

文章编号: 0253-3782(2005)06-0620-10

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^{*}

张 希¹⁾ 江在森²⁾ 王 琪³⁾ 王双绪¹⁾
崔笃信¹⁾ 张晓亮¹⁾

1) 中国西安 710054 中国地震局第二监测中心

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

3) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

摘要 利用青藏块体东北缘 1993—1999 年、1999—2001 年和 2001—2003 年 3 个时段的 GPS 水平运动速度场成果, 通过研究建立的弹性块体边界负位错模型反演, 给出该区构造块体及其边界断裂运动与变形差异、构造应变场时空分布、高应变能积累部位以及强度的定性分析和定量描述。在充分考虑区域构造及块体应变的前提下, 研究与该区 6 级左右及 6 级以上地震地点预测相关的背景性前兆的共性特征。

关键词 弹性块体边界 负位错模型 地壳水平运动 反演 震例研究

中图分类号: P315.72⁺⁵ **文献标识码:** A

引言

Matsu'ura 等(1986)的负位错模型认为, 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。假设边界下部的塑性区可自由滑动, 而其上部的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。即视块体边界区域的地表位移为块体(假设为刚性)平移减去边界上部(由若干断层段构成, 每条断层段用弹性均匀介质半空间的单一矩形位错模拟)对块体相对运动的部分锁定在地表产生的位移。它具有联系区域深部块体与其边界断裂, 以寻求由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(伍吉仓, 陈永奇, 2000; 伍吉仓, 许才军, 2002; 何玉梅, 姚振兴, 2002)。但针对较大尺度区域, 实际存在的地壳变形还应包含块体内部的变形(李延兴等, 2001; 吴云等, 2002)。对于 GPS 水平运动资料, 笔者曾尝试细划块体(张希等, 2003)或增加块体旋转参量(张希等, 2004a)来改善拟合效果, 并借助负位错地震矩与负位错应力降度量锁定能量强度(张希等, 2003, 2004a, b, c)。但其假设仍局限于刚性块体。本文研究建立一种块体弹性变形及其边界负位错部分锁定的复合作用模型(简称为弹性块体边界负位错模型), 进而获取基于这种复合模型的构造应变场时空分布演化图象。在充分考虑区域构造和块体应变的前提下, 强化发震地点的预测功能。青藏块体东北缘是我国大陆构造运动强烈、地震频发的地区之一。本文利用其 1993—1999

* 地震科学联合基金(603001)和中国地震局“十五”项目子课题(100501-04)资助。
2004-07-28 收到初稿, 2005-09-12 收到修改稿并决定采用。

年、1999—2001 年和 2001—2003 年 3 个时段的 GPS 水平运动速度场成果, 通过弹性块体边界负位错模型反演, 给出了该区地壳水平运动反映的构造块体及其边界断裂运动与变形差异、构造应变场时空分布、高应变能积累部位以及强度的定性分析和定量描述。结合震例研究, 提取与该区 6 级左右及 6 级以上地震地点预测相关的背景性前兆的共性特征。

1 所用资料概况

本文所用资料为 ITRF97 框架下 1993—1999 年河西 C 网 31 个站点(江在森等, 2001), 1999—2001 年 187 个站点(张希等, 2004a)。其中, 网络工程点 135 个, 河西 C 网点 30 个, 973 项目和原测绘局 B 级网点 22 个), 以及 ITRF2000 框架下 2001—2003 年 60 个站点(其中 973 项目点 52 个, 网络工程点 8 个)的 GPS 水平运动速度值(GAMIT/GLOBK 软件处理, 均相对欧亚板块; 3 个时段速度值中误差基本在 3 mm/a 以下)。

2 地壳水平运动的弹性块体边界负位错模型

Matsu'ura 等(1986), 伍吉仓和陈永奇(2000)、伍吉仓和许才军(2002), 以及何玉梅和姚振兴(2002)均采用若干个弹性均匀介质半空间的单一矩形位错模型来模拟块体边界的各段, 其中伍吉仓和许才军(2002)、何玉梅和姚振兴(2002)的研究范围达到了数百公里。虽然这种单一矩形位错模型是位错模型中最简单的, 考虑到研究区块体及边界带(多具有分段活动特性)数量较多, 若位错模型太复杂将导致实际求解困难, 故尔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。

如果模型由 p 个块体和 q 个断层段组成。GPS 站点(x_i, y_i)(由经纬度经高斯投影所得平面直角坐标, 并考虑该点所在子午线切线方向与投影平面直角坐标系 y 轴方向夹角的影响, 对其运动速率值作了相应修正)位于第 j 个块体上, V_{0x}^j 和 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 1986 年 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)。考虑到任何观测产生的位移场很可能是多解的(顾国华, 1990), 本文反演用的是已扣除测区整体平移与旋转量的水平相对运动速度场结果(图 1a, c, e)。由 Okada(1985) 矩形位错模型, 第 i 个站点的水平运动观测方程可表示为

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

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 $D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k$ 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会时导致的奇异问题)(Matsu'ura et al., 1986)。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(张希等, 2003)可以反演块体及其边界断层段的各项参数。首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式(1)右边前 4 项 6 个参数的初值及先验误差; 再通过块体运动参数初值所反映的块体间相对运动状况(包括块体间相对运动量在水平面上分别沿断层走向和法线方向的投影等)、断裂附近站点观测值反映的边界断裂活动状况, 参考已知地质或地球物理成果确定断层参数初值(以保证反演所得断层左、

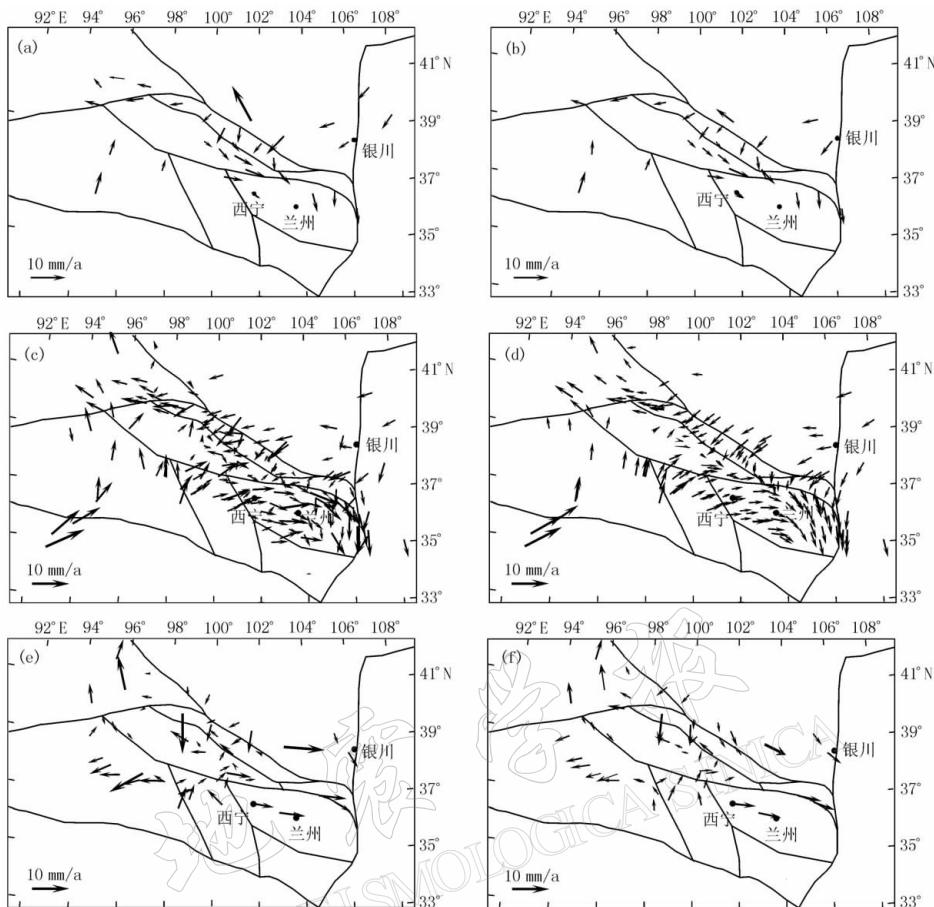


图1 扣除整体平移与旋转后青藏块体东北缘地区水平相对运动矢量图及反演结果比较

(a) 1993—1999年观测值; (b) 1993—1999年负位错模型理论值; (c) 1999—2001年观测值;
(d) 1999—2001年负位错模型理论值; (e) 2001—2003年观测值; (f) 2001—2003年负位错模型理论值

右旋和张、压等特性与其两侧块体相对运动状况、与已有构造地质和地球物理成果基本一致); 并采用年均负位错地震矩 $M_0 = \mu L WD$ (偏于反映能量积累速率) 与年均负位错应力降 $S_d = \pi \mu D / 8W$ (主要反映剪应力强度) 来度量锁定能量强度(张希等, 2004a, b, c). 这里的 μ 为地壳的刚性系数(取 $4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$), L 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(张希等, 2003, 2004b), 这样的反演过程较为稳定, 不会造成奇异问题.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_x}{\partial x} = \epsilon_x^j - \sum_{k=1}^q \frac{\partial F_x^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k)}{\partial x} \\ \frac{\partial V_x}{\partial y} = \epsilon_{xy}^j + \omega^j - \sum_{k=1}^q \frac{\partial F_x^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k)}{\partial y} \\ \frac{\partial V_y}{\partial x} = \epsilon_{xy}^j - \omega^j - \sum_{k=1}^q \frac{\partial F_y^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k)}{\partial x} \\ \frac{\partial V_y}{\partial y} = \epsilon_y^j - \sum_{k=1}^q \frac{\partial F_y^k(x_i, y_i; D^k, \lambda^k, \delta^k, W^k)}{\partial y} \end{array} \right. \quad (2)$$

进而, 在通过反演获取块体及其边界断层段各项参数的基础上, 可通过对位移场解析式(1)求偏导(Okada, 1985), 推算与该复合模型相对应的应变场的解析式(2), 由此获取研究区构造应变场的时空分布图象.

3 青藏块体东北缘负位错模型、应变场时空演化与强震关系研究

考虑主要构造、GPS 站点分布并参考刘百箎研究员对研究区的块体划分^①和中国大陆一二级块体划分结果(张培震等, 2002), 我们对 3 个时段扣除整体平移与旋转的水平相对运动速度场结果(图 1a, c, e), 分别建立了 5 个块体、4 条断层段(图 2a); 11 个块体、21 条断层段(图 2b)和 7 个块体、8 条断层段的负位错模型(图 2c). 而反演所得模型理论值与观测值的一致性较好(表 1、图 1. 由于每个块体只有平移和均匀应变参量, 故反演值反映的站点运动方向相对规律和有序, 也不可能与观测值完全一致. 但其时空分布、演变的总体特征体现出来了), 拟合效果较块体参量只有平移与旋转的负位错模型(张希等, 2004a)有所改善.

表 1 反演所得位移理论值与观测值差异情况统计表

时 段	拟合中误差 /mm·a ⁻¹	位移方向	理论与观测值之差的绝对值在以下区间的 站点数占站点总数的百分比			理论与观测值之差的 绝对值/mm·a ⁻¹		
			≤1 mm/a	≤2 mm/a	≤3 mm/a	最小值	均值	最大值
1993—1999 年	0.81	x	80%	92%	100%	0.0	0.7	2.4
		y	76%	80%	96%	0.0	1.0	8.6
1999—2001 年	0.38	x	50%	77%	91%	0.0	1.4	5.8
		y	69%	91%	97%	0.0	1.0	6.0
2001—2003 年	0.53	x	53%	73%	80%	0.0	1.8	9.0
		y	61%	84%	88%	0.0	1.3	5.3

3.1 块体运动与变形特征

印度板块的北推碰撞引起的青藏块体持续 NE 向挤压运动产生的构造应力场, 是本区构造形变与地震孕育的主控应力, 并在较稳定的阿拉善地块、华北亚板块的一定阻挡作用下, 形成了地壳“压缩—挤出—旋转”的变形特征(虢顺民, 江在森, 2000). GPS 观测资料显示, 1993—2001 年相对欧亚板块呈现整体性由东偏北—东偏南的顺时针运动(江在森等, 2001; 张希等, 2004a); 而扣除测区整体平移与旋转的相对运动矢量图 1a, c, 则显示了两个时段相当一致的印度板块碰撞推挤作用下, 近 EW 向弧形展布的青藏块体北界阿尔金—祁连山—海原断裂带显著的左旋运动差异特征. 2001—2003 年, 相对欧亚板块, 测区西部呈现与 1993—2001 年趋势相反的南西向运动(张希等, 2004c), 反映了昆仑山口西 8.1 级巨震引起的大区域形变调整与短期松弛状态, 或者包含同震影响. 这可能使甘青块体对祁连山断裂带的北东向挤压作用短期内有所减弱, 有利于该区潜在错动的发生. 据崔笃信等的研究结果^②, 这种南西反向运动主要出现于 2001—2002 年, 2003 年相对 2002 年已开始恢复北东向运动; 而扣除测区整体平移与旋转的相对运动矢量图 1e, 则显示在 8.1 级巨

① 引自中国地震局“十五”短期预极攻关项目“青藏高原北部地区地震活动短期前兆特征及其预测方法研究”报告, 2003.

② 崔笃信等. 2003. 青藏块体东北缘地壳水平运动动态变化与地震趋势预测. 中国地震局第二监测中心 2004 年度地震趋势研究报告.

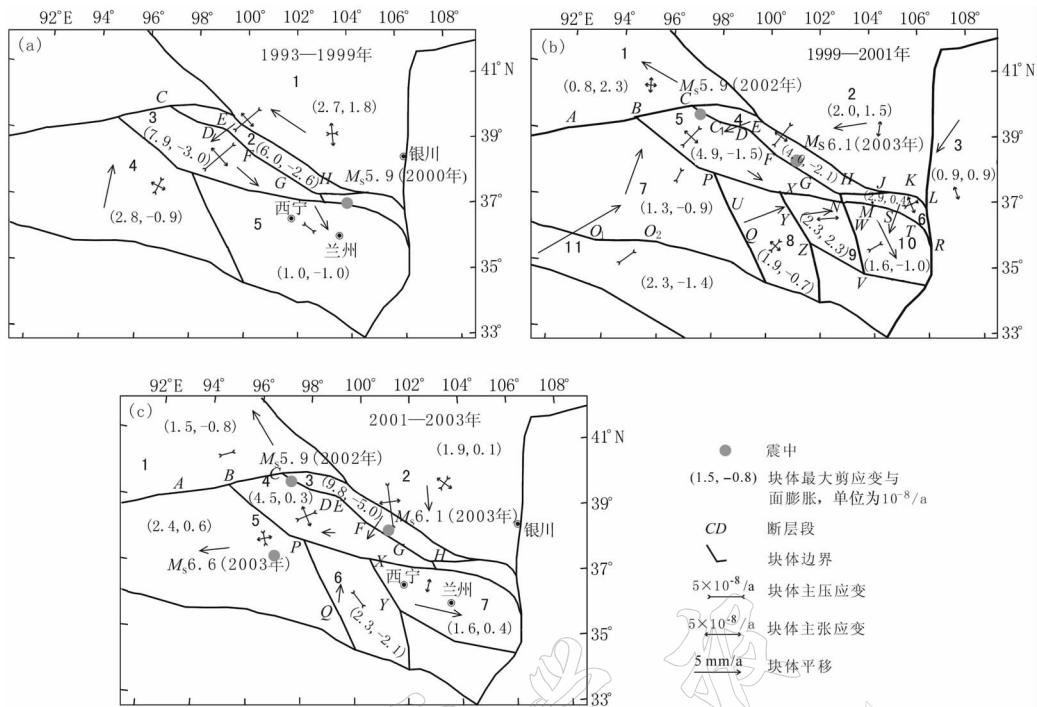


图 2 青藏块体东北缘地区负位错模型及块体变形

(a) 1. 阿拉善地块；2. 河西走廊(以龙首山断裂等为北界, 祁连山北缘断裂、皇城—塔尔庄断裂及香山一天景山断裂为南界); 3. 祁连山地块(由刘百麟所划柴达木地块北界、哈拉湖、门源—冷龙岭断裂确定其南界, 庄浪河断裂为东界); 4. 柴达木地块(鄂拉山断裂为东界, 而阿尔金断裂是块体 2~4 的西界); 5. 以西宁—兰州地块为主(海原—六盘山断裂为其东北界), 阿尼玛卿断裂是块体 4 和 5 的南界(图 1b 中无塔里木及鄂尔多斯地块内站点, 因其过少, 未加入计算).

(b) 1~5 分别为塔里木地块东部、阿拉善地块、鄂尔多斯地块西缘、河西走廊与祁连山地块; 6. 海原地块(以庄浪河断裂、香山一天景山断裂、海原—六盘山断裂和牛首山—大小罗山断裂围限); 7. 柴达木地块; 8. 共和地块(以鄂拉山断裂、日月山断裂及其东南延伸的断裂为西界和东界); 9 和 10 分别为西宁和兰州地块, 以庄浪河断裂及其东南延伸线分割, 西秦岭北缘断裂为南界(图 1d 中无其南侧的甘南地块内 3 个站点, 也因其过少、分布不理想, 未加入计算); 11. 东昆仑地块, 以阿尼玛卿断裂(同时也是块体 7 和 8 的南界)、玉树断裂、阿尔金断裂及龙门山、鲜水河断裂为边界(虽然块体内只有 3 个点, 但其与柴达木地块内数点连成一线, 由南至北呈 NE 向跨越东昆仑构造. 为研究 2001 年 11 月 14 日发生该地块内我国大陆 50 a—遇的 8.1 级巨震, 加入计算. 因整个研究区观测向量数足够, 个别块体没有多余观测仍可以完成反演).

(c) 1~7 分别为塔里木地块东部、阿拉善地块、河西走廊、祁连山地块、柴达木地块、共和地块、西宁—兰州地块(南界仍为西秦岭北缘断裂)

震后西部松弛和调整应力场作用下呈现与东部速率分化的近 NE 向显著差异带(西侧以 SW 向运动为主, 东侧呈 NE—E—ES 向顺时针旋转; 2003 年该差异带西侧连发德令哈及民乐两次 6 级地震). 从负位错反演所得块体应变可以看出(图 2): ① 1993—2001 年, 青藏块体东北缘以近 NE—NEE 向主压应变为优势分布, 而 NWW—NW 向存在一定程度的拉张. 西、北和东缘 3 个较稳定块体呈现一定的张性阻挡. 2000 年景泰 5.9 级地震发生在 1993—1999 年强剪切挤压的祁连山地块—河西走廊东缘附近; 2002 年玉门 5.9 级和 2003

年民乐 6.1 级地震震中位于 1999—2001 年河西走廊强挤压剪切盆地与祁连山强剪切地块间的祁连山北缘断裂两侧。此外, 相对上一时段, 1999—2001 年(昆仑山口西 8.1 级地震前观测)研究区西部(东部地区上一时段站点太少, 无从比较)块体应变减弱, 可能揭示 8.1 级巨震孕育对 NE 向的构造应力传递起了某种“阻隔和调制作用”(东昆仑地块站点过少, 所得应变量值仅供参考); ② 2001—2003 年(4—5 月观测)块体应变总体增强, 主应变分布形态在一些区域明显改变, 反映 8.1 级巨震一年多来, 其动力影响由南至北逐步扩展至本研究区尤其是西部。柴达木地块剪切应变加强(面膨胀逆转为张性, 其间即 2003 年 4 月 17 日块体内部发生 6.6 级地震); 祁连地块基本维持上一时段的剪切变形量(面膨胀逆转为弱张性, 其间其北缘西段发生玉门 5.9 级地震); 而北侧的河西走廊主应变转向, 剪切与挤压变形显著加剧, 数月后(2003 年 10 月 25 日)两地块交界的祁连山断裂带中东段发生民乐 6.1 和 5.8 级地震。本时段测区西部面膨胀应变率呈张性的块体较前两个时段增多, 量值不大, 可能反映 8.1 级巨震后区域应力场调整状态。变形相对显著的块体还有共和地块。

表 2 青藏块体东北缘 3 个时段主要的锁定负位错参数反演结果

断裂	分段	时段	$D/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$\lambda/(\text{°})$	$\delta/(\text{°})$	W/km	L/km	$M_0/10^{17}$ ($\text{N} \cdot \text{m}$) $\cdot \text{a}^{-1}$	S_d/MPa $\cdot \text{a}^{-1}$	锁定特性
阿 尔 金	AB	1999—2001 年	3.4 ± 0.2	45.0 ± 5.4	SE35.2 ± 4.7	32.3 ± 0.8	196.7	8.8	1.7	左旋压性
		2001—2003 年	3.1 ± 0.4	234.1 ± 4.8	43.5 ± 5.3	38.5 ± 0.2	155.7	7.4	1.3	右旋张性
	BC	1999—2001 年	2.6 ± 0.2	319.0 ± 5.4	SE62.9 ± 5.3	23.4 ± 0.8	194.2	4.8	1.8	左旋张性
		2001—2003 年	1.0 ± 0.3	282.3 ± 4.1	78.1 ± 3.4	18.1 ± 1.3	181.7	1.3	0.9	
祁 连 山 北 缘 及 皇 城 — 塔 尔 庄	CD	1993—1999 年	1.7 ± 0.4	350.5 ± 7.0	SW33.1 ± 7.0	8.3 ± 2.4	146.9	0.8	3.2	左旋张性
		1999—2001 年	$1.6(CC_1) \pm 0.5$	54.4 ± 7.6	55.8 ± 7.6	11.2 ± 1.1	111.3	0.8	2.2	左旋压性
			$1.9(C_1D) \pm 0.4$	51.3 ± 9.7	38.8 ± 6.5	12.0 ± 1.1	85.1	0.8	2.5	左旋压性
		2001—2003 年	—	—	—	—	—	—	—	—
EF	1993—1999 年	—	1.8 ± 0.8	53.0 ± 7.0	SW76.3 ± 5.6	6.4 ± 1.6	140.1	0.6	4.4	左旋压性
		1999—2001 年	1.7 ± 0.1	39.5 ± 7.1	53.0 ± 6.5	9.8 ± 0.9	123.9	0.8	2.8	左旋压性
		2001—2003 年	3.2 ± 0.5	103.0 ± 2.9	40.5 ± 5.5	37.9 ± 0.5	122.5	6.0	1.3	压性为主
		—	—	—	—	—	—	—	—	—
FG	1993—1999 年	—	2.4 ± 0.4	23.5 ± 6.9	SW72.5 ± 7.0	21.1 ± 2.4	143.3	2.9	1.8	左旋压性
		1999—2001 年	2.4 ± 0.1	33.5 ± 4.8	31.9 ± 2.2	20.1 ± 1.1	127.3	2.4	1.9	
		2001—2003 年	2.2 ± 0.5	24.0 ± 4.6	35.1 ± 2.8	5.9 ± 0.5	155.7	0.8	5.9	
		—	—	—	—	—	—	—	—	—
GH	1993—1999 年	—	1.7 ± 0.8	51.2 ± 7.0	SW52.4 ± 7.2	11.1 ± 2.4	90.3	0.7	2.4	左旋压性
		1999—2001 年	2.0 ± 0.4	47.5 ± 7.0	64.9 ± 6.5	15.6 ± 0.9	122.9	1.6	2.1	
		2001—2003 年	3.7 ± 0.4	46.1 ± 5.9	63.4 ± 6.2	33.8 ± 1.0	115.1	5.8	1.7	
		—	—	—	—	—	—	—	—	—
香山	HJ	1999—2001 年	1.9 ± 0.4	322.2 ± 6.0	SW31.9 ± 2.7	19.7 ± 1.1	102.7	1.5	1.5	左旋张性
—	JK	1999—2001 年	—	—	—	—	—	—	—	—
天景山	KL	1999—2001 年	1.9 ± 0.4	69.3 ± 5.5	SW71.6 ± 5.4	16.4 ± 1.1	70.2	0.9	1.9	左旋压性
海 原	NM	1999—2001 年	—	—	—	—	—	—	—	—
	MS	1999—2001 年	1.1 ± 0.4	47.9 ± 7.6	SW59.4 ± 9.7	9.2 ± 0.9	91.6	0.4	1.9	左旋压性
	ST	1999—2001 年	1.1 ± 0.4	45.2 ± 7.4	SW45.2 ± 9.6	12.5 ± 1.3	80.0	0.4	1.4	左旋压性
	TR	1999—2001 年	1.7 ± 0.6	68.9 ± 8.1	SW45.4 ± 5.7	7.3 ± 0.8	79.0	0.4	3.6	左旋压性
鄂 拉 山	PQ	1999—2001 年	$2.9(PU) \pm 0.2$	225.6 ± 6.9	NE30.8 ± 5.4	7.7 ± 1.1	114.2	1.0	5.9	右旋张性
			$2.9(UQ) \pm 0.4$	226.4 ± 7.0	71.7 ± 4.3	15.7 ± 1.1	113.6	2.1	2.9	右旋张性
		2001—2003 年	4.1 ± 0.2	302.7 ± 5.0	72.0 ± 4.7	40.1 ± 0.5	215.5	14.0	1.6	左旋张性
		—	—	—	—	—	—	—	—	—
日 月 山	XY	1999—2001 年	0.6 ± 0.2	133.1 ± 8.1	SW45.0 ± 6.0	12.7 ± 1.0	92.8	0.3	0.7	右旋压性
		2001—2003 年	4.2 ± 0.5	242.6 ± 6.0	47.4 ± 5.3	15.6 ± 1.4	154.9	4.1	4.3	右旋张性
	YZ	1999—2001 年	0.5 ± 0.2	134.3 ± 5.4	SW55.6 ± 6.4	14.9 ± 0.9	111.4	0.3	0.5	右旋压性
		—	—	—	—	—	—	—	—	—
庄浪河	NW	1999—2001 年	0.2 ± 0.2	143.1 ± 6.2	SW45.4 ± 6.0	10.6 ± 1.1	122.8	0.1	0.3	右旋压性
	WV	1999—2001 年	2.5 ± 0.4	118.5 ± 7.5	SW37.1 ± 7.4	13.3 ± 1.1	132.7	1.8	2.9	右旋压性
阿尼 玛卿	O ₁ O ₂	1999—2001 年	2.9 ± 0.4	15.2 ± 3.8	S45.8 ± 9.8	7.5 ± 1.0	198.9	1.7	6.1	左旋压性

注: “—”指该断层段位错量取任何大于零的值, 都只能增加理论值和观测值的差异。Matsu'ura 等(1986)、伍吉仓和陈永奇(2000)以及伍吉仓和许才军(2002)认为其反映不锁定。

3.2 块体边界锁定特征

1) 1993—1999 年祁连山构造带 EH 段呈现一定程度的逆冲压性—左旋走滑锁定特征, 2000 年景泰 5.9 级地震发生在其东端附近(表 2).

2) 1999—2001 年, 祁连山构造带(仍以左旋走滑兼压性为主)西段锁定程度略减, 而东段(GH)锁定位错量与能量强度增强; 其东邻的海原断裂锁定程度较弱(西端 NM 段甚至不锁定, 期间发生景泰 5.9 级地震); 阿尔金断裂 AB 段位错量 D (3.4 mm/a)与负位错地震矩 M_0 ($8.8 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m/a}$)全区最高, BC 段 D 与 M_0 相对偏高, 而与其交会的相对弱区(祁连西段, 本时段与中东段的差异增强)2002 年发生玉门 5.9 级地震; 鄂拉山断裂与庄浪河断裂南段 D 与负位错应力降 S_d 偏高; 阿尼玛卿断裂带中段 D 接近 3 mm/a , S_d ($6.1 \times 10^3 \text{ Pa/a}$)全区最高(资料测于 8.1 级震前, 反映出构造运动增强、高应变积累加速的孕震状态)(表 2).

3) 2001—2003 年, 由于柴达木地块内部 SW 反向运动较为显著, 鄂拉山断裂东侧站点(图 1)速率量值相对偏弱, 造成阿尔金断裂 AB 段和鄂拉山断裂锁定方式呈现与 1999—2001 年相反的右旋和左旋, 与 8.1 级地震的同震影响与震后形变调整有关. 阿尔金断裂 AB 段 M_0 ($7.4 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m/a}$)在全区 8 条断裂中居第二(仍反映相对高应变能积累状态); BC 段锁定程度较弱, 祁连山构造带西段 CD 不锁定, 本时段内发生的玉门 5.9 级地震就位于测区西部形变调整和相对松弛的应力背景下, 不锁定的 CD 段和锁定程度微弱的 BC 段的交会区域. 与祁连山构造带西段不同的是, 中段—东段的 EH 仍继续 1999—2001 年的相对闭锁即能量积累状态, 其中的 EF 段和 GH 段 D (3 mm/a 以上)与 M_0 ($6 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m/a}$ 左右)显著增强; 所夹的 FG 段 S_d 增至 5.9 MPa/a . 2003 年 10 月 25 日(测后数月)民乐 6.1 级地震就发生在可能反映应变能积累加速的压性锁定段 EF 与 GH 之间的剪应力强度增强段 FG 北侧. 此外, 本时段鄂拉山断裂 D 超过 4 mm/a , M_0 ($14 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m/a}$)全区最高, 反应变能积累状态(2004 年 1—5 月西侧德令哈地区连续发生 5 次 5 级以上地震, 呈起伏增强态势); 鄂拉山断裂北段、日月山断裂(S_d 偏高)北端及 NE 向延伸到达的祁连山构造带东段, 呈现测区西部 SW 反向与东部 NE—E—SE 向运动的显著差异带, 应有利于潜在错动的发生和能量释放.

3.3 复合模型应变场的时空演化特征

3 个时段面膨胀压性应变速率均沿祁连主边界带连续分布. 2000 年景泰 5.9 级地震发生在 1993—1999 年(震前, 图 3)与构造带走向一致的最大剪应变速率 $6 \times 10^{-8}/\text{a}$ 以上高值区东缘附近的面膨胀张压交会梯度区. 1999—2001 年(图 4)应变速率相对高值区仍分布于祁连山—河西走廊, 2002 年玉门 5.9 级、2003 年民乐 6.1 级地震发生在该时段(震前)祁连带西段与阿尔金断裂交会区、祁连带中东段(与构造带走向一致)的最大剪应变速率 $6 \times 10^{-8}/\text{a}$ 以上高值区, 以及面膨胀绝对值 $2 \times 10^{-8}/\text{a}$ 以上压性高值区边缘. 2001—2003 年(图 5)应变速率增强, 其间发生玉门 5.9 级和德令哈 6.6 级地震; 而 2003 年 10 月 25 日民乐 6.1 级地震发生于本时段(震前的 4—5 月观测)与构造带走向一致的最大剪应变速率 $7 \times 10^{-8}/\text{a}$ 处和面膨胀绝对值 $3 \times 10^{-8}/\text{a}$ 以上的压性高值区内(与 DDA、有限元模拟所得应变高值区较为一致. 见张晓亮等, 2003, 2004 文章).

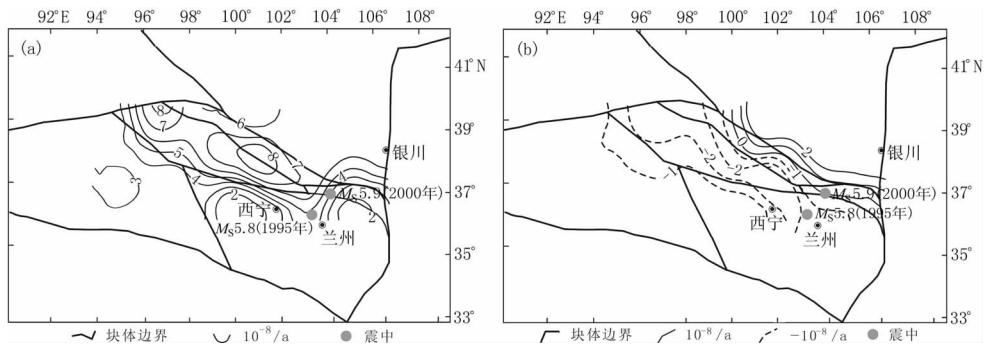


图 3 青藏块体东北缘 1993—1999 年构造应变分布等值线图

(a) 最大剪应变率; (b) 面膨胀率

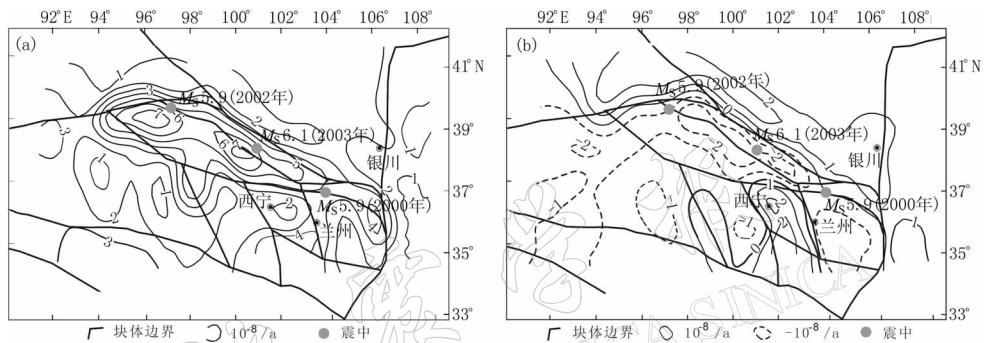


图 4 青藏块体东北缘 1999—2001 年构造应变分布等值线图

(a) 最大剪应变率; (b) 面膨胀率

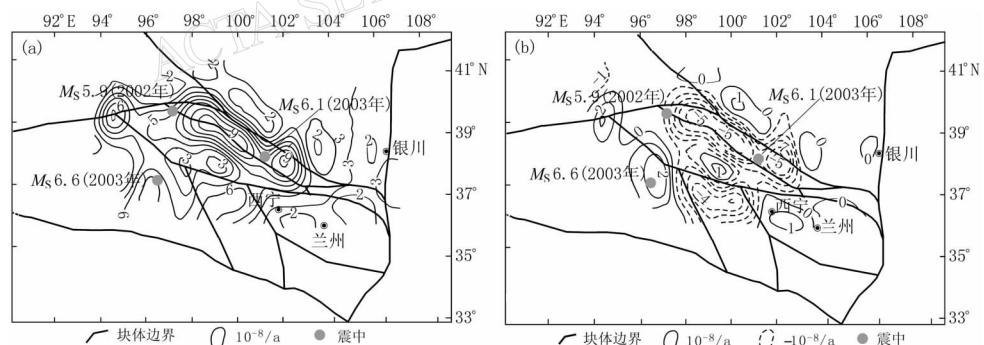


图 5 青藏块体东北缘 2001—2003 年构造应变分布等值线图

(a) 最大剪应变率; (b) 面膨胀率

4 结论

1) 在充分考虑区域构造和块体变形的前提下, 本研究获得的青藏块体东北缘弹性块体边界负位错模型, 较刚性块体假设下的负位错模型更符合该区地壳运动实际; 所得块体边界断层参数与已有构造地质、地球物理成果较为一致。

2) 在 GPS 资料支持的时空范围内, 青藏块体东北缘 6 级左右及 6 级以上地震多发生

在：① 区域构造应变场最大剪应变率或面膨胀率高值区、张压交替变化的高梯度带及其边缘附近（尤其是最大剪应变率 $\geq 6 \times 10^{-8}/\text{a}$ 或面膨胀率绝对值 $\geq 2 \times 10^{-8}/\text{a}$ 、分布较为集中、与构造走向较为一致、方圆百公里左右甚至更大的压性区边缘）；② 显著变形或应变率明显增强的块体及其边缘附近（尤其是最大剪应变率 $\geq 4.0 \times 10^{-8}/\text{a}$ 、面膨胀率绝对值 $\geq 2.0 \times 10^{-8}/\text{a}$ 的强剪切挤压块体边缘及与邻近的压性偏弱甚至拉张的强剪切块体的交会区）；③ 块体边界反映高应变能积累或显著加速的锁定段及其附近，尤其是强锁定段（位错量 $\geq 2.5 \text{ mm/a}$ 、负位错地震矩或应力降 $\geq 4 \times 10^{17} \text{ N} \cdot \text{m/a}$ 或 4 MPa/a ）与邻近的弱锁定段的交会区域、高压性锁定段与张性锁定段之间的交会部位或弱过渡段，以及锁定位错量及特性差异显著、有利于应力集中的断层交会部位。

3) 2001—2003 年负位错反演表明，祁连山—河西走廊、共和为相对高应变块体；祁连山断裂带中段—东段、鄂拉山断裂及阿尔金断裂中段呈相对高应变能积累状况；自鄂拉山断裂北段—日月山断裂北端至祁连山构造带东段呈显著的近 NE 向差异运动分界带，应有利于潜在错动的发生和能量释放。

参 考 文 献

- 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
- 虢顺民, 江在森. 2000. 青藏高原东北缘晚第四纪块体划分与运动态势研究[J]. 地震地质, **22**(3): 219~231
- 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
- 江在森, 张希, 崔笃信, 等. 2001. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报, **44**(5): 636~644
- 李延兴, 黄诚, 胡新康, 等. 2001. 板内块体的刚性弹塑性运动模型与中国大陆主要块体的应变状态[J]. 地震学报, **23**(6): 565~572
- 伍吉仓, 陈永奇. 2000. 一种板块边界断层运动的力学模型[J]. 地壳形变与地震, **20**(2): 8~14
- 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
- 吴云, 申重阳, 乔学军, 等. 2002. 现今地壳运动与地震前兆研究[J]. 大地测量与地球动力学, **22**(1): 22~28
- 张培震, 邓启东, 张国民, 等. 2002. 中国大陆活动地块与强震[J]. 中国科学, D 辑, **32**(增刊): 5~11
- 张希, 江在森, 王琪, 等. 2003. 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, **25**(4): 374~381
- 张希, 江在森, 王琪, 等. 2004a. 青藏高原北部地区构造变形特征及与强震关系[J]. 地球物理学进展, **19**(2): 363~371
- 张希, 张四新, 王双绪. 2004b. 昆仑 8.1 级地震前后地壳垂直运动的负位错模型[J]. 地震研究, **27**(2): 153~158
- 张希, 王双绪, 崔笃信, 等. 2004c. 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, **20**(3): 238~246
- 张晓亮, 江在森, 王双绪, 等. 2003. 青藏块体东北缘及其周围地区现今时空运动变形特征[J]. 中国地震, **19**(4): 377~385
- 张晓亮, 江在森, 王双绪, 等. 2004. 青藏块体东北缘地壳运动与孕震特征[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(4): 76~81
- Matsu'ura M, Jackson D D, Cheng A. 1986. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California [J]. *J Geophys Res*, **91**(B12): 12 661~12 674
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **75**(4): 1 135~1 154

INVERSION FOR NEGATIVE DISLOCATION ON ELASTIC BLOCK BOUNDARIES ALONG THE NORTHEAST MARGIN OF QINGHAI-XIZANG BLOCK AND PREDICTION FOR STRONG EARTHQUAKE LOCATION

Zhang Xi¹⁾ Jiang Zaisen²⁾ Wang Qi³⁾ Wang Shuangxu¹⁾

Cui Duxin¹⁾ Zhang Xiaoliang¹⁾

1) Second Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China

2) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

3) Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

Abstract: On the basis of the velocity field results of horizontal crustal movement obtained from GPS measurements during the periods of 1993—1999, 1999—2001 and 2001—2003 in the northeast margin of Qinghai-Xizang block, and by the inversion of negative dislocation model for the elastic block boundaries, we provide in this paper a qualitative analysis and quantitative description for the difference of motion and deformation between the tectonic blocks and their boundary faults, time-space distribution of tectonic strain field, and locations with highly accumulated strain energy and correlative intensity. Furthermore, taking the regional tectonics and block strain into full consideration, we investigate the common features of background precursors relating to location prediction for $M \geq 6$ earthquakes.

Key words: elastic block boundary; negative dislocation model; horizontal crustal movement; inversion; study of earthquake examples