第 25 卷 第 4 期
2003 年 7 月 (374～381)

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA

Vol. 25, No. 4
Jul., 2003

文章编号：0253-3782(2003)04-0374-08

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*

张 希[1)] 江在森[2)] 王 琪[3)] 王双绪[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 中国地震局分析预报中心
3) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

摘要 通过对 GPS 观测资料的数值模拟，获取 1999～2001 年青藏块体东北缘地区地壳水平运动的非震反位错模型，结合本区视应变场空间分布，研究活动块体及其边界断裂运动、变形特征及应力应变积累部位和强度. 结果表明：① 9 个活动块体呈现东向由偏北至偏南的整体性顺时针运动. 以祁连山—海原断裂为界，两侧块体间的左旋相对运动明显，由西向东呈现走滑兼 NE-NEE 向挤压；② 有 20 条断层段(多数呈压性)不同程度地阻碍块体间的相对运动，其中祁连山断裂中东段(包括与日月山—拉脊山断裂交汇区)及与海原、庄浪河断裂交汇区更有利于应变积累，日月山—拉脊山断裂与柴达木块体北边界交汇区也可能存在一定程度的应变积累；③ 所得活动块体运动速率及边界断裂对块体相对运动的锁定量较 1993～1999 年相应结果有所减弱.

关键词 青藏块体东北缘 GPS 地壳水平运动 非震反位错模型 视应变场
中图分类号：P315.72^{+}5 **文献标识码**：A

引言

尽管强震发生在狭小的震源区，但震源区的形成却受制于大尺度区域现今地壳运动时空过程，与活动地块及地块边界断层的运动及变形有关. Matsu′ura 等(1986)建立的非震反位错模型认为，在当今地壳运动驱动下的各个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. 即视块体边界区域的地表位移为刚性块体的运动减去边界断层对块体相对运动的部分锁定在地表产生的位移. 这样，利用地表位移观测就可以实现整体性研究活动块体及其边界断层运动、变形特征及应力应变积累状况的目的，其确定的块体边界断层带的相对闭锁区，对地震中长期预报很有意义. 因而，该模型被多次应用于美国和中国台湾 GPS、三角网等(Matsu′ura *et al*., 1986；Yu *et al*., 1990；伍吉仓，陈永奇，2000；何玉梅，姚振兴，2002)及华北 GPS(张希等，2002)水平地形变资料的反演分析. 鉴于青藏块体东北缘在中国大陆构造运动及强震预测研究中的重要性，本研究利用 1999～2001 年“中国地壳运动观测网络”及河西(C)网 GPS 资料，联合解算所得水平运动速度场成果，结合最小二乘配置法拟合推估及借助应变张量与位移的偏导关系(张希，江在森，1999)给出的

* 国家重点基础研究《大陆强震机理与预测》项目(G1998040703)与地震科学联合基金项目“地壳运动的非震负位错模型反演与强震地点预测研究”(603001)共同资助.
2002-07-01 收到初稿，2002-11-15 收到修改稿，2003-02-08 决定采用.

http://www.dizhenxb.org.cn

本区视应变场空间分布；利用非震反位错模型初步研究了青藏块体东北缘地区 9 个活动块体及 21 条边界断层段的运动、变形特征和应力应变积累部位及强度，并与 1993～1999 年相应结果作了比较.

1　1999～2001 年青藏块体东北缘地区 GPS 观测资料

目前我们有 1999～2001 年本区 155 个站点的 GPS 水平运动速率资料(ITRF97 框架下相对欧亚板块，王琪研究员联合处理). 其中包括“中国地壳运动观测网络”126 个站点(1999 年首期加密观测，2001 年复测，再加上 2000 年的基本站观测)，以及河西(C)网 29 个站点(1993 年布设，1999 和 2001 年两期复测).

2　1999～2001 年青藏块体东北缘地区非震反位错模型

Matsu′ura 等(1986)假设每个块体边界都可分为上部的脆性区和下部的塑性区，下部的塑性区可自由滑动，而上部的摩擦阻力却限制了块体的相对运动并导致应力应变积聚. 这个脆性区可认为是部分锁定的(相当于边界上起反作用的位错，图 1a). 如果研究区由 p 个刚性块体和 q 个断层段组成，而 GPS 站点 i 位于第 j 个刚性块体上，$V(j)$为此刚性块体速度(用平行于地表的深部水平面上正东、正北向及垂直于此水平面向上的 3 个速度参数描述)，那么，第 i 个站点的运动速度可表示为

$$W^i = V(j) - \sum_{k=1}^{q} U^k(D^k, \lambda^k, \delta^k, L^k) \tag{1}$$

其中，D^k，λ^k，δ^k，L^k 分别为第 k 个断层段(图 1b，Okada，1985)的锁定错动量、错动方向、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). 将 GPS 水平运动资料作为地表位移观测值，通过贝叶斯-最小二乘法(Matsu′ura *et al.*，1986)，可以反演各个刚性块体的运动速度和每条断层段上 4 个参数. 在此基础上还可推算块体间(深部)相对运动量投影于边界的两个分量，即块体走滑率 $s_b = \mathbf{\Delta V} \cdot \boldsymbol{t}$($\boldsymbol{t}$ 为平行于断层走向的单位矢量，以右旋为正)和块体汇聚率 $\mathbf{\Delta V} \cdot \boldsymbol{n}$($\boldsymbol{n}$ 是垂直于走向且平行于地表的单位矢量，以汇聚即压性为正)，以及断层(浅部)走滑率 $s_f = -D\cos\lambda$、汇聚率 $D\sin\lambda\cos\delta$ 和蠕动率 $r_c = s_b - s_f$.

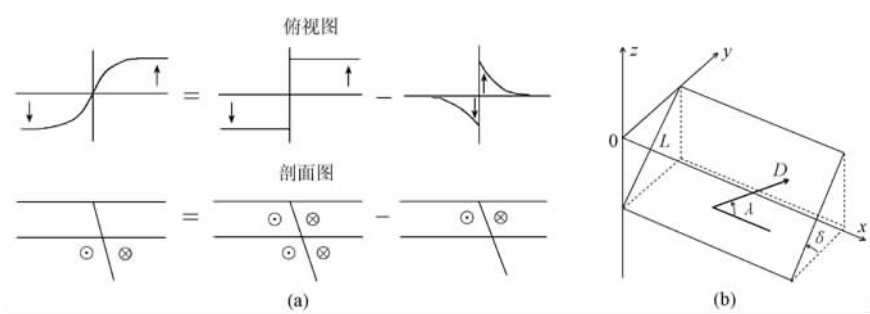

图 1　(a)非震反位错模型(完全锁定的情况)：地表位移(左)为刚性块体运动(中)减去边界位错的锁定在地表产生的位移(右)；(b)弹性均匀介质半空间矩形位错模型

由于块体相对运动在其边界导致的应变能积聚由反位错描述，故本研究用地震矩 $M_0 = \mu L L^0 D y$ 表示锁定强度，并以相应面波震级 $M_S = 0.79\lg(\eta M_0) - 13.84$ 来度量. 这里，

L^0, y, μ, η 分别为断层长度、观测时段(年)、岩石剪切模量(取 $10^{10}\,\mathrm{N/m^2}$)和效率常数(本研究取 0.3～1.0)(申重阳等，2001). 考虑到实际存在的地壳变形可能不仅是块体相对运动中边界断层锁定所造成的边界带显著变形，块体本身还可能存在变形，尤其是较大尺度的块体更是如此(黄立人，王敏，1999)，因而，不论大小块体均各用一组刚性块体平移参数来描述其运动. 对于较大尺度块体，其理论值与实测值的一致性不很理想. 本研究在根据研究区地质构造对块体尽可能细划的基础上，初步考虑将尺度较大、测点较多且存在内部运动差异的块体划分为若干个在其内介质连续的单元. 此外，构成同一块体边界的各个断层或断层的各段也不可能同等程度地阻碍块体间的相对运动. 虽然以往文献中所用的弹性均匀介质半空间矩形位错模型是位错模型中最简单的，但由于整个区域块体及边界断裂总数较多，若位错模型较复杂易导致实际求解困难，所以在测点分布支持的情况下，对断层尽可能分段更为合理和可行. 故本研究根据张培震研究员提供的 973 项目第一阶段中国大陆一二级活动地块划分结果及本区主要断裂分布，将研究区划分为 9 个块体、21 个断层段(图 2). 其中，A—P_1—B—C 为柴达木块体北边界(以宗务龙山—西秦岭北缘断裂为主)，G—P_5—B 为日月山—拉脊山断裂，D—P_6—C 属庄浪河断裂，EF 基本属于阿尔金断裂，E—P_2—G—P_3—H 属于祁连山断裂(西段以祁连山北缘断裂为主，东段以昌马—俄博断裂为主)，H—J—K—L 为海原断裂，F—P_4—R 为龙首山南缘断裂，HR 为黄羊川断裂，ST 属中卫—同心断裂，TL 基本属于青铜峡—固原断裂，LW 属陇县—宝鸡断裂；并将阿拉善、柴达木北缘及鄂尔多斯西缘这 3 个块体划分为 7 个分别在其块体内介质连续的单元，反演效果有所改善，也可以反映出块体变形. 这样，式(1)中 $V(j)$ 即为所在块体或单元的运动速度.

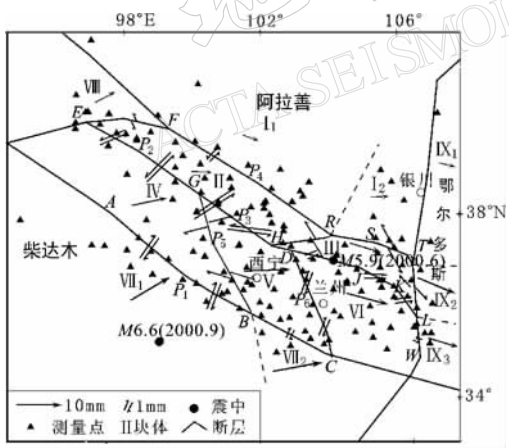

图 2 1999～2001 年青藏块体东北缘地区 GPS 水平运动的非震反位错模型. 单箭头表示块体或单元运动；成对箭头则表示以 D,λ 参数描述的起锁定作用的边界反位错

本研究假设由地质资料已知断层轨迹，即断层起点及终点已知，不作为未知参数反演；同时扣除正好位于断裂及其延伸线上的观测站点. 故尽管模型中断层较多，有些断层甚至相交，却不至于造成严重的奇异问题. 此外，贝叶斯-最小二乘法定义目标函数为 $T=(e^T\boldsymbol{P}^{-1}e+d^T\boldsymbol{C}_d^{-1}d)/2$. 这里，残差 $e=y-\boldsymbol{A}_k x_k$ 为观测值与第 k 次迭代解 x_k(线性化模型)理论值向量之差；$\boldsymbol{P}$ 为观测值方差矩阵，d 为模型参数初值与迭代解 x_k 之差；$\boldsymbol{C}_d$ 为参数初值的先验方差矩阵(由地质或地球物理资料等估计). 因没有观测值间的协方差信息，$\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{C}_d$ 均取为对角矩阵，且对角元大于零，故能够保证每次迭代需求解的线性方程组的系数矩阵 $\boldsymbol{A}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}^{-1}\boldsymbol{A}_k+\boldsymbol{C}_d^{-1}$ 正定，当然非奇异且求解稳定.

3 非震反位错模型模拟结果及区域水平运动、变形分析

本区 155 个点速率观测值 x 轴(正东向)分量的中误差的最小、最大及平均值分别为

1.18，4.18 和 3.12；而相应 y 轴(正北向)分量的中误差的最小、最大及平均值分别为 0.98，3.34 和 2.75. 考察非震反位错模型理论值与观测值之差：对于 x 轴分量，其绝对值的最小、最大及平均值分别为 0.01，5.50 和 1.49，有 67%的测点不到观测值中误差均值的 1/2，而 93%的测点小于观测值中误差均值；相应地，对于 y 轴分量，其绝对值的最小、最大及平均值分别为 0.00，4.14 和 1.03，有 73%的测点不到观测值中误差均值的 1/2，而 96%的测点小于观测值中误差均值. 表明此非震反位借模型对观测值的拟合效果较好. 原观测值中除了有几个点的量值及方向比较杂乱，其相应理论值更均匀、规律些外，理论位移场分布与原观测值分布(图 3，ITRF97 框架下相对欧亚板块)几乎完全一样(限于篇幅，文中略).

印度板块向北推挤是中国西部块体运动及变形的根源. 由图 2、表 1 和 3 可看出，自西向东，本区存在东偏北至东偏南的整体性顺时针运动，各块体的运动存在差异：① 阿拉善块体及鄂尔多斯西缘的北部速率最小. 以祁连山—海原断裂为界，南强北弱，两侧块体间呈现明显的左旋走滑兼挤压的相对运动，其中祁连山断裂两侧块体相对运动较强，表现为 NE-NEE 向挤压，而海原断裂相对较弱，呈现 NEE-近 E 向挤压. 以断裂为界的两侧块体压性相对运动较显著的还有柴达木块体北边界中西段及庄浪河断裂. 而整个区域呈现 NE-NEE 向挤压缩短的态势；② 中卫—同心和日月山—拉脊山断裂两侧块体间存在较显著的局部拉张；③ 龙首山南缘断裂、柴达木块体北边界东段的两侧块体相对运动不很显著；④ 从单元之间相对运动来看，阿拉善块体内部微张，柴达木北缘张性较强，而鄂尔多斯块体西缘的南部挤压.

表 1　青藏块体东北缘反演所得 1999～2001 年块体运动速度

块体单元	正东向速度 /mm·a^{-1}	正北向速度 /mm·a^{-1}	块体单元	正东向速度 /mm·a^{-1}	正北向速度 /mm·a^{-1}
Ⅰ$_1$	3.4±0.4	−1.2±0.3	Ⅶ$_1$	8.7±0.3	5.2±0.3
Ⅰ$_2$	4.0±0.4	0.1±0.2	Ⅶ$_2$	11.0±0.7	2.0±0.6
Ⅱ	4.5±0.2	−0.2±0.2	Ⅷ	4.4±0.5	2.3±0.4
Ⅲ	6.8±0.4	−2.0±0.3	Ⅸ$_1$	3.6±0.5	−0.8±0.4
Ⅳ	7.8±0.3	1.7±0.2	Ⅸ$_2$	8.3±0.8	−3.4±0.4
Ⅴ	10.2±0.2	0.4±0.2	Ⅸ$_3$	6.6±1.0	−2.0±0.3
Ⅵ	9.3±0.3	−2.5±0.2			

图 3 显示本区存在东向由偏北至偏南的顺时针运动，有 34 个点(占总数不到 1/4)东向速率在 10 mm/a 以上，最大达 15.7 mm/a，比 1993～1999 年 31 个点资料结果(江在森等，2001)，其基本形态未变但量值有所减弱；以青藏块体北东边界即祁连山—海原断裂带为界，南侧向东偏北-东偏南、北侧向东-东偏南，南强北弱. 反映边界带的左旋走滑及近 NE-NEE 向挤压的运动特征. 这一点从图 4 所示主应变率分布更能够清楚地看到.

从反映锁定作用的反位错模型参数等(表 2,3)来看，除龙首山南缘断裂东段自由滑动外，其余 20 条断层段(多数呈压性)都不同程度地阻碍块体间的相对运动，两年来锁定强度相当于 M_S4.2～5.6 的面波震级，并且表明：① 压性锁定断裂中，祁连山断裂 4 段呈 2.9～4.6 mm/a 的左旋锁定，错动量及锁定强度等在全区最高，总体上东强西弱. 其次是柴达木块体北边界中西段(右旋，2.7～2.9 mm/a). 庄浪河(右旋，1.9～2.3 mm/a，北段稍强)及海原断裂(左旋，1.2～2.2 mm/a，中段稍强)较前面几条断裂锁定量减弱，尤其是海原断

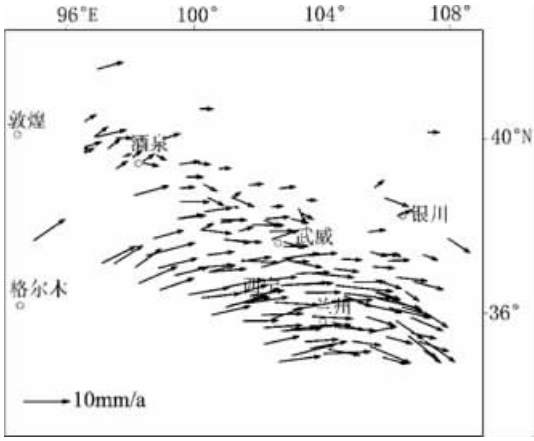

图 3 青藏块体东北缘 1999～2001 年 GPS 水平运动速度图

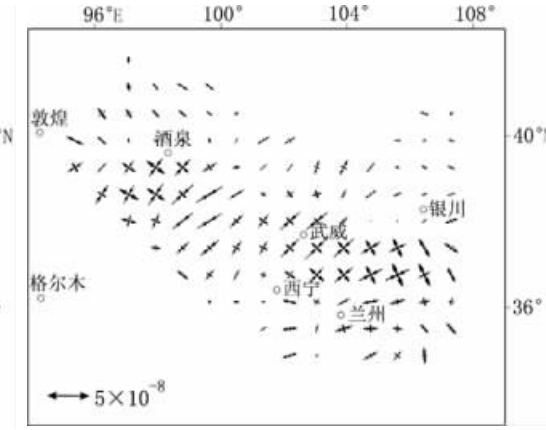

图 4 青藏块体东北缘 1999～2001 年主应变率分布

表 2 锁定反位错参数反演结果

断裂或块体边界名称	断层段	D/mm·a^{-1}	λ/(°)	L/km	δ/(°)	锁定反位错性质
柴达木块体北边界	A_1P_1	2.7±0.2	98.1±5.3	18.4±0.4	SW 61.6±9.5	右旋压性
	P_1B	2.9±0.2	98.7±5.9	23.8±0.4	SW 47.8±8.9	右旋压性
	BC	1.0±0.2	99.6±6.3	34.1±0.2	SW 64.8±8.4	右旋压性
日月山—拉脊山断裂	GP_5	2.4±0.2	255.6±7.1	25.3±0.4	SW 62.0±3.4	右旋张性
	P_5B	2.6±0.2	223.8±8.1	31.2±0.4	SW 37.9±5.4	右旋张性
庄浪河断裂	DP_6	2.3±0.4	137.7±6.0	22.1±0.4	SW 77.8±6.0	右旋压性
	P_6C	1.9±0.2	138.1±8.4	15.7±0.3	SW 72.4±8.4	右旋压性
祁连山断裂	EP_2	2.9±0.1	51.2±6.0	34.7±0.2	SW 35.4±4.8	左旋压性
	P_2G	3.7±0.2	80.8±4.8	21.2±0.5	SW 49.2±7.9	左旋压性
	GP_3	4.6±0.2	68.1±5.9	21.2±0.4	SW 37.0±6.8	左旋压性
	P_3H	4.3±0.1	27.4±8.2	33.5±0.3	SW 64.6±9.3	左旋压性
海原断裂	HJ	1.2±0.2	34.6±6.0	17.3±0.6	SW 66.9±6.0	左旋压性
	JK	2.2±0.3	24.7±7.2	4.5±0.3	SW 40.2±5.3	左旋压性
	KL	1.7±0.3	64.5±6.0	8.4±0.3	SW 50.3±7.5	左旋压性
阿尔金断裂	EF	0.8±0.1	306.0±4.8	20.5±0.6	SE 55.4±6.0	左旋张性
龙首山南缘断裂	RP_4					自由滑动
	P_4F	1.3±0.2	78.7±7.2	24.4±0.3	NE 52.8±9.6	左旋压性
黄羊川断裂	HR	2.1±0.3	295.9±6.0	12.2±0.4	SE 50.8±8.1	左旋张性
中卫—同心断裂	ST	3.0±0.3	322.2±7.2	14.5±0.3	SW 62.0±6.0	左旋张性
鄂尔多斯西缘南段	TL	1.6±0.2	219.3±6.0	23.2±0.2	W 67.2±6.0	右旋张性
	LW	0.6±0.2	71.8±8.4	15.0±0.2	W 56.8±7.2	左旋压性

裂西段，可能反映 2000 年 6 月 6 日景泰 5.9 级地震已释放部分应变能；② 张性锁定断裂中，中卫—同心(左旋)及日月山—拉脊山断裂(右旋)锁定量较强，为 2.4～3.0 mm/a；③ 21 条断层段有 0.1～2.7 mm/a 的蠕动率，相对地质学方法(国家地震局地质研究所，国家地震局兰州地震研究所，1993)、地震分析预报系统 Mapsis 等给出的断层错动结果(祁连山断裂带西段 1～2 mm/a，东段 2.4～4.7 mm/a，海原断裂平均 6 mm/a，中卫—同心 4.5 mm/a，日月山—拉脊山 3 mm/a，阿尔金东段平均 4 mm/a)偏小. 其可能原因：一是 1999

～2001 年形变量较小，二是由于非震反位错模型不同于将地壳运动完全看成是断层活动的叠加的多断裂位错模型(申重阳等，2001)，或是将断层两侧刚性块体的相对运动量算作断层滑动量的作法，三是非震反位错模型还不能有根据地认为所得蠕动率必完全等于观测错动率；④ 从锁定强度来看，祁连山断裂最高，相当于 M_S5.5～6.0 的面波震级. 其中东段稍强于西段，其次是柴达木块体北边界中西段(M_S5.3～5.8). 总体上，祁连山断裂带及其以南和庄浪河断裂及其以西的各断层段积聚能量基本在 M_S5.0 以上，其它区域断层段基本上不超过 M_S5.0，而 20 世纪 90 年代以来本区几次较强震多发生于这两个应变积累相对强区和弱区的交汇区及附近(1990 年景泰 M_S6.2，1993 年祁连 M_S5.9，1995 年永登 M_S5.8，2000 年景泰 M_S5.9 等)；⑤ 从块体及断层活动方向来看，祁连山断裂带东段的左旋压性与庄浪河断裂的右旋压性有利于在祁连、海原及庄浪河断裂的交汇区积聚高应变能(此处也是最大剪应变 5×10^{-8} 以上高值区和面膨胀率 -2×10^{-8} 以上压性较高值区边缘，图 5)，且与海原断裂西段应变积累的强弱差异较大，可能有利于高应变能释放. 此外，祁连山断裂中西段与日月山—拉脊山断裂交汇部位是最大剪应变 5×10^{-8} 以上高值和面膨胀率 -2×10^{-8} 以上压性较高值区边缘，而日月山—拉脊山与柴达木北边界交汇区是面膨胀率 2×10^{-8} 以上较高值区边缘；⑥ 1993～1999 年本区只有 31 个站点，块体运动量较 1999～2001 年高，能够获得的祁连山北缘(其锁定量为西段 3.5 mm/a，中段 4.3 mm/a，东段 6.0 mm/a)、龙首山南缘断裂(锁定量 0.9 mm/a)及日月山—拉脊山(锁定量为北段 3.9 mm/a，南段 3.4 mm/a)断裂的相应锁定量值也高于 1999～2001 年，反位错性质不变.

表 3　由反演结果推算的参数

断裂或块体边界名称	断层段	块体走滑率 /mm·a^{-1}	断层走滑率 /mm·a^{-1}	块体汇聚率 /mm·a^{-1}	断层汇聚率 /mm·a^{-1}	断层蠕动率 /mm·a^{-1}	锁定强度 /10^{18} N·m	面波震级 M_S
柴达木块体北边界	A_1P_1	1.7	0.4	3.1	1.3	1.3	0.23	5.0～5.4
M_S5.3～5.8	P_1B	0.8	0.4	3.5	1.9	0.4	0.25	5.0～5.4
	BC	0.3	0.2	1.7	0.4	0.1	0.15	4.8～5.3
日月山—拉脊山断	GP_5	2.3	0.6	−1.5	−1.1	1.7	0.22	5.0～5.4
裂 M_S5.3～5.7	P_5B	2.3	1.8	−1.5	−1.4	0.5	0.29	5.1～5.5
庄浪河断裂	DP_6	2.4	1.7	1.9	0.3	0.7	0.14	4.8～5.2
M_S5.0～5.4	P_6C	2.4	1.4	1.9	0.4	1.0	0.08	4.6～5.0
祁连山断裂	EP_2	−2.1	−1.8	3.3	1.8	−0.3	0.30	5.1～5.5
M_S5.5～6.0	P_2G	−1.5	−0.6	3.5	2.4	−0.9	0.18	4.9～5.3
	GP_3	−4.4	−1.7	3.7	3.4	−2.7	0.26	5.0～5.5
	P_3H	−4.4	−3.8	3.7	0.9	−0.6	0.40	5.2～5.6
海原断裂	HJ	−2.5	−1.0	0.2	0.2	−1.5	0.09	4.7～5.1
M_S4.8～5.2	JK	−2.4	−2.0	0.7	0.7	−0.4	0.02	4.2～4.6
	KL	−1.8	−0.7	1.8	1.0	−1.1	0.02	4.2～4.6
阿尔金断裂	EF	−0.5	−0.4	−2.5	−0.4	−0.1	0.07	4.6～5.0
龙首山南缘断裂	RP_4	−0.3	0.0	1.4	0.0	−0.3		
	P_4F	−0.3	−0.2	1.4	0.8	−0.1	0.14	4.8～5.2
黄羊川断裂	HR	−2.1	−0.9	−2.1	−1.2	−1.2	0.07	4.6～5.0
中卫—同心断裂	ST	−3.4	−2.4	−0.9	−0.9	−1.0	0.07	4.6～5.0
鄂尔多斯西缘南段	TL	1.5	1.2	−1.4	−0.4	0.3	0.09	4.7～5.1
M_S4.7～5.2	LW	−0.7	−0.2	2.6	0.3	−0.5	0.02	4.2～4.6

http://www.dizhenxb.org.cn

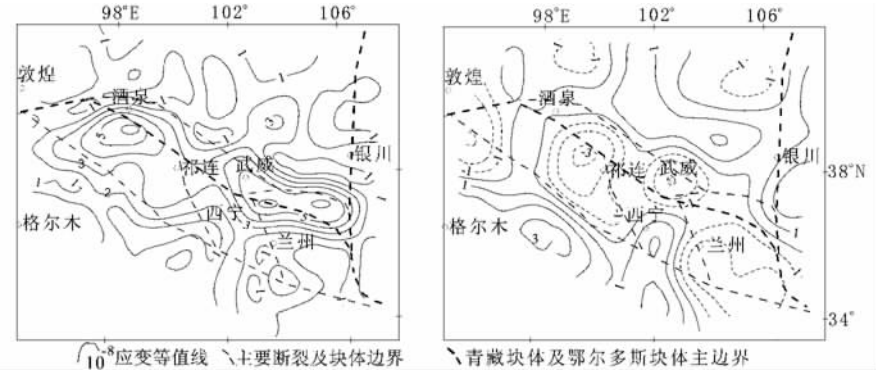

图5 青藏块体东北缘1999～2001年最大剪应变(a)与面膨胀率(b)分布

4 讨论和结论

1) 1999～2001年GPS资料经非震反位错模型反演得出的13个块体或单元的水平运动特征为：在ITRF97框架下相对欧亚板块，呈现东偏北至东偏南的整体性顺时针运动；以祁连山—海原断裂为界，南强北弱，两侧块体间的左旋走滑兼NE-NEE向挤压的相对运动明显，其中祁连山断裂两侧块体相对运动较强；以断裂为界的两侧块体压性相对运动较显著的还有柴达木块体北边界中西段及庄浪河断裂；而整个区域呈现NE-NEE向挤压缩短的态势；中卫—同心和日月山—拉脊山断裂两侧块体却存在较显著的局部拉张；阿拉善块体内部微张、柴达木块体北缘张性较强，而鄂尔多斯块体西缘的南部挤压.

2) 两年来有20条断层段(多数呈压性)的锁定强度相当于M_S4.2～5.6的面波震级. 压性锁定断裂中，祁连山断裂呈2.9～4.6 mm/a的左旋锁定，其锁定强度全区最高，总体上中东段强于西段；其次是柴达木块体北边界中西段(右旋，2.7～2.9 mm/a)；庄浪河(右旋，1.9～2.3 mm/a)及海原断裂(左旋，1.2～2.2 mm/a)再次. 张性锁定断裂中，中卫—同心及日月山—拉脊山断裂的锁定量较强(2.4～3.0 mm/a). 从区域视应变场高值分布及块体、断层活动方向来看，祁连山断裂东段与海原、庄浪河断裂交汇区，更有利于应变积累；而祁连山断裂中西段与日月山—拉脊山断裂交汇区、日月山—拉脊山断裂与柴达木块体北边界交汇区是视应变较高值或其边缘区.

3) 1993～1999年，本研究区块体运动量及能够获得的祁连山、龙首山南缘及日月山—拉脊山断裂的相应反位错参数高于1999～2001年.

本文通过非震反位错模型获得构造块体和边界断裂运动与变形及应变能积累状况的研究尚处于初步阶段，在建模、算法以及资料应用分析上仍有待于今后更深入的研究. 其初步研究结果尚有待未来地震事件的检验.

参 考 文 献

国家地震局地质研究所，国家地震局兰州地震研究所. 1993. 晚更新世以来的断层位错与滑动速率. 祁连山—河西走廊断裂系[M]. 北京：地震出版社，148～174

何玉梅，姚振兴. 2002. 中国台湾南部及其周边岛屿地壳变形的位错模型[J]. 地球物理学报，**45**(5)：638～645

黄立人，王敏. 1999. 构造块体的相对运动和应变[J]. 地壳形变与地震，**19**(2)：17～26

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

江在森，马宗晋，张希，等. 2001. 青藏块体东北缘水平应变场与构造变形分析[J]. 地震地质，**23**(3)：337～345

申重阳，吴云，杨少敏，等. 2001. 华北地块内部主要断层运动模型的 GPS 数据反演分析[J]. 地壳形变与地震，**21**(4)：33～42

王小亚，朱文耀，符养，等. 2002. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变[J]. 地球物理学报，**45**(2)：198～209

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

徐菊生，赖锡安，卓力格图，等. 2000. 中国大陆西部地区现今的块体运动[J]. 地壳形变与地震，**20**(2)：15～23

张希，江在森，张晓亮，等. 2002. 华北地区近期地壳水平运动的非震负位错反演[J]. 大地测量与地球动力学，**22**(3)：40～45

张希，江在森. 1999. 对华北 GPS 监测区近期地壳应变连续分布的估计[J]. 地震学刊，**19**(2)：17～22

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

Yu Shui-Beih, Jackson D D, Yu Guey-Kuen, *et al*. 1990. Dislocation model for crustal deformation in the Longitudinal Valley area, eastern Taiwan[J]. *Tectonophysics*, **183**: 97～109

ASEISMIC NEGATIVE DISLOCATION MODEL AND DEFORMATION ANALYSIS OF 1999 TO 2001 CRUSTAL HORIZONTAL MOVEMENT IN THE NORTHEAST MARGIN OF QINGHAI-TIBET BLOCK

Zhang Xi[1)]　Jiang Zaisen[2)]　Wang Qi[3)]　Wang Shuangxu[1)]　Zhang Xiaoliang[1)]

1) *The Second Monitoring Center*, *China Seismological Bureau*, *Xi′an* 710054, *China*

2) *Center for Analysis and Predition*, *China Seismological Bureau*, *Beijing* 100036, *China*

3) *Institute of Seismology*, *China Seismological Bureau*, *Wuhan* 430071, *China*

Abstract: Through numerical simulation of GPS data, aseismic negative dislocation model of crustal horizontal movement during 1999 to 2001 in the northeast margin of Qinghai-Tibet block is obtained, combined with the distribution of apparent strain field, the features of active blocks and their boundary fractures′ motion and deformation, together with the strain stress′s accumulation position and strength are analyzed. The results show: ① 9 active blocks indicate total eastward clockwise motion from north trend to south trend. Taking Qilian Shan-Haiyuan fracture as boundary, its two sides′ blocks indicate obvious strike-slip and sinistral and NE-ENE compressional relative motion; ② 20 fault sections (most of them show compression) lock the relative motion between blocks to different degree, among those faults, at the joint region of the middle and eastern section of Qilian Shan fracture, Haiyuan and Zhuanglanghe fractures, it is much more helpful to accumulate strain. Moreover, the joint region of Riyueshan-Lajishan and Qaidam block′s northern boundary may have strain accumulation to some degree. ③ Obtained blocks motion and their boundaries′ dislocation are less than related results during 1993 to 1999.

Key words: the northeast margin of Qinghai-Tibet block; GPS; crustal horizontal motion; aseismic negative dislocation model; apparent strain field

http://www.dizhenxb.org.cn