

文章编号: 0253-3782(2002)01-0027-08

青藏块体东北缘现今构造 形变与蕴震特征*

王双绪 江在森 张 希 陈文胜

(中国西安 710054 中国地震局第二地形变监测中心)

摘要 利用青藏块体东北缘近 30 年的精密水准网、跨断层形变测量网复测资料,以及近年来 GPS 观测分析结果,结合地质构造与地震活动,初步研究和探讨了区域构造形变与强震蕴育的一些特征. 结果表明: ① 本区现今构造形变时空分布很不均匀: 主要边界断裂附近构造形变相对强烈, 远离则衰减. 垂直差异运动强度和变形状态随时间演变, 水平运动与变形呈明显的挤压走滑特征; ② 印度板块的北推碰撞引起的青藏块体持续 NE 向挤压运动所产生的构造应力场, 是本区构造形变与地震蕴育的主控应力. 构造形变及地震活动的时空分布演化, 与块体活动及区域构造应力场动态演化密切相关; ③ 构造块体边界地带出现的垂直形变异常隆起与高梯度形变带, 以及显著地断层形变异常, 是块体运动受阻、构造应力场强化而蕴育强震的一个标志, 往往伴随有 6 级左右及以上强震活动, 但地震并不一定发生在运动幅度最大的部位. 断层形变异常呈现“趋势积累—加速—转折”变化特征的地段及附近, 往往是应变能积累、强震蕴育发生的场所.

关键词 青藏块体东北缘 大地垂直形变 水平运动与变形 断层形变异常 蕴震特征
中图分类号: P315.72⁺5 **文献标识码**: A

引言

青藏块体东北缘以构造运动之显著、地震活动之强烈而成为中外地学专家共同关注的热点, 并在地质构造和强震活动研究方面取得了不少成果(丁国瑜, 卢演涛, 1989, 1991; 虢顺民等, 1992; 虢顺民, 向光中, 1993; 虢顺民等, 2000; 侯康民等, 1999; Tapponnier *et al.*, 1990; Gaudemer *et al.*, 1995). 近年启动的国家重点基础研究发展规划《大陆强震机理与预测》项目, 以活动地块动力学假设为主线, 研究大陆强震机理问题, 将青藏块体东北缘确定为一个重点研究区域. 本文在已有研究成果的基础上, 充分利用我们所监测的近 30 年的精密水准网、跨断层形变测量网多期复测资料和 1993, 1999 年 GPS 观测分析结果, 从区域性地壳垂直运动、水平运动和变形综合分析出发, 并结合有形变资料积累以来的门源 6.4 级、共和 7.0 级、景泰 6.2 和 5.9 级、永登 5.8 级等几次中强以上地震过程中的地形变异常, 初步研究和探讨构造块体及边界活动和变形与强震蕴育的关系.

* 国家重点基础研究发展规划项目《大陆强震机理与预测》(G1998040703)资助.
2001-03-16 收到初稿, 2001-08-20 收到修改稿, 2001-11-03 决定采用.

1 地形变观测资料反映的现今构造形变特征

1.1 区域资料概况及处理

青藏块体东北缘精密水准监测网($95^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$, $32^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$), 由布设在构造块体边界带上的祁连山—河西走廊网、兰(州)天(水)武(都)网、西(吉)海(原)固(原)网和宁(夏)北(部)网等彼此相连的测网组成. 自 20 世纪 70 年代初建网以来, 各测区复测周期一般为 5 年左右(有的长达 7~8 年), 如祁连山—河西测区分别于 1971, 1979, 1983, 1989, 1995 和 2000 年进行过较完整复测.

各测区的多期复测资料分别经动态平差获得不同时间段垂直形变速率, 并进行误差估计处理(所有测区各个资料时间段速率中误差均小于相应的形变速率绝对值均值的 1/3)后, 统一用最小二乘配置处理形成速率网格值, 再用 WINSURFER 绘制垂直形变速率动态图象(限于篇幅, 文中只给出位于研究区主要地段的祁连山—河西测区 1971~1979 年、1979~1983 年、1983~1989 年、1989~1995 年和 1995~2000 年 5 个资料时间段的形变图象, 图 1), 并计算了各个测区每一时段平均升降差异速率(巩守文, 1995)、垂直向剪切变形率和扩张变形率(江在森等, 1996)等定量指标(表 1). 这些指标与基准无关, 能够较客观地反映区域垂直形变强弱. 同时, 还处理了全区主要断裂上的 50 余处跨断层场地(每年观测 3 次)1980 年始测以来的形变资料. 另外, 由中国地震局第二地形变监测中心建立的河西 GPS(C)网共有 34 个观测点, 分布于青藏块体东北缘地区, 东西跨度大约 1 200 km, 南北跨度约 450 km, 该网分别于 1993 和 1999 年进行了观测.

1.2 大地形变空间分布与时间演化特征

1.2.1 大地形变空间分布的不均匀性

1) 不同地域垂直运动强度的差异性. 青藏块体东北缘各测区大地垂直形变场定量指标对比表明(表 1): 构造块体边界带不同地域(测区)垂直运动总体强度存在差异. 这种差异与距离印度板块向北碰撞的边界远近有关.

表 1 青藏块体东北缘各测区垂直形变场定量指标与运动状态

测 区	时 段	平均升降差异 /mm·a ⁻¹	剪切变形率 均值/10 ⁻⁶	扩张变形率 均值/10 ⁻⁶	垂直运 动状态
祁连山河西	1971~1979 年	4.13	0.054	0.016	相对逆继承性
	1979~1983 年	8.15	0.120	0.058	继承性
	1983~1989 年	5.25	0.072	0.032	继承性
	1989~1995 年	4.25	0.060	0.018	相对逆继承性
	1995~2000 年	4.76	0.062	0.023	继承性
兰天武	1976~1982 年	6.63	0.081	0.048	继承性
	1982~1987 年	5.62	0.083	0.042	继承性
	1987~1993 年	3.03	0.068	0.033	继承性
	1993~1999 年	3.66	0.045	0.015	相对逆继承性
西海固	1975~1981 年	4.75	0.092	0.045	继承性
	1981~1985 年	5.62	0.107	0.056	继承性
	1985~1991 年	4.23	0.073	0.041	继承性
	1991~1998 年	3.88	0.043	0.014	继承性
宁北	1970~1976 年	2.06	0.065	0.038	相对逆继承性
	1976~1981 年	2.09	0.047	0.037	继承性
	1981~1984 年	3.29	0.079	0.038	继承性
	1984~1988 年	2.53	0.077	0.057	继承性
	1988~1994 年	2.51	0.072	0.043	相对逆继承性

2) 主要边界断裂垂直差异运动的显著性. 祁连山-河西地区垂直形变图象显示: 20 世纪 80 年代以来的垂直形变高值隆起区和差异运动高梯度带, 大都出现在祁连山主构造断裂附近, 形变速率梯度方向与主干断裂走向近似垂直(祁连山构造中东段尤为显著, 最大速率梯度达 $0.45 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$); 远离主要构造边界断裂形变幅度迅速衰减(除个别特殊沉降区外, 形变速率梯度一般在 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 以下)(图 1b~e). 海原-六盘山断裂带和西秦岭断裂带上的垂直形变也有类似特征. 这反映了沿祁连山、海原-六盘山等主要边界断裂的垂直差异运动比块体内部显著得多.

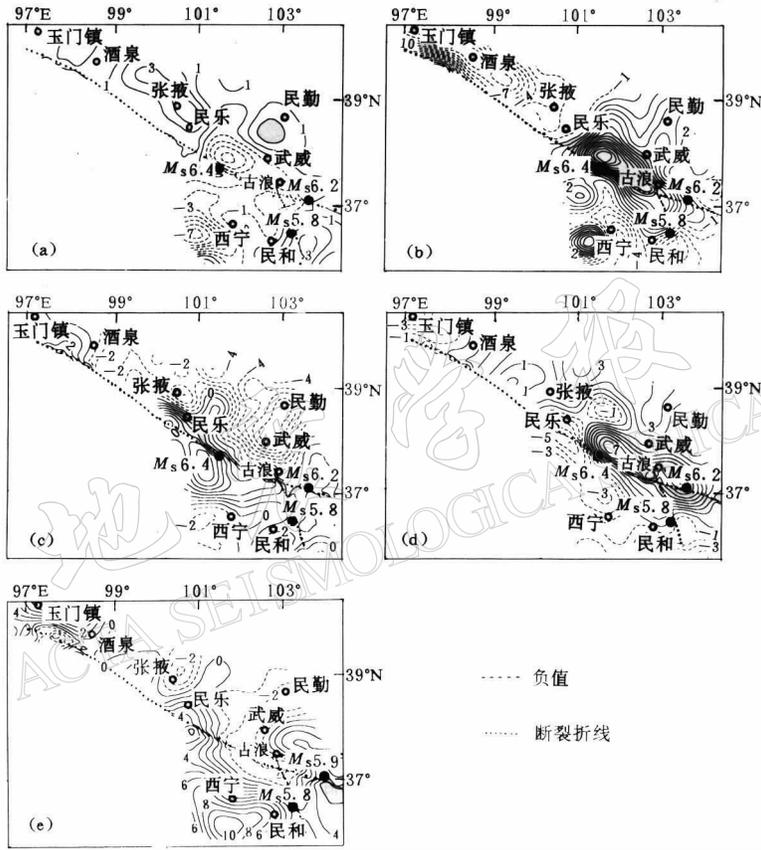


图 1 祁连山-河西测区各时段垂直形变速率等值线图(单位: mm/a)
 (a) 1971~1979 年; (b) 1979~1983 年; (c) 1983~1989 年;
 (d) 1989~1995 年; (e) 1995~2000 年

3) 主要边界断裂不同地段断层活动的差异性. 本研究区全部 58 个跨断层场地(图 2) 资料显示, 不仅主要边界断裂之间断层运动强度存在差异, 而且同一条断裂带的不同段落运动幅度也有较大差别(主要统计了垂直运动). 其中: 祁连山构造带(23 个场地)断层形变速率最大, 且祁连-肃南以西的速率大于东部, 最大速率达 1.10 mm/a , 平均速率为 0.22 mm/a ; 海原-六盘山断裂(16 个场地)次之, 且海原以西活动速率也大于东段, 最大速率为 0.89 mm/a , 平均速率为 0.17 mm/a ; 西秦岭断裂(19 个场地)断层运动速率普遍较小, 最大速率为 0.46 mm/a , 平均速率为 0.12 mm/a .

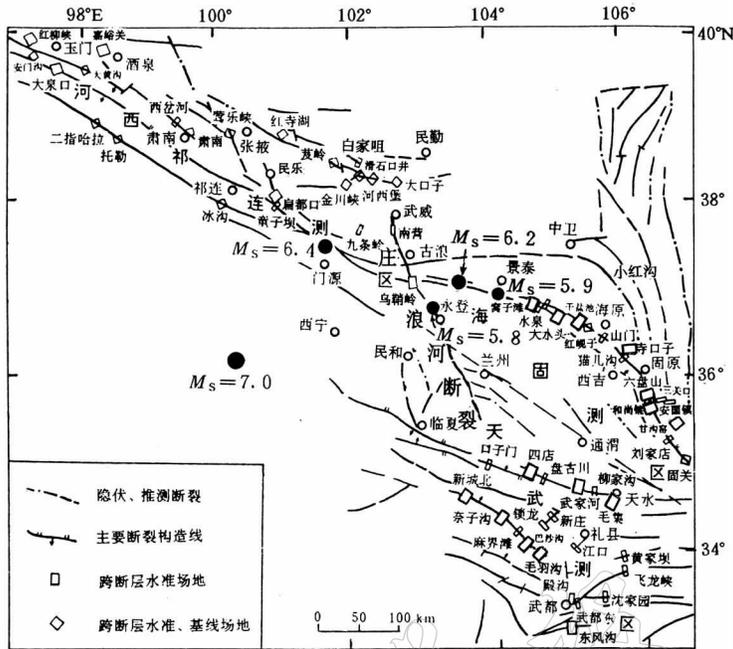


图 2 青藏块体东北缘主要断裂和跨断层场地分布图

4) GPS 观测得到的近期水平运动与变形特征. 根据江在森等(2001)对河西 GPS(C)网 1993 和 1999 年两期 GPS 观测数据的精密解算和分析研究结果: ① 相对于 GPS 网重心的本区内部相对水平运动速率分布显示, 以青藏块体北东边界的祁连—海原断裂带为界, 两侧的块体运动有显著差异: 甘青块体与阿拉善块体之间总体左旋运动近 6 mm/a, 两块体之边界带总体上是左旋走滑兼挤压的压扭性运动, 块体内部存在近东西向张性相对运动(变形); ② 本区视应变场的主压应变优势分布方向为 NE 向. 最大剪应变的高值区分布于青藏块体与阿拉善块体交接带的武威、祁连一带, 极值区位于主边界断裂带北侧, 量值达 7×10^{-8} . 面膨胀压缩高值区位于武威西南侧, 极值区应变值大于 -3×10^{-8} . 另外, 酒泉附近及鄂尔多斯块体西缘也有局部区域面膨胀压缩值在 -2×10^{-8} 以上. 这些也反映了块体边界带及内部水平运动与变形同样存在空间分布的不均匀性.

1.2.2 大地形变与地震活动的时间演化特征

根据地质构造, 青藏块体东北缘为青藏、阿拉善和鄂尔多斯等大的构造块体的汇聚地带, 是印度板块北推碰撞作用下青藏块体北东向挤压运动最强烈的构造区域. 新构造活动以水平挤压为主、垂直升降与之相伴生, 形成山地隆起、盆地拗陷的继承性运动总趋势, 运动总体呈挤压—逆冲—走滑特征(虢顺民等, 2000). 这与区域大地垂直形变的动态变化过程(表 1)和 GPS 水平观测所反映的现今构造形变时空分布较一致. 在印度板块北推这一源动力作用下, 青藏块体的北向挤压, 使本区垂直形变表现为山区上升、盆地下沉的继承性运动. 当继承性运动持续发展, 块体主要边界断裂附近出现垂直形变隆起和高梯度形变带, 反映块体构造活动和应力场增强、应变能积累, 随后出现强震活跃时段, 且强震主要分布在主要边界断裂及附近; 而随着区域应变能较集中释放、构造应力场调整, 构造运动强度和趋势发生微动态变化, 以至出现带有相对逆继承性的运动; 之后, 在持续的边界源

动力作用下, 区域垂直形变又恢复大范围的继承性运动, 开始积累新一轮地震活跃期的构造应力和应变能. 因而, 区域现今构造形变动态变化及强震活动的“平静”与“活跃”交替变化, 与构造块体活动和构造应力场动态演化密切相关. 同时, 强震活跃时段往往滞后于强烈继承性运动时段, 说明强震孕育的应变能积累需要一个过程^①.

2 蕴震过程构造形变异常特征与块体活动状态

2.1 与地震蕴育有关的构造形变异常

2.1.1 区域性构造形变背景与地震

从青藏块体东北缘主要边界地带的祁连山-河西测区垂直形变场动态图象与几次 6 级左右及以上地震分布看: 1986 年门源 6.4 级、1990 年景泰 6.2 级地震, 就发生在 20 世纪 80 年代区域强烈垂直差异运动形成的祁连山主干断裂附近大范围隆起和与断裂走向一致的形变梯度带上(图 1b~c), 同时也是垂直形变场剪切变形率指标高值区(0.15×10^{-6})和扩张变形率指标高值区(0.06×10^{-6})附近. 1995 年永登 5.8 级和 2000 年景泰 5.9 级地震虽未发生在区域总体垂直差异运动较强的时段, 但震中仍处于测区东部天祝-古浪-永登-景泰局部显著隆起区附近的形变梯度带上(图 1d~e); 而且这两次地震均落在本区 1993~1999 年 GPS 水平运动观测所反映的块体边界附近的高应变地带(江在森等, 2001). 另外, 1990 年 4 月共和 7.0 级地震虽未发生在监测网之内, 但从有限的资料反映, 这次地震仍发生在 NW 向的巨型隆起区内部(巩守文, 1993). 由此可见, 强震的蕴育与区域或局部强构造形变和应力场强化背景有关, 6 级左右及以上地震通常发生在与构造相关的垂直形变隆起区、高梯度带以及水平应变高值区附近.

2.1.2 蕴震过程中断层形变异常特征

本区在有断层形变监测资料以来主要构造带上发生的几次中强以上地震前, 均观测到了不同程度和形态的断层形变异常. 其中, 近源区(半径 150 km 左右)断层形变异常往往呈“趋势性积累—加速—转折”的 α , β , γ 相阶段性变化特征. 例如, 门源 6.4 级地震前的扁都口跨断层基线(震中距 80 km, 图 2 和图 3a), 景泰 6.2 级地震前的乌鞘岭水准测段(震中距约 100 km, 图 2 和图 3b), 永登 5.8 级、景泰 5.9 级地震前的窝子滩和大水头水准(永登震中距小于 150 km, 景泰震中距分别为 40 km 和 80 km; 图 2、图 3c~d)等等; 而且从异常加速至转折出现的时间不同的地震不同(有的达 1 年以上、有的只有数月), 但从转折至发震大多只有数月甚至更短. 外围远场区(200 km 以上)则大多呈持续时间短(震前数月)的突跳尖点或“台阶”形异常. 例如, 永登 5.8 级地震前的扁都口水准(震中距约 250 km, 图 2 和图 3e), 景泰 5.9 级地震前的六盘山水准(震中距约 230 km, 图 2 和图 3f)等等; 而且这种突跳形异常的空间分布范围和异常幅度较大. 从上述震例看, 地震并不一定发生在形变幅度最大的部位, 但断层形变异常呈现“趋势积累—加速—转折”变化特征的地段及附近, 往往是强震容易发生的场所.

2.2 蕴震过程构造形变异常特征与块体活动

青藏块体东北缘主要断裂系的主体走向自西段的 NWW 至海原一带逐渐转向 NNW, 地质研究结果和 GPS 观测结果均表明, 这一主边界带的基本活动特征是左旋扭动和逆冲,

① 江在森等. 1999. 我国大陆地壳运动、地震活动特征与地震大形势研究报告. 震情研究, 第 4 期.

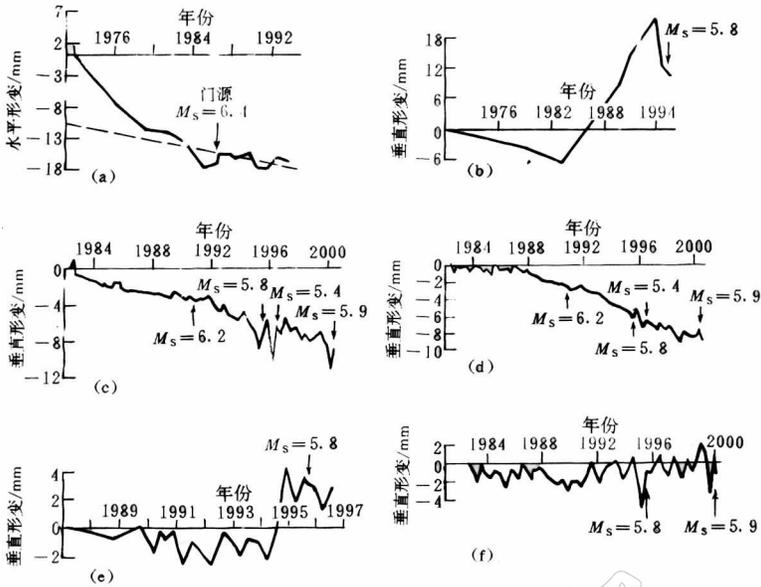


图 3 青藏块体东北缘地区与几次中强以上地震孕育发生过程有关的部分断层形变曲线
 (a) 扁都口跨断层水平形变曲线; (b) 乌鞘岭跨断层高差变化曲线; (c) 窝子滩跨断层垂直形变曲线
 (d) 大水头跨断层垂直形变曲线; (e) 扁都口跨断层垂直形变曲线; (f) 六盘山跨断层垂直形变曲线

近期左旋活动还相当显著。地壳运动是以水平运动为主, 块体之间的相对运动有其固有的趋势。正因为如此, 几年尺度的 GPS 观测结果和几十年尺度的垂直形变才能与千百万年来地壳运动总趋势相一致。从逻辑上分析, 当块体边界断裂相对水平运动比较平稳和顺畅时, 不容易发生具有趋势积累的显著垂直运动; 当块体边界水平运动受阻时, 引起有趋势积累性的显著垂直运动(异常隆起和高梯度带)的可能性较大。尽管目前的观测结果表明块体边界带活动的差异性存在, 由于块体(活动地块)具有相对独立性, 其运动与变形是整体行为, 因而只有那些边界活动受阻处容易形成应力相对集中而可能孕育地震。且较高的地壳应力作用引起的垂直运动形成趋势积累也是很自然的(不能设想由较高的应力水平作用引起的运动以突跳变化并很快就恢复的形式出现)。在应力水平不很高、断层摩擦系数较小的情况下, 当应力场有一增强扰动时, 才可能形成突跳变化的断层形变异常。

根据张国民等(1996)归纳的“场兆”和“源兆”的概念, 永登 5.8 级和景泰 5.9 级地震前出现的较大范围突跳变化的断层形变异常属于场兆, 而具有趋势积累—加速—转折(α , β , γ 相阶段性变化)形态特征的断层形变异常则近于源兆。但出现显著变化并不一定是“场兆”先出现, 因而准同步出现的这类突跳变化的断层形变异常, 同样对地震时间的预测具有参考意义。所以, 一个区域较大范围断层形变异常的出现, 反映了该区域有一次应力场的扰动, 可能蕴育着 6 级左右或以上的地震。判定未来地震的地点应当考虑靠近具有“趋势积累—加速—转折”这种异常变化特征的场地的地段; 对于没有积累背景而出现突跳异常变化的场地, 尽管其异常幅度可能更大, 但那里没有应变积累背景, 可能只是活动块体边界断裂对区域应力场扰动的一种响应(属于场兆)。

然而, 由于蕴震过程本身和构造结构的复杂性, 不同时间段、不同构造部位地震蕴育发生过程构造形变异常的显著程度不同; 加之本区地形变监测的时空密度不足、且受目前

的认识水平所限, 使我们对震前形变异常的识别和震情有效判断十分困难。但是, 我们还是根据区域性垂直形变异常背景(异常隆起、高梯度形变带以及垂直形变信息指标高值异常区)、断层形变异常分布和异常形态(尤其是具有“趋势积累—加速—转折”特征的断层形变异常)相配合, 再结合具体构造以及异常加速、转折时间, 对本区内的永登 5.8 级、景泰 5.9 级地震做出了一定程度的中短期预测(江在森等, 1998; 王双绪等, 2001)。但对门源 6.4 级、景泰 6.2 级这样异常数量少的地震, 对其异常特征的认识只是在震后总结时才得到的。这也反映了构造形变与地震蕴育之间关系的复杂性。

3 讨论与结论

1) 青藏块体东北缘现今构造形变时空分布很不均匀: 主要边界断裂附近构造形变相对强烈, 远离则衰减。垂直差异运动强度和变形状态随时间演变: 在区域性垂直形变上表现为继承性运动总趋势下的微动态变化过程; 在断层形变上表现为“准线性运动—加速—转折—准线性”趋势, 或在一般趋势性基础上的台阶、突跳变化。而块体主边界地带的水平运动与变形呈明显的挤压左旋走滑特征。

2) 印度板块的北推碰撞引起的青藏块体持续 NE 向挤压运动所产生的构造应力场, 是本区构造形变与地震蕴育的主控应力。构造形变及地震活动时空分布演化, 与块体活动及区域构造应力场动态演化密切相关。

3) 构造块体边界地带的垂直形变隆起区与高梯度形变带, 以及显著的断层形变异常, 是块体运动受阻、构造应力场强化而蕴育强震的一个标志, 往往伴随有 6 级左右及以上强震活动, 但地震并不一定发生在运动幅度最大的部位; 断层形变异常呈现“趋势积累—加速—转折”变化特征的地段及附近, 往往是应变能积累、强震蕴育发生的场所。

需要说明的是, 由于本研究区是以水平运动为主、垂直运动为辅的, 但目前尚缺乏积累时间较长、控制范围更大的水平运动资料及深部地球物理资料, 因而, 本研究只是初步的。而对区域构造形变与蕴震机理的更深入的研究, 以及用大地形变资料进行有效的强震预测研究, 仍然是今后研究的一个方向。

参 考 文 献

- 丁国瑜, 卢演俦. 1989. 板内块体的现代运动[A]. 见: 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学图集[C]. 北京: 中国地图出版社, 21
- 丁国瑜, 卢演俦. 1991. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京: 地震出版社, 142~153
- 魏顺民, 陈志泰, 向宏发, 等. 1992. 祁连山北缘活动断裂带及其缩短量的初步估算[A]. 见: 《活动断裂研究》编委会编. 活动断裂研究(2)[C]. 北京: 地震出版社, 135~151
- 魏顺民, 向光中. 1993. 祁连山河西走廊活动断裂系[M]. 北京: 地震出版社, 295~318
- 魏顺民, 江在森, 张崇立. 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): 219~230
- 巩守文. 1993. 共和 6.9 级地震垂直形变场位错模式及其演化特征的研究[J]. 地震学报, 15(3): 289~295
- 巩守文. 1995. 陕甘宁青地区块体交接带上大地垂直形变演化特征与块体运动[J]. 地球物理学报, 38(3): 329~338
- 候康明, 石亚缪, 张忻. 1999. 青藏高原北部 NNW 向构造活动方式及形成年代[J]. 地震地质, 21(2): 127~136
- 江在森, 崔笃信, 王双绪. 1996. 大地垂直形变场信息分离与强震危险区判定[A]. 见: 陈运泰主编. 中国地震学会第六次学术大会论文摘要集[C]. 北京: 地震出版社, 171
- 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, 祝意青, 王庆良, 等. 1998. 永登 5.8 级地震孕育发生过程中的断层形变与重力场动态图像特征[J]. 地震学

报, 20(3): 264~271

- 王双绪, 江在森, 陈文胜, 等. 2001. 景泰 5.9 级地震的断层形变异常及中短期预报[J]. 地震学报, 23(2): 151~158
- 张国民, 石耀林, 李丽. 1996. 动力动态图像地震预报的初步理论探索[A]. 见: 陈运泰主编. 中国地震学会第六次学术大会论文摘要集[C]. 北京: 地震出版社, 79
- Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B, *et al.* 1995. Partition or crustal slip between linked, active fault in eastern Qilian Shan and evidence for a major seismic gap, the "Tianzhu gap", on the Gansu (China)[J]. *Geophys Int*, 120: 599~645
- Tapponnier P, Meyer B, Avouac J P, *et al.* 1990. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 97: 382~403

CURRENT TECTONIC DEFORMATION AND SEISMOGENIC CHARACTERISTICS ALONG THE NORTH-EAST MARGIN OF QINGHAI-XIZANG BLOCK

Wang Shuangxu Jiang Zaisen Zhang Xi Chen Wensheng

(Second Crustal Deformation Monitoring Center, China Seismological Bureau, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on the data from repeated precise leveling and across-fault deformation measurements carried out in recent 30 years and the analyzed results from GPS observations made in recent years along the northeastern margin of Qinghai-Xizang block, and combined with the geological structures and seismic activities, some characteristics in regional tectonic deformation and strong earthquake development are studied and approached preliminarily. The results show that ① the space-time distribution of current tectonic deformation in this area is inhomogeneous with relatively intensive tectonic deformation in the vicinity of main boundary faults and weak deformation in the farther areas. The intensity of vertical differential movement and the deformation status vary with time, and the horizontal movement and deformation are characterized by apparent compression and strike-slip. ② The tectonic stress field generated by the NE-trending continuous compressive movement of Qinghai-Xizang block due to the northward press and collision of India plate is the principal stress for the tectonic deformation and earthquake development in this area. The evolution of space-time distribution of tectonic deformation and seismicity is closely related to the block activity and dynamic evolution of regional tectonic stress field. ③ The vertical deformation uplift and high-gradient deformation zones and the obvious fault deformation anomaly appeared along the boundaries of tectonic blocks can be considered as the indicators of hindered block motion and intensified tectonic stress field for strong earthquake development. Usually, the above-mentioned phenomena would be followed by the seismicity of $M_s \geq 6.0$, but the earthquake might not occur in the place with the maximum movement. The zones with the fault deformation anomaly characterized by "tendencious accumulation—acceleration—turning" and the surrounding areas might be the positions for accumulation of strain energy and development and occurrence of strong earthquakes.

Key words: northeast margin of Qinghai-Xizang block; vertical crustal deformation; horizontal movement and deformation; fault deformation anomaly; seismogenic characteristics