L/km	年均地震矩积累 /[$10^{17} \text{Nm} \cdot \text{a}^{-1}$]	年均应力积累 /[$\text{kPa} \cdot \text{a}^{-1}$]	锁定特性
西秦岭北缘断裂	A ₁ A ₂	2001-2004	1.9±0.3	51.8±3.3	SW77.3±2.9	18.1±0.9	240.1	3.3	1.6	逆断左旋
		2004-2007	2.1±0.5	61.0±5.1	80.1±3.2	17.8±0.9		3.8	1.9	逆断左旋
	A ₂ A ₃	1999-2001	1.9±0.5	76.0±7.5	SW36.5±5.9	10.1±1.0	240.0	1.9	3.0	逆断左旋
		2001-2004	2.2±0.3	43.7±3.2	46.6±3.7	15.3±0.5		3.2	2.3	左旋逆断
		2004-2007	2.2±0.5	58.7±5.1	61.3±5.5	10.5±0.4		2.2	3.3	逆断左旋
	A ₃ A ₄	1999-2001	-	-	-	-	226.4	-	-	不锁定
		2001-2004	1.5±0.3	46.8±2.9	SW53.3±3.2	12.8±0.7		1.7	1.8	左旋逆断
		2004-2007	2.5±0.4	64.9±4.7	65.1±5.2	11.3±0.4	2.6	3.5	逆断左旋	
阿尼玛卿断裂东段及其延伸到达的略阳-洋县断裂	B ₁ B ₂	2001-2004	1.5±0.2	49.2±3.2	N64.0±3.5	20.9±1.0	302.9	3.5	1.2	左旋逆断
		2004-2007	1.5±0.4	48.0±5.5	65.9±5.1	22.1±0.7		4.1	1.1	左旋逆断
	B ₂ B ₃	1999-2001	1.8±0.5	26.4±5.7	N55.1±6.8	17.9±1.5	225.6	2.9	1.6	左旋逆断
		2001-2004	2.4±0.3	48.3±3.5	45.7±2.9	12.7±0.5		2.8	3.0	左旋逆断
		2004-2007	2.3±0.4	41.5±5.1	49.7±4.5	15.0±0.7		3.1	2.4	左旋逆断
	B ₃ B ₄	1999-2001	0.2±0.1	31.2±6.2	N46.7±6.8	9.8±1.1	302.4	0.2	0.3	左旋逆断
		2001-2004	1.7±0.4	37.5±3.1	50.5±3.6	9.7±0.8		2.0	2.7	左旋逆断
		2004-2007	1.3±0.4	35.4±4.7	41.0±5.1	9.9±0.7	1.5	2.0	左旋逆断	
龙门山(中央)断裂	C ₁ C ₂	1999-2001	2.7±0.2	104.5±6.1	NW34.8±5.6	20.0±1.3	242.1	5.3	2.1	逆断右旋
		2001-2004	3.1±0.2	127.0±2.9	36.8±2.2	12.4±0.3		3.7	3.9	逆断右旋
		2004-2007	3.5±0.4	104.3±5.1	34.7±3.1	14.0±0.7		4.7	3.9	逆断右旋
	C ₂ C ₃	1999-2001	2.2±0.2	142.0±7.0	NW66.6±7.1	21.9±1.3	211.9	4.1	1.6	逆断右旋
		2001-2004	2.4±0.3	132.0±3.7	47.2±2.9	14.9±0.9		3.0	2.5	逆断右旋
		2004-2007	2.4±0.7	114.5±5.5	62.0±5.1	18.9±1.2		3.8	2.0	逆断右旋
鲜水河断裂	D ₁ D ₂	1999-2001	3.3±0.2	13.7±4.2	NE47.6±2.8	23.4±1.0	167.1	5.1	2.2	左旋逆断
		2001-2004	3.3±0.2	32.4±3.8	64.2±3.2	17.9±0.8		4.0	2.9	左旋逆断
		2004-2007	3.5±0.6	34.1±4.6	67.5±5.7	21.9±0.9		5.3	2.6	左旋逆断
	D ₂ D ₃	1999-2001	2.6±0.2	18.9±4.2	NE41.5±6.4	8.2±0.3	137.0	1.2	5.1	左旋逆断
		2001-2004	3.4±0.2	28.5±2.9	65.2±3.7	14.3±0.8		2.7	3.8	左旋逆断
		2004-2007	3.6±0.3	14.5±2.0	55.8±5.1	12.4±0.6		2.4	4.6	左旋逆断
安宁河断裂	E ₁ E ₂	1999-2001	4.6±0.2	29.8±6.4	E39.3±4.2	23.5±0.2	160.9	7.3	2.9	左旋逆断
		2001-2004	5.1±0.2	39.9±3.3	35.9±2.6	25.2±0.5		8.3	3.2	左旋逆断
		2004-2007	5.9±0.7	22.1±4.0	42.7±3.9	26.1±0.5		9.9	3.6	左旋逆断
则木河断裂	E ₂ F ₁	1999-2001	2.7±0.5	315.5±6.4	NE37.8±5.5	7.9±0.2	156.8	1.3	5.4	左旋正断
		2001-2004	1.8±0.3	308.5±3.2	57.1±2.9	15.7±0.9		1.8	1.8	正断左旋
		2004-2007	2.3±0.4	294.5±5.0	49.7±5.2	20.6±1.2		3.0	1.8	正断左旋
小江断裂	F ₁ F ₂	1999-2001	2.1±0.5	53.1±6.5	E54.0±5.9	8.5±0.9	174.0	1.3	3.9	逆断左旋
		2001-2004	2.7±0.3	314.8±2.9	57.2±3.2	14.7±0.7		2.8	2.9	左旋正断
		2004-2007	2.5±0.4	324.7±5.1	74.1±4.5	14.6±1.1		2.5	2.7	左旋正断
	F ₂ F ₃	1999-2001	3.4±0.3	327.4±5.6	E32.1±4.2	15.2±1.0	217.2	4.5	3.5	左旋正断
		2001-2004	3.2±0.3	314.0±3.5	53.7±3.2	16.9±0.6		4.7	3.0	正断左旋
		2004-2007	0.6±0.2	305.9±5.1	39.9±5.2	13.1±0.7		0.7	0.7	正断左旋
元谋-绿汁江断裂	E ₂ X	1999-2001	0.6±0.2	53.6±5.7	E58.5±7.1	13.7±1.6	246.7	0.8	0.7	逆断左旋
		2001-2004	1.1±0.1	45.8±3.3	41.2±2.9	13.3±0.5		1.4	1.3	逆断左旋
		2004-2007	1.7±0.4	49.0±5.5	38.9±5.6	11.8±0.7		2.0	2.3	逆断左旋
	XY	1999-2001	1.9±0.4	38.9±6.1	E56.6±6.5	13.9±1.4	230.5	2.4	2.2	左旋逆断
		2001-2004	2.0±0.3	51.1±3.5	77.2±3.1	24.4±0.7		4.5	1.3	逆断左旋
		2004-2007	0.9±0.4	46.8±5.9	72.5±4.5	12.2±0.5		1.0	1.2	逆断左旋
程海断裂	GH	1999-2001	2.3±0.2	312.9±6.8	W60.8±6.5	8.9±0.6	182.5	1.5	4.1	左旋正断
		2001-2004	0.7±0.2	313.2±2.9	55.2±3.9	16.1±0.6		0.9	0.7	左旋正断
		2004-2007	2.3±0.4	284.8±4.3	51.7±3.6	18.7±1.0		3.2	2.0	正断左旋
丽江-小金河断裂	UV	1999-2001	3.0±0.5	100.7±6.2	SE44.5±6.5	13.3±0.9	188.6	3.0	3.6	逆断为主
		2001-2004	1.6±0.3	100.5±2.9	46.5±3.4	11.4±0.5		1.3	2.2	逆断为主
		2004-2007	1.6±0.7	101.3±5.1	48.7±5.0	13.4±0.8		1.6	1.9	逆断为主

续表 1

断层名	断层段	时段	$D/$ [mm·a ⁻¹]	$\lambda/^\circ$	$\delta/^\circ$	W/km	L/km	年均地震矩积累 /[10 ¹⁷ Nm·a ⁻¹]	年均应力积累 /[kP·a ⁻¹]	锁定特性
红河断裂	RH	1999-2001	0.7±0.2	223.5±6.5	NE47.2±6.0	10.8±1.0		0.4	1.0	右旋正断
		2001-2004	1.4±0.1	230.1±3.7	60.9±3.6	10.9±0.4	140.6	0.8	2.0	右旋正断
		2004-2007	1.9±0.3	244.0±5.1	47.3±5.5	12.9±0.7		1.4	2.3	右旋正断
	HY	1999-2001	2.9±0.3	145.4±5.9	NE67.3±6.8	25.2±1.0		6.3	1.8	右旋逆断
		2001-2004	2.9±0.3	145.3±2.9	64.5±3.5	18.4±0.9	211.0	4.5	2.5	右旋逆断
		2004-2007	2.4±0.5	219.7±5.5	49.1±5.1	19.7±1.2		3.9	1.9	右旋正断
	YF ₃	1999-2001	2.9±0.3	122.9±6.6	NE33.6±6.7	25.3±0.7		4.2	1.8	逆断右旋
		2001-2004	2.4±0.3	133.8±3.2	59.5±2.9	13.4±0.5	143.7	1.9	2.8	逆断右旋
		2004-2007	1.1±0.4	134.0±5.1	37.9±4.1	17.6±1.2		1.1	1.0	逆断右旋
金沙江断裂	KJ	1999-2001	1.7±0.2	126.6±6.5	E57.6±7.1	11.5±1.0		2.4	2.3	逆断右旋
		2001-2004	2.1±0.3	134.5±3.7	51.8±3.3	12.9±0.8	313.7	3.4	2.5	右旋逆断
		2004-2007	0.5±0.4	116.4±5.1	52.6±5.5	12.8±0.6		0.7	0.6	逆断右旋
南定河断裂	NH	1999-2001	2.1±0.5	37.0±5.9	NW37.7±6.2	9.7±1.0		1.6	3.4	左旋逆断
		2001-2004	0.3±0.1	39.2±2.9	64.6±3.2	9.8±0.4	194.2	0.2	0.5	左旋逆断
		2004-2007	1.2±0.3	55.5±5.1	78.8±3.5	14.4±0.7		1.3	1.3	左旋逆断
永德龙陵断裂	MN	1999-2001	2.2±0.5	223.7±6.5	SW47.8±7.0	15.2±1.5		1.4	2.3	右旋正断
		2001-2004	1.9±0.3	215.9±3.4	43.5±2.9	14.5±0.8	106.1	1.2	2.0	右旋正断
		2004-2007	2.4±0.6	133.7±5.9	49.2±5.5	16.4±1.1		1.7	2.3	右旋逆断
濠沧-勐遮断裂	NQ	1999-2001	1.5±0.3	234.3±7.1	SW43.2±5.7	6.6±0.3		1.0	3.5	右旋正断
		2001-2004	0.9±0.2	241.5±3.2	53.9±3.6	10.8±0.6	259.8	0.9	1.3	右旋正断
		2004-2007	0.5±0.3	236.9±5.1	56.5±5.0	14.7±1.1		0.7	0.5	右旋正断

注:kP/a表示千帕/年

表 2 反演所得位移理论值与观测值差异等情况统计表

时段	单位权中误差/ [mm·a ⁻¹]	理论与观测值之差的绝对值区间和占站点总数的百分比		
		≤1 mm/a	≤2 mm/a	≤3 mm/a
		1999-2001	0.99	67%
2001-2004	0.51	73%	92%	98%
2004-2007	0.72	77%	93%	98%

点,2004-2007年285个站点)25条断层段的负位错模型。反演结果见表1和图3,拟合效果见表2和图2。

(1) 三个时段南北地震带南段地块变形总体强于中段地区,研究区各边界断裂锁定特性(左旋或右旋、正断或逆断)多数与其构造背景^[1-3]一致。1999-2001年锁定位错量3 mm/a以上的只有安宁河断裂(E₁E₂段)、鲜水河断裂北段(D₁D₂段)、小江断裂南段(F₂F₃段)、丽江-小金河断裂(UV段),尤其前两段年均地震矩积累≥5×10¹⁷Nm/a,应变积累速度相对较快;其次是红河断裂中东段(HY、YF₃段)、龙门山断裂南段(C₁C₂段)、则木河断裂(E₂F₁段)与鲜水河断裂南段(D₂D₃段),位错量2.5 mm/a以上;而西秦岭北缘断裂A₂A₃段、阿尼玛卿断裂东段B₂B₃段、龙门山断裂北段即C₂C₃段、小江断裂北段(F₁F₂段)、元谋-绿汁江断裂南段(XY段)、程海断裂(GH段)、南定河断裂(NH段)、永德-龙陵断裂(MN段)反映一定程度应变积累特性

(位错量2 mm/a左右及以上)。期间4次M_s6.0以上地震基本发生在地块内部,只有2000年1月姚安M_s6.5地震震中距程海断裂不远。即使如此,程海断裂本时段仍反映一定程度应变积累特性,对以后发生的地震即2001年10月永胜M_s6.0地震、断裂东侧不远2003年7月和10月大姚M_s6.1与M_s6.1地震孕育可能有所反映。

(2) 2001-2004年相对1999-2001年、2004-2007年相对2001-2004年研究区地块变形和边界断裂锁定程度、方式、特性并没有出现大规模、整体性、显著变化,说明GPS观测反映的昆仑山口西和苏门达腊这两次巨大地震对南北地震带中南段地壳变形与应变积累的(震后影响)不很显著。总体而言,从地块变形来看,2001-2004年相对1999-2001年呈压性变化的块体个数增多;而2004-2007年相对2001-2004年呈压性变化的块体个数维持,量值也没有大的变化。初步分析认为:昆仑山口西M_s8.1巨大地震对该研究区可能存在一定程度影响,且促进应变积累的作用略占优势;苏门达腊地震影响则相对偏弱。

(3) 2001-2004年相对1999-2001年:①南北地震带中段及其附近,即28°N以北的西秦岭北缘断裂、阿尼玛卿断裂东段及其延伸到达的略阳-洋县断裂、鲜水河断裂、龙门山断裂、安宁河断裂、金沙

江断裂区域,应变积累总体反映一定程度增强,即断层段定位错量基本反映增强特性,甘东南地区即图3中地块13与14挤压变形也略微增强。其中鲜水河断裂南段(D_2D_3 段)、龙门山断裂南段(C_1C_2 段)位错量均由上一时段的 2.5 mm/a 以上增加到 3 mm/a 以上,对2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 地震孕育背景可能有所反映。②滇西北-滇西地区(丽江-小金河断裂、程海断裂、红河断裂西段、南定河断裂、永德-龙陵断裂所在区域及相关地块)应变积累演变情况相对复杂,减弱的断层段个数稍占优势(丽江-小金河断裂、程海断裂、南定河断裂位错量减少 $1.4\sim 1.8\text{ mm/a}$),2001-2004年期间发生了永胜、大姚等多次 $M_s6.0$ 以上地震,总体反映包含能量释放-调整的不稳定、波动状态。③川滇交界东部(则木河断裂及与小江断裂交汇区)、滇南地区(小江断裂中南段、红河断裂中东段、澜沧-勐遮断裂北东侧地块)负位错锁定量值、方式、特性以维持为主。④元谋-绿汁江断裂北段应变积累增强特性可能与2008年8月攀枝花-会理 $M_s6.1$ 地震孕育有一定关系。澜沧-勐遮断裂西侧地块即滇西南地区、永德-龙陵断裂西侧地块因GPS站点过少,计算所得地块变形的可靠性和分析意义弱于其它地区。

(4) 2004-2007年相对2001-2004年:①断层锁定 3 mm/a 以上的断层段只有安宁河断裂、龙门山断裂南段和鲜水河断裂,较上一时段略微减少。②除金沙江断裂减弱、阿尼玛卿断裂东段及其延伸到达的略阳-洋县断裂维持,南北地震带中段及其附近(包括元谋-绿汁江断裂北段)应变积累状态仍以增强为主,其中发生汶川 $M_s8.0$ 与攀枝花-会理 $M_s6.1$ 地震的龙门山断裂南段和元谋-绿汁江断裂北段2001-2004年、2004-2007年应变积累持续增强,对其孕震背景有较好反映。③滇西北-滇西地区各断层段有增有减,其中呈增强特征的略占多数(程海断裂、红河断裂西段、南定河断裂增强明显、永德-龙陵断裂略增),对发生在其西南部的2008年3月21日盈江 $M_s5.9$ 、东缘附近的攀枝花-会理 $M_s6.1$ 地震前孕震背景有一定程度反映。④滇南地区应变积累程度总体略减(小江断裂南段、元谋-绿汁江断裂南段、红河断裂东段定位错量减少 1 mm/a 以上),可能与2004年底-2005年苏门达腊震后该局部区域发生两次5级多地震及2007年普洱 $M_s6.4$ 地震能量释放-应力场调整有

关。

3 主要结论

(1) 非震负位错反演所得三个时段活动块体边界断裂应变积累状态及其时空演化特性对研究区多数6级以上地震前孕育背景有所反映,基本表现为较强锁定或增强状态。2004-2007年应变积累程度相对明显的是南北地震带中段至川滇交界东部、滇西北-滇西地区,尤其安宁河断裂及与鲜水河、龙门山、则木河断裂交汇区,应变积累持续,尚缺6级以上地震。

(2) 龙门山断裂南段、元谋-绿汁江断裂北段2001-2004年、2004-2007年相对1999-2001年应变积累持续、增强特性对2008年汶川 $M_s8.0$ 、攀枝花-会理 $M_s6.1$ 地震孕育过程有所反映;昆仑山口西与苏门达腊两次巨大地震,至少没有减缓上述与汶川、攀枝花地震孕育相关的构造断裂的应变积累,在一定程度上对这两次地震的发生可能有利。

致谢:中国地震局地质研究所王敏研究员为我们提供了相对欧亚板块GPS速度场结果,在此表示衷心感谢!

[参考文献]

- [1] 马杏垣,主编.中国岩石圈地球动力学地图集[M].北京:中国地图出版社,1989:49-54.
- [2] 邓起东,张培震,冉勇康,等.中国活动构造基本特征[J].中国科学(D辑),2002,32(12):1020-1030.
- [3] 李建彪,甘卫军,冉勇康,等.青藏高原东部构造块体的运动学及形变特征分析[J].西北地震学报,2006,28(2):97-103.
- [4] Matsuura M, Jackson D D, Cheng A. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California[J]. J. of Geophysical Research, 1986,91(B12):12,661-12,674.
- [5] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985,75(4):1135-1154.
- [6] 伍吉仓,陈永奇.一种板块边界断层运动的力学模型[J].地壳形变与地震,2000,20(2):8-14.
- [7] 何玉梅,姚振兴.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,2002,45(5):638-645.
- [8] 张希,江在森,王琪,等.1999-2001年青藏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,2003,25(4):374-381.
- [9] 张希,王双绪,崔笃信,等.民乐-山丹地震的区域构造变形背景与中短期前兆[J].中国地震,2004,20(3):238-246.
- [10] 张希,江在森,王琪,等.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,2005,27(6):620-629.

构造变动。浅层的构造变动一方面可调制与诱发深部构造活动并促进地震发生,另一方面则派生或伴生出地形变、地应力、水化学及地电阻率等浅层前兆异常。

致谢:山西省地震局、河北省地震局、北京市地震局、天津市地震局、内蒙古自治区地震局、中国地震局地壳应力研究所、中国地震局地质研究所及中国地震台网中心等单位提供部分地壳形变、地下流体资料,在此表示衷心感谢!

[参考文献]

- [1] 梅世蓉,冯德益,张国民,等. 中国地震预报概论[M]. 北京:地震出版社,1993.
- [2] 国家地震局预测预防司. 地下流体地震预报方法[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [3] 车用太,鱼金子,刘五洲. 水氢异常的水动力学机制[J]. 地震地质,1997, 19(4):353-357.
- [4] 邵永新,李君英,李一兵,等. 地下流体动态异常分布与构造的关系[J]. 西北地震学报,2000,22(3):284-287.
- [5] 刘耀炜,施锦. 强震地下流体前兆信息特征[J]. 地震学报,2000,22(1):59-64.
- [6] 邵永新,李君英,田山,等. 唐山7.8级地震前后地下流体动态异常演化特征[J]. 西北地震学报,2001,23(1):26-29.
- [7] 黄辅琼,邓志辉,顾瑾平,等. 张北地震地下流体异常场的研究[J]. 地震,2002,22(4):114-122.
- [8] 张立,唐采,王世芹,等. 宁蒗6.2姚安6.5和水胜6.0级地震前地下流体的短期变化[J]. 地震研究,2003,26(1):149-156.
- [9] 陆明勇,黄辅琼,刘善华,等. 地壳变形与地下水相互作用及其异常关系初探[J]. 地震,2005, 25(1):67-73.
- [10] 车用太,刘五洲. 板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设[J]. 地震学报,2000,22(1):93-101.
- [11] 陆明勇,牛安福,鲁德顺,等. 地壳形变与地下水动态异常特征研究进展[J]. 西北地震学报,2005,27(1):89-95.
- [12] 陆明勇. 地壳形变与地下水相互作用及“双力源”前兆观点[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):76-83.
- [13] 陆明勇. “双力源”地震前兆观点的进一步探讨[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(4):105-111.
- [14] 国家地震局一九七六年唐山地震编辑组. 一九七六年唐山地震[M]. 北京:地震出版社,1982.
- [15] 徐常芳. 壳内流体演化及地震成因(三)[J]. 地震学报,1997, 19(2):139-144.
- [16] 张永仙. 热应力三维数值模拟研究及热物质的运移在地震孕育过程中的作用探讨[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,1999.
- [17] 陈颢. 地壳岩石的力学性能-理论基础与实验方法[M]. 北京:地震出版社,1988:30.
- [18] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid [J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26: 182-185.
- [19] Biot M A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27:240-253.
- [20] Nur A, Byerlee J D. An exact effective stress law for elastic deformation of rocks with fluids [J]. Journal of Geophysical Research, 1971, 76:6414-6419.
- [21] Palciauskas V V, Domenico P A. Characterization of drained and undrained response of thermally loaded repository rocks [J]. Water Resources Research, 1982, 18:281-290.
- [22] Palciauskas V V, Domenico P A. Microfracture development in compacting sediments: Relations to hydrocarbon-maturation kinetics [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1980, 64:927-937.
- [23] Domenico P A. Transport phenomena in chemical rate processes in sediments [J]. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences, 1977, 5:287-317.
- [24] John D, Denis L. Mass and Energy Transport in a Deforming Earth's Crust, The Role of Fluids in Crustal Processes [M]. Washington: National Academy Press, 1990:27-41.

(上接 111 页)

- [11] 张希,江在森,王双绪,等. 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,2005,28(2):119-124.
- [12] 顾国华. 形变监测网的基准与形变模型反演[J]. 地壳形变与地震,1990,10(1):21-29.
- [13] 江在森,张希,崔笃信,等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报,2001,44(5):636-644.
- [14] 王双绪,丁平,张希,等. 利用 GPS 资料研究印尼 8.7 级地震对我国西部地震趋势的影响[J]. 西北地震学报,2005, 27(4):322-327.
- [15] 杨国华,江在森,王敏,等. 印尼地震对我国川滇地区地壳水平运动的影响[J]. 大地测量与地球动力学,2006,26(1):11-20.