

汶川地震孕震背景与同震变化的铲形断层位错模拟

张 希, 王庆良, 唐红涛, 贾 鹏

中国地震局第二监测中心, 陕西西安 710054

摘 要: 利用 1983—1997、1997(或 2007)—2008 年跨龙门山断裂带长水准剖面观测资料, 借助纯逆断、铲形断层正负位错模型与网格搜索试错法, 模拟 2008 年 5 月 12 日四川省汶川 8.0 级特大地震前闭锁背景与同震变化, 在一定程度上反映出龙门山中央断裂震前应变能积累、震时反弹的特性。

关键词: 汶川地震; 长水准剖面; 铲形位错; 孕震背景

中图分类号: P315.73; P315.727; P315.01 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.02.07

The Simulation on Listric-fault Dislocation Background and Co-seismic Deformation of the Wenchuan Earthquake

ZHANG Xi, WANG Qing-liang, TANG Hong-tao, JIA Peng

Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an, Shaanxi 710054

Abstract: Using long-leveling section observation data crossing Longmenshan fault during the period of 1983-1997 and 1997 (or 2007)-2008, aided by positive and negative dislocation model of pure thrust and spade-fault, in combination with the method for grid-searching and testing, the authors simulated the locked energy background before the Wenchuan Ms8.0 great earthquake of Sichuan Province on 12 May, 2008 and its co-seismic deformation. The energy accumulation before this earthquake and co-seismic rebounding of Central Longmenshan fault are revealed to some extent.

Key words: Wenchuan great earthquake; long-leveling section; listric dislocation; occurrence background

地质资料显示龙门山断裂带以逆冲为主(邓起东等, 2002; 强祖基等, 2009), 由后山、中央、山前主边界 3 条近似平行的铲形断裂构成(图 1 标示地表位置), 《汶川 8.0 级地震科学考察报告》(中国地震局监测预报司, 2008)横跨龙门山断裂人工地震剖面地质图显示地表以下 15~20 km 处倾角变缓, 20~25 km 为低速层, 其上方为脆性层。2008 年 5 月 12 日发生了 1900 年以来首次 8 级以上地震, 地震错动基本体现在属于龙门山中央断裂的北川—映秀断裂和属于龙门山前主边界断裂的灌县—江油断裂上, 尤其北川—映秀断裂错动显著, 地表破裂长(240 多公里), 逆冲错动较占优势、兼一定程度右旋走滑

(Dong et al., 2008; 董树文等, 2008; 魏乐军等, 2008; 王卫民等, 2008; 张希等, 2010), 其中王卫民等(2008)借助双铲形断层模型、利用地震波资料反演了地震错动。中国地震局第二监测中心跨龙门山断裂带自绵竹至茂县, 布设有长水准剖面测线, 累计有 30 多个测点、垂直断层跨度近 60 km, 张四新等(2008)给出了 1983—1987、1987—1997 年两时段断裂两侧差异变化, 而本文中合并计算所得 1983—1997 年即汶川震前达十多年之久的垂直形变结果(遗憾的是由于多种原因, 1997 年后至汶川震前大多数站点未能复测), 更清晰地反映出震前长时间尺度上盘相对下盘显著隆升、断裂附近积聚能量的背景

本文由国家自然科学基金项目(编号: 40974062; 40974005)联合资助。

收稿日期: 2010-11-09; 改回日期: 2010-12-14。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 张希, 女, 1967 年生。研究员。主要从事地壳形变研究与地震预报工作。通讯地址: 710054, 陕西省西安市西影路 316 号。电话: 029-85506601。E-mail: zxivy@yahoo.com.cn。

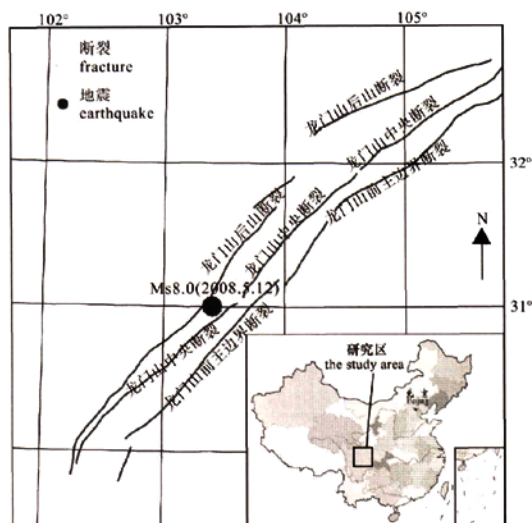


图1 汶川震区及断裂分布

Fig. 1 Wenchuan earthquake area and distribution of fractures

信息;汶川震后,第二监测中心会同第一监测中心观测到截止2008年10月的垂直形变资料,基本反映汶川地震同震变化(中国地震局监测预报司,2008)。本文利用1983—1997、1997(少量点2007年观测)—2008年这两个时段跨龙门山发震构造的垂直形变结果,构建纯逆断、铲形断层位错模型,对震前资料进行负位错模拟,研究其可能揭示的应变积累闭锁的背景信息;对同震变化资料则进行正位错模拟,分析该剖面变形观测反映的地震错动特征,模拟结果在一定程度上反映出龙门山中央断裂震前能量积累闭锁、震时反弹的特性。

1 正、负位错模型原理与意义

Matsu'ura 等(1986)的负位错模型认为受现今地壳运动驱动下的活动地块相对运动在地块边界处有可能受到阻碍或部分阻碍。假设边界下部的塑性区可自由滑动,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累。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(用图2所示弹性均匀介质半空间矩形位错模拟,见 Okada, 1985;图3是完全锁定的情况,见 Matsu'ura 等, 1986, 由图3来看,越靠近断裂,位移变化量逐减、呈“S”形特征)对块体相对运动的锁定或部分锁定在地表产生的位移,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(Matsu'ura 等, 1986; 伍吉仓等, 2000; 张希等, 2003)。针对跨一条

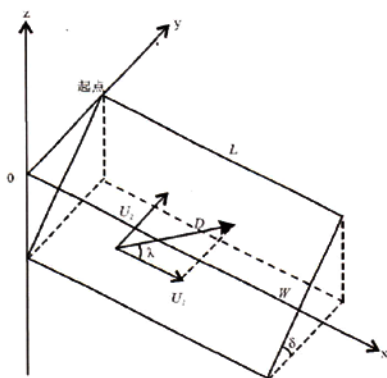


图2 弹性均匀介质半空间矩形位错模型

Fig. 2 Rectangle dislocation model in half space of elastic symmetrical media

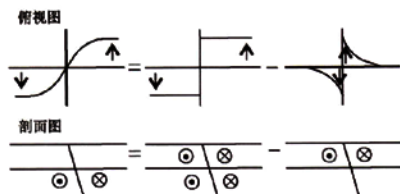


图3 负位错模型(完全锁定): 地表位移(左)为刚性块体运动(中)减去边界位错的锁定在地表产生的位移(右)
Fig. 3 Model for negative dislocation model (entirely locked): the ground surface displacement (left) is the difference between rigid block motion (center) and the ground surface displacement due to locking of boundary dislocation (right)

断裂的长水准剖面垂直形变资料,其模型可以由一条断裂段及两侧块体构成。若测点 (x_i, y_i) 位于第 j 个块体内($j=1, 2$), V_0^j 为块体质心垂直运动位移或速率,那么由 Matsu'ura 负位错模型(Matsu'ura 等, 1986; 张希等, 2004), 第 i 个测点垂直运动位移或速率可表示为:

$$Z^i + \varepsilon^i = V_0^j - F(x_i, y_i, U_1, U_2, \delta, L, W, \varphi, a_x, a_y)$$

上式中左边第1、2项分别为观测与改正值;右边为模型理论值,其中第2项的 U_1, U_2 分别为锁定位错的走滑与倾滑分量; δ, L, W 分别为断层倾角、长度、宽度(图2); φ, a_x, a_y 分别为断层走向(图2中局部坐标系X轴与全局坐标系正北向夹角)及上部起点(全局坐标系)水平坐标。一般情况下,剖面垂直形变资料是相对下盘距断裂最远处站点的变化值,可设定下盘地块垂直运动位移或速率值为零,上盘地块垂直运动位移或速率值则取稍远离断层、变化相对稳定的站点观测值的均值(作为反演时初值,若用试错法即取该值)。本文构建纯倾滑、铲形断层模型,由地表至深部每层1 km 垂向深度的15~20个

Okada 矩形位错拼接而成,最上层位错模型直达地表,其它层位错模型的上界是其上一层模型的下界;每层倾角不变,但不同层倾角随深度变化,即每层倾角值定义为该层中心点垂向深度的函数,关系式为 $A(1 - e^{-b/h})$ 度,这里的 h 为深度, A, b 为待定参数。鉴于跨龙门山断裂剖面测点仅三十几个、一个方向变化值,观测值数量偏少,而层数较多势必导致较多待定参数,故本文采用确定部分参数的网格搜索试错法模拟(有些参数如最上层起点水平坐标、每层相同的断层长度与走向、断层两侧块体运动量事先给定, A, b 层数及倾滑量根据剖面变形情况在指定范围取等间隔点,而其它层中点坐标、宽度、倾角则与 A, b 及层数有关,对每一组参数计算观测值与理论值的差异,尽可能搜索理论与实际观测曲线较为接近的参数值)。对同震变形资料也是如此,假设其同震变化由铲形断层错动产生,同样采用由地表至深部每层仅 1 km 的 15~20 个 Okada 矩形正位错拼接和网格搜索试错法计算。

2 汶川地震孕震背景与同震变化的铲形断层位错模拟

针对 1997—2008 年反映同震变化(相对断裂北西侧即上盘最远处测点最高变化 4.71 m, 1983—1997 年震前十多年尺度的变化最大仅二十几毫米,而我国西部地区不包含同震变形、10 余年的垂直位移也不过十数至数十毫米量级(张希等, 2009));其中少量站点还观测于 2007 年,故基本反映同震变化, 2008 年《汶川 8.0 级地震科学研究报告》中也是将其作为汶川大震同震位移应用的跨断裂剖面垂向变形量,构建纯逆断(走滑量为零)、前述铲形位错模拟地震错动。根据测点垂向变化差异情况,董树文等(2008)、王卫民等(2008)、高锐等(2009)的地质调查结果确定断层轨迹:因测线穿过断层,可取相对上盘最远处变化量最大的测点、与其东侧距其最近的测点之间,且位于实际断层即龙门山中央断裂上的点,即(经纬度 104.4630°E, 31.8262°N, 位于北川附近)向北东和西南各延伸 100 km 与 140 km;走向取与正北向夹角 219.1791°,选取规则既要综合上述文献尽量与龙门山中央断裂正切、靠近青川与映秀,也须将距断裂线很近的几个测点根据其变化差异情况合理地分布在断裂线两侧,最终结果见图 4、图 5 与表 1,反映的基本是龙门山中央断裂的错动特性;深度初定为 15~20 km 即 15~20 层;根据 4.71 m 的最大变化量取位错量 4~8 m 范围内,经搜索试错,获得了较好的拟合效果,所得深度为 18 km,倾滑量

为 5.6 m;倾角随深度变化的关系式为 $88(1 - e^{-9/h})$ 度。进而,在同震变化已计算的基础上进行震前资料的负位错模拟,初定模型为 18 层即 18 km 深度(经试算后即使增加层数影响也很弱,故最终确定为 18 层),断层轨迹不变,倾角与深度关系式中待定参数 A, b 可以调整;为寻求不同深、浅处倾滑量的大体差异,允许在 0~6 km、6~12 km、12~18 km 不同深度变动。最终模拟结果见图 6 与表 2,其中,倾角随深度变化关系式为 $88(1 - e^{-10/h})$ 度,与同震变形模拟结果非常接近(图 7,表 3 显示 18 层倾角的平均差异仅 2.6°、最大 3.4°),基本上反映的是同一条断裂的活动特征;所得 0~6 km 深度倾滑量为 23.5 mm、6~12 km 深度倾滑量为 13.6 mm,相对显著;而 12~18 km 深度倾滑量为 7.0 mm,明显减弱。

综合图 5、图 6 模拟结果,虽然本文所用的,不过是跨龙门山断裂带单剖面 30 多站点、一个方向的变化量,只能在一种相对简化的前提下获得模拟结

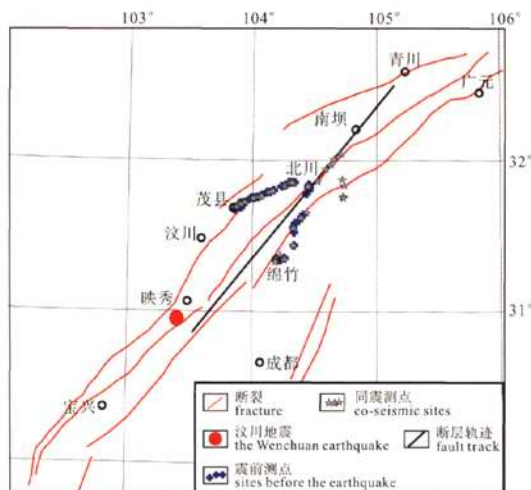


图 4 水准测点分布及断层地表轨迹

Fig. 4 Distribution of leveling stations and fault track

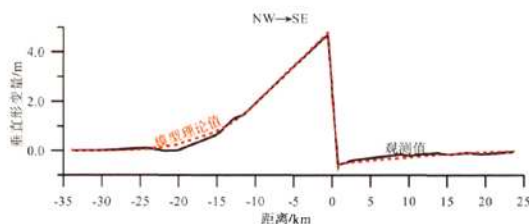


图 5 同震垂直形变(相对断层北西侧最远测点,最高点位于断层以西)与正位错模型拟合效果对比(拟合中误差 0.1m;横坐标为测点相对断层垂向距离,图 6 同)

Fig. 5 Co-seismic deformation (relative to the northwestern side of fault) and positive dislocation simulation result (Standard error is 0.1 m; horizontal coordinate is the vertical distance from fault)

表 1 同震变形拟合效果对照表
Table 1 A comparison of simulation effects of co-seismic deformations

测点点名	经度/°	纬度/°	相对断层垂 向距离/km	相对茂北 1 点位移 观测值/m	相对茂北 1 点位移 模型理论值/m
茂北 1	103.8783	31.6983	-33.9889	0.0000	0.0000
茂北 5	103.9050	31.7217	-33.6559	-0.0027	-0.0026
茂北 6	103.9217	31.7183	-32.1890	0.0046	-0.0074
茂北 7	103.9467	31.7283	-31.0470	0.0008	-0.0098
茂北 11	104.0133	31.7567	-28.1315	0.0316	-0.0038
茂北 12	104.0483	31.7633	-26.0193	0.0793	0.0187
茂北 13	104.0783	31.7683	-24.1637	0.1017	0.0575
茂北 16	104.1350	31.7933	-21.7472	-0.0048	0.1464
茂北 17	104.1667	31.8033	-20.1194	0.0090	0.2402
茂北 21 基	104.2667	31.8383	-15.2334	0.6192	0.7536
茂北 22	104.2967	31.8600	-14.5552	0.7696	0.8579
茂北 23	104.3133	31.8550	-12.9877	1.2499	1.1335
冶城	104.3200	31.8590	-12.7772	1.3035	1.1741
茂北 24	104.3383	31.8600	-11.5062	1.4663	1.4377
北云 1	104.4581	31.8289	-0.5458	4.7114	4.7658
北云 7	104.5938	31.9514	0.7686	-0.6196	-0.5908
白云 20	104.6602	32.0199	0.7956	-0.5815	-0.5857
云绵 3	104.6360	31.9831	1.6201	-0.5045	-0.5269
北云 3	104.5297	31.8704	1.7790	-0.5040	-0.5214
白云 17	104.7193	32.0554	2.6062	-0.3928	-0.4836
北灌 8	104.3950	31.6300	8.7950	-0.1616	-0.3166
北灌 11	104.3317	31.5600	9.0561	-0.1605	-0.3070
北灌 6	104.4427	31.6633	9.9582	-0.2021	-0.2861
北灌 17	104.2283	31.3833	13.8319	-0.0933	-0.1788
北灌 20 基	104.1900	31.3383	14.1598	-0.1187	-0.1678
云绵 8	104.7273	31.8832	15.3248	-0.1587	-0.1581
北灌 15	104.3367	31.4450	17.4914	-0.0878	-0.1112
北灌 18	104.2633	31.3567	18.2763	-0.1028	-0.0922
云绵 9	104.7464	31.8453	19.3914	-0.1458	-0.0845
云绵 12	104.7327	31.7691	23.7603	-0.0448	-0.0242
云绵 11 基	104.7364	31.7723	23.8054	-0.0445	-0.0236

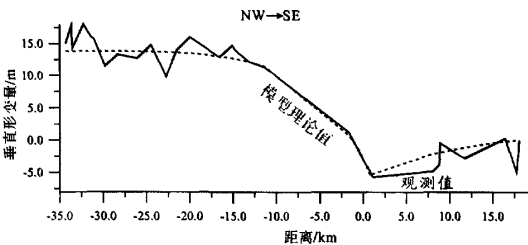


图 6 绵竹—茂县 1983—1997 年跨断裂水准剖面(相对四川盆地即断裂下盘最远处)变化及负位错拟合效果对比(均方差 2.0 mm, 下盘地块垂向运动量为 0, 上盘地块垂向运动量为 14.4 mm)

Fig. 6 Leveling section deformation crossing fault during 1983—1997 from Mianzhu to Maoxian (relative to lower side of fault, Sichuan basin) and negative dislocation simulation result (standard error is 2.0 mm)

果, 鉴于龙门山断裂本身就是逆断层, 本文模拟结果已在一定程度上反映出龙门山中央断裂震前能量积累闭锁、震时反弹的特性。而由王卫民等(2008)文献中图 4 推算, 龙门山中央断裂在深度 15.5 km 以下明显变缓, 7.3 km 深处倾角约 65 度、13.5 km 深处倾角约 50 度; 本文图 7 所示倾角(实线与虚线平均值)在这两处分别为 64.0 和 44.6 度, 差异并不大, 模拟结果还是比较合理的。

3 结论

1983—2008 年跨龙门山断裂带长水准剖面观测资料及铲形断层正、负位错模拟结果, 在一定程度上反映出龙门山中央断裂在汶川 8.0 级大震前能量

表 2 震前变形拟合效果对照表
Table 2 A comparison of simulation effects of deformations before the earthquake

测点 点名	经度/ $^{\circ}$	纬度/ $^{\circ}$	相对断层垂 向距离/km	相对北灌 18 位移观测值/m	相对北灌 18 位移模型理论值/m
黑水环 85 乙上	103.8520	31.6757	-34.3495	15.00	13.84
茂北 5	103.9030	31.7197	-33.6636	17.90	13.84
茂北 4	103.8923	31.7070	-33.5649	14.30	13.84
茂北 6	103.9197	31.7177	-32.2943	18.00	13.85
茂北 2	103.9040	31.6883	-31.3977	16.00	13.85
茂北 7	103.9413	31.7237	-31.1232	15.80	13.85
茂北 10	103.9873	31.7530	-29.7852	11.50	13.85
茂北 11	104.0080	31.7540	-28.3325	13.30	13.84
茂北 12	104.0423	31.7580	-26.0898	12.70	13.81
茂北 13	104.0737	31.7677	-24.4598	14.80	13.76
茂北 15 基上	104.1167	31.7883	-22.7414	9.80	13.68
茂北 16	104.1343	31.7893	-21.5186	14.00	13.61
茂北 17	104.1667	31.8020	-20.0283	16.00	13.49
茂北 20	104.2363	31.8257	-16.5802	12.90	13.01
茂北 21 基上	104.2667	31.8363	-15.0932	14.70	12.69
茂北 22	104.2913	31.8560	-14.6706	13.90	12.59
茂北 23	104.3080	31.8530	-13.2360	12.20	12.16
茂北 24	104.3363	31.8560	-11.3721	11.30	11.43
茂北 28	104.4520	31.8383	-1.6529	1.30	0.80
北川基准点上	104.4550	31.8217	-0.2670	-2.20	-1.88
北灌 2	104.4333	31.7833	0.8404	-4.90	-5.54
北灌 1	104.4530	31.8000	1.1109	-5.70	-5.21
北灌 10	104.3403	31.5833	8.0537	-4.80	-2.06
北灌 9	104.3697	31.6040	8.7617	-3.80	-1.90
北灌 8	104.3903	31.6247	8.8219	-3.10	-1.89
北灌 11	104.3257	31.5560	8.8955	-0.40	-1.87
北灌 12	104.3333	31.5237	11.7203	-2.80	-1.09
北灌 19	104.2237	31.3413	16.4355	0.30	-0.11
北灌 15	104.3353	31.4403	17.7181	-5.00	-0.03
北灌 18	104.2580	31.3540	18.0748	0.00	0.00

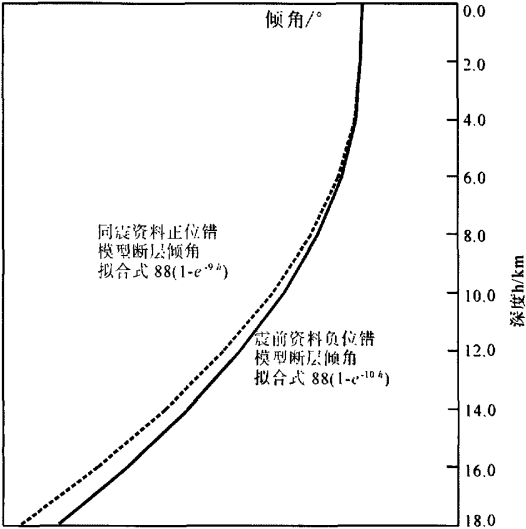


图 7 断层倾角与深度关系示意图
Fig. 7 Relationship between fault depth and dip angle

表 3 正、负位错模型倾角对照表
Table 3 A comparison of dip angles of positive and negative dislocation models

分层	深度(km)	正位错模型倾角 ($^{\circ}$)	负位错模型倾角 ($^{\circ}$)
1	0.5	88.0	88.0
2	1.5	87.8	87.9
3	2.5	85.6	86.4
4	3.5	81.3	82.9
5	4.5	76.1	78.5
6	5.5	70.9	73.7
7	6.5	66.0	69.1
8	7.5	61.5	64.8
9	8.5	57.5	60.9
10	9.5	53.9	57.3
11	10.5	50.7	54.0
12	11.5	47.8	51.1
13	12.5	45.2	48.5
14	13.5	42.8	46.0
15	14.5	40.7	43.8
16	15.5	38.8	41.8
17	16.5	37.0	40.0
18	17.5	35.4	38.3

积累、震时反弹的特性。如果按每年 23.5 mm/14 年(即 1983—1997 年)的闭锁位错量、5.6 m 的地震位错量推算,应变积累时间相当长(3000 年以上)。

参考文献:

- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D 辑), 32(12): 1020-1030.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 吴珍汉, 安美建, 张永双, 杨农, 陈正乐, 雷伟志, 施伟, 石菊松. 2008. 四川汶川 Ms8.0 级地震地表破裂构造初步调查与发震背景分析[J]. 地球学报, 29(3): 392-396.
- 高锐, 熊小松, 李秋生, 卢占武. 2009. 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度[J]. 地球学报, 30(6): 761-773.
- 强祖基, 姚清林, 魏乐军, 曾佐勋, 郭坚峰. 2009. 从震前卫星热红外图像看中国现今构造应力场特征[J]. 地球学报, 30(6): 873-884.
- 魏乐军, 郭坚峰, 蔡慧, 李海兵, 强祖基. 2008. 卫星热红外异常——四川汶川 Ms8.0 级大地震的短临震兆[J]. 地球学报, 29(5): 583-591.
- 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.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 姚振兴. 2008. 四川汶川 Ms8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 51(5): 1403-1410.
- 中国地震局监测预报司. 2008. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地震出版社: 19-21, 39.
- 张四新, 张希, 王双绪, 薛富平, 刘立伟. 2008. 汶川 8.0 级地震前后地壳垂直形变分析[J]. 大地测量与地球动力学, 28(6): 43-46.
- 张希, 江在森, 王琪, 王双绪, 张晓亮. 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, 张四新, 王双绪. 2004. 昆仑山口西 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, 郭良迁, 张四新, 张晓亮, 焦青, 刘峡. 2009. 活动断裂带构造变形动态特征及地震危险性研究[M]. 国家“十一五”科技支撑项目子专题研究报告: 1-109.
- 张希, 王双绪, 张晓亮, 崔萑信, 王文萍, 张四新, 薛富平. 2010. 昆仑山与汶川强烈地震对青藏块体东北缘地壳运动及应变积累的影响[J]. 地球学报, 31(1): 32-42.
- tion, 82(5): 928-938.
- Edited by Monitoring and Prediction Department of CEA. 2008. Science and research report on the Wenchuan Ms8.0 earthquake[M]. Beijing: Seismology Press: 19-21, 39(in Chinese).
- GAO Rui, XIONG Xiao-song, LI Qiu-sheng, LU Zhan-wu. 2009. The Moho depth of Qinghai-Tibet plateau revealed by seismic detection[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(6): 761-773(in Chinese with English abstract).
- MATSU'URA M, JACKSON D and CHENG A. 1986. Dislocation model for aseismic crustal deformation at Hollister, California[J]. J. of Geophysical Research, 91(B12): 12, 661-12, 674.
- OKADA Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4): 1135-1154.
- QIANG Zu-ji, YAO Qing-lin, WEI Le-jun, ZENG Zuo-xun, GUO Jian-feng. 2009. The characteristic of current stress field by Satellite Thermal Infrared Image in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(6): 873-884(in Chinese with English abstract).
- WEI Le-jun, GUO Jian-feng, CAI Hui, LI Hai-bing, QIANG Zu-ji. 2008. Satellite Thermal Infrared Anomaly: a Short-term and Impending Earthquake Precursor before the Wenchuan Ms8.0 Earthquake in Sichuan, China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(5): 583-591(in Chinese with English abstract).
- WU Ji-cang, CHEN Yong-qi. 2000. A physical model for fault movement along plate boundary[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 20(2): 8-14(in Chinese with English abstract).
- WANG Wei-min, ZHAO Lian-feng, LI Juan, YAO Zhen-xing. 2008. Rupture process of the Ms8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(5): 1403-1410(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Si-xin, ZHANG Xi, WANG Shuang-xu, XUE Fu-ping, LIU Li-wei. 2008. Analysis of crustal vertical deformation before and after Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 28(6): 43-46(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xi, JIANG Zai-sen, WANG Qi, WANG Shuang-xu, ZHANG Xiao-liang. 2003. Aseismic negative dislocation model and deformation analysis of 1999-2001 crustal horizontal movement in the northeast margin of Qinghai-Tibet block[J]. Acta Seismologica Sinica, 25(4): 374-381(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xi, ZHANG Si-xin, WANG Shuang-xu. 2004. Negative dislocation model for vertical crustal movement before and after Ms8.1 earthquake in the west of Kunlun Mountain Pass[J]. Journal of Seismological Research, 27(2): 153-158(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xi, WANG Shuang-xu, GUO Liang-qian, ZHANG Si-xin, ZHANG Xiao-liang, JIAO Qing, LIU Xia. 2009. Research on dynamic features of tectonic deformation of active fractures and earthquake risk[M]. The report of subject of State science and technology support project: 1-109.
- ZHANG Xi, WANG Shuang-xu, ZHANG Xiao-liang, CUI Du-xin, WANG Wen-ping, ZHANG Si-xin, XUE Fu-ping. 2010. The influence of the Kunlun mountains and Enchuan strong earthquakes on the crustal movement and strain accumulation in the northeastern margin of Qinghai-Xizang block[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(1): 32-42(in Chinese with English abstract).

References:

- DENG Qi-dong, ZHANG Pei-zhen, RAN Yong-kang, YANG Xiao-ping, MIN Wei, CHU Quan-zhi. 2002. Basic characteristics of active tectonics in China[J]. Science in China(series D), 32(12): 1020-1030(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, LONG Chang-xing, WU Zhen-han, AN Mei-jian, ZHANG Yong-shuang, YANG Nong, CHEN Zheng-le, LEI Wei-zhi, SHI Wei, SHI Ju-song. 2008. Surface rupture investigation of the Wenchuan Ms8.0 earthquake of May 12, 2008, west Sichuan, and analysis of its occurrence setting[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(3): 392-396(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, ZHANG Yue-qiao, WU Zhen-han, YANG Nong, MA Yin-sheng, SHI Wei, CHEN Zheng-le, LONG Chang-xing, AN Mei-jian. 2008. Surface Rupture and Co-seismic Displacement Produced by the Ms 8.0 Wenchuan Earthquake of May 12th, 2008, Sichuan, China: Eastwards Growth of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica-English Edi-