

昌马地震应力场及发震机制研究^①

李步云

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文利用前人大量的地质、地球物理资料,建立了昌马盆地的立体地质模型,利用三维有限元法研究了1932年昌马7.6级地震前后应力场的变化及其昌马地震成因机制,结果表明:

(1)震源断层走向与利用主压应力推测的断裂走向相差 65° ,可能是由于地壳浅部旋转的主压应力与深部北东方向的主压应力所产生的力矩使块体发生旋转所致,其枢纽点即为震源所在;同时,该旋转也导致了地震断层和震源断层在力学性质和几何性质上的不同。

(2)昌马地震是在闭锁、贯通和块体旋转联合作用下形成的。

(3)区域应力场与局部应力场不一致、应力松弛单元的出现可能与地震的孕育、发生有关。

(4)断裂活动的不均一性与平面最大剪应力分布不均匀成正相关,且各断裂均以相对左旋走滑兼挤压为特征,但是其走滑量的分布是不均匀的。

关键词: 应力场 昌马地震 块体旋转 地震成因 三维有限元分析

1 引言

昌马盆地位于北祁连地向斜的西端,以阿尔金断裂、祁连山北缘断裂西段及野马山——大雪山前断裂为界,其间发育有昌马活动断裂带,1932年昌马7.6级地震就发生在该带中段和东段之间。对于昌马活动断裂带,许多人做了不同程度的研究,但对构造应力场的研究只是定性的,对地震机制的解释还不令人满意。这涉及到昌马地震的成因,为了更好的弄清昌马地震形成机制等一系列问题,笔者利用三维有限元法研究了昌马7.6级地震前后应力场的变化,系统地研究了昌马地震的成因机制,这对探讨大震发震机制及潜在震源区的划分有一定的意义。

2 昌马盆地地球物理场特征

昌马盆地处于莫氏面等深线由北东东转为北西西的转弯部位,地壳厚度约55km(图1)。根据文献[2]所提到的有关昌马断裂附近地区 ΔT 化极上延20km磁异常图分析认为昌马断裂带是一条倾角较大的超岩石圈断裂,阿尔金断裂带和祁连山北缘断裂带均为深大断裂,说明这三条断裂带均已切穿地壳。昌马地区在10—20km的范围内,存在中—上部地壳

^① 本文为作者硕士学位论文的一部分。

低阻层,电阻率为 $1.5\Omega \cdot m$,低阻层的位置与昌马7.6级地震的震源深度相吻合,从某一侧面反映了低阻层的存在与地震的关系。据文献[7]利用天然地震的反射波和首波测定的昌马地区平均地壳厚度为 $52.6km$ 。景泰地区和昌马盆地同位于北祁连地向斜大地构造单元内,地壳结构具有相似性,因此可以利用景泰地区的波速资料分层,同时也参考了甘肃地区地壳速度分布^[7](这里没考虑沉积层,因为沉积层对波速分布影响很小),将昌马盆地的地壳分为三层,即 $0-20km, V_p=6.0km/s; 20-25km, V_p=8.0km/s; 25km$ 以下, $V_p=6.5km/s$ 。 $0-25km$ 为花岗岩层, $25km$ 至地壳底部为玄武岩层,这与地壳岩性分布相一致。取花岗岩 $\rho=2.7g/cm^3, \nu=0.27$ 和玄武岩层 $\rho=2.9g/cm^3, \nu=0.29$,由弹性模量公式 $E=V_p^2\rho(1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu)$ 计算得到各层的弹性模量(表1)。考虑到震源深度,取研究深度为 $40km$,即震源深度的二倍。

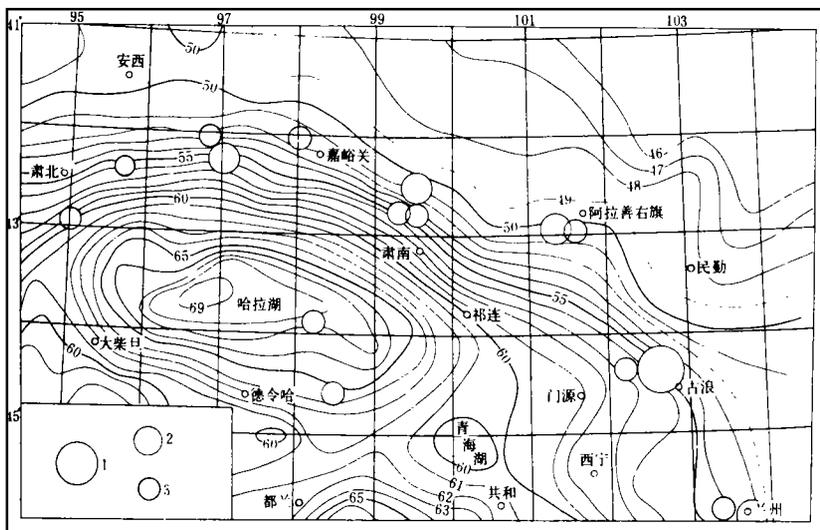


图1 昌马断裂附近莫霍面等深线图(据侯珍清等,1993)

①8级;②7-7.9级;③6-6.9级

Fig. 1 Isobath diagram of Moho surface near the Changma fracture zone.

表1 昌马盆地材料参数

材料名称	弹性模量 $E(10^4MPa)$	密度 $\rho(g/cm^3)$	泊松比 ν
第一层 $0-20km$	7.8	2.7	0.27
第二层 $20-25km$	14.0	2.7	0.27
第三层 $25-40km$	9.3	2.9	0.29
阿尔金-祁连山北缘断裂带	3.9	2.3	0.23
昌马断裂带	0.39	2.3	0.23

由此可见,昌马盆地地壳厚度为 $53.8km$,各断裂均为深大断裂带,已切割到上地幔。昌马盆地有一高速层,该层的存在,使得应力梯度变大,这是否与地震有关?从后面的分析可知,这一梯度的转换面可能就是块体旋转导致破裂的枢纽点。

3 昌马盆地立体地质模型

本节主要是在综合地质、地球物理资料的基础上,合理地建立昌马盆地的立体地质模型(图 2)。模型研究深度为 40km,即不超过地壳厚度而且是震源深度的 2 倍,因而可将地壳看作弹性材料并利用吴氏网使各断裂合理地线性延伸到不同深度。

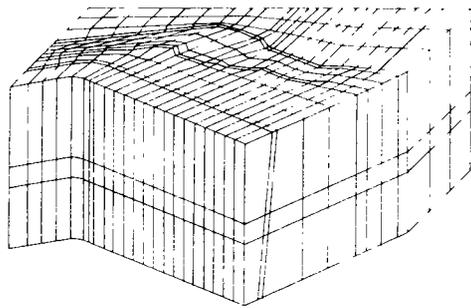


图 2 昌马盆地立体地质模型

Fig. 2 A space geologic model of the Changma basin.

善地块、塔里木地块及昌马盆地。

昌马盆地立体地质模型以层状断块结构为主要形态特征,即平面上被切割成断块,纵向上分割成层状结构。层状断块结构除表层外,其余各层均是断裂带线性延伸切割而成的,虽然随着深度增加,地温越来越高,脆性减弱,韧性增强,倾角变小,但在 40km 深度范围内,对深大断裂做这样的近似是合理的。波速层状分布的不均匀使得弹性模量层状分布不均匀;在平面上,断裂带的存在使得弹性模量在平面上和纵向上的分布具有不均匀性,正是这种不均匀性结合外力作用,造成区域应力场和局部应力场的不一致性,使各断裂的活动程度有一定的差异。另外,为了计算方便,在断裂的交汇部位和端部做了物理上的处理。合理地建立立体地质模型,使其更接近实际情况,这样可以提高计算结果的可靠性。

4 昌马地震构造应力场的数值模拟

构造地震是由于构造应力场的变化引起各断裂间及地壳受力状况的改变导致岩体破坏或断裂活动而发生的。地震的发生与介质性质、介质结构及应力场密切相关。三者相互协调,并遵循岩石破裂准则,耗能最小准则和各断裂块体平衡准则,决定了现今构造应力场特征及地震时空分布特征。由此可见,研究构造应力场对探讨地震的成因、迁移及危险区划等具有重要意义。

4.1 数值模拟的总体方案及三维有限元程序

有限元法就是将一个连续体用假想的剖面分成有限(通常是一个很大的数目)个单元,通过构造插值函数,利用节点的平衡条件求得节点上位移的近似值,从而解得单元的应变和应力^[3]。由此可见,在进行离散化之前需选定构造骨架,确定材料的力学参数,给出一定的边界条件。模拟方案见图 3。由构造地质、地震地质、地球动力学、地球物理学及岩石力学组成的信息系统见图 4,这为数值模拟提供了可靠的依据。

昌马盆地立体地质模型划分为 792 个单元,1196 个节点,各层之间对应节点号相差 23,在同一层上相邻行对应节点号相差 92。阿尔金—祁连山北缘断裂带的弹性模量等于第一层

地壳的一半。由于昌马断裂带胶结程度较差,弹性模量取为阿尔金—祁连山北缘断裂的十分之一。边界作用力本来是不均匀分布的,但考虑到该区应力场是大区域应力场的一部份,因而可以近似为均匀分布,作用力的大小以不致使岩石在边界处破坏为限即作用力小于岩石的抗压强度,经试算取为 36MPa,这小于花岗岩的抗压强度 37—379MPa 和玄武岩的抗压强度 150—350MPa^[4]。作用力方向经试算并考虑地质资料,确定为 N45°E。本文采用位移条件来模拟震后应力场,各节点位移见表 2。将实测地震形变带位移的一半分解在 X、Y、Z 三个方向上,从而得到各节点位移。模型北部边界节点全部固定,塔里木地块的西部边界和阿拉善地块的东部边界也全部固定,模型东南为自由边界,阿尔金断裂南侧的西部也为自由边界;在 40km 深度上各节点在 Z 方向上无位移。计算程序见图 5。

4.2 数值模拟结果分析

在模拟之前,先计算了几个参数,以便模拟估计。据文献^[2]估计,断层错动释放的能量 $E_T = 4.0 \times 10^{23}$ 尔格,地震波释放的能量 $E_B = 1.58 \times 10^{23}$ 尔格,释放的总能量 $E = E_T + E_B = 5.58 \times 10^{23}$ 尔格,震源体积 $V = 9.0 \times 10^{19} \text{cm}^3$,应力降 $\Delta\sigma = 6.4 \times 10^7$ 达因/厘米²;据时振梁(1964)

估计震源体积 $V = 1.4 \times 10^{19}$ 厘米³,进而算得应变能密度 $W = E/V = 0.64 \times 10^4 - 4.0 \times 10^4$ 尔格/厘米³。据文献^[1]中的青藏高原东北部弱震活动图得知昌马盆地弱震主要分布在昌马断裂带西段的西南及中段以南。在试算过程中,要求积累的应变能密度大于 W,应力、应变

能密度达到相应的数量级。在此前提下,利用公式 $\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2})^2 + \sigma_{xy}^2}$,

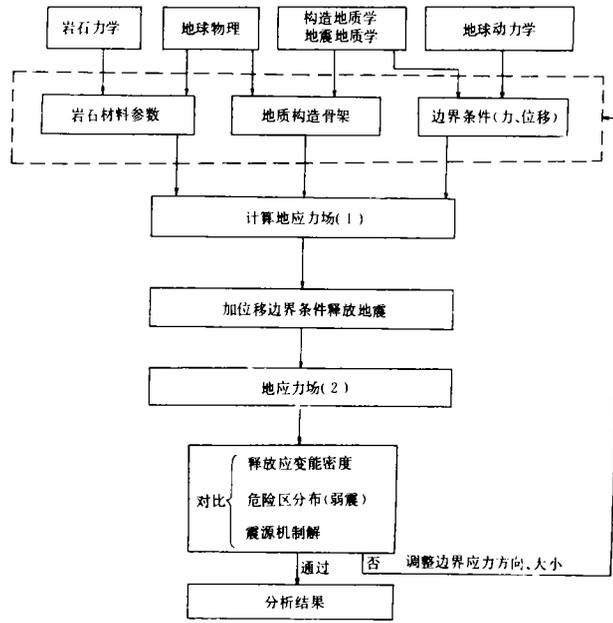


图3 数值模拟方案框图
Fig. 3 Block diagram of numerical simulation.

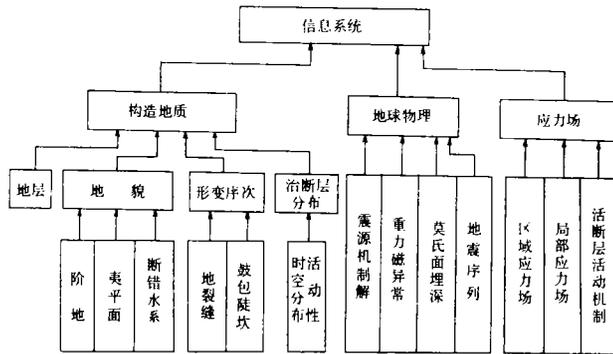


图4 信息系统框图
Fig. 4 Block diagram of information system.

$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ 和 $tg2a = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}$ 计算得到 $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{max}, a$, 并据此分析了弱震、强震的分布, 震源应力场和震中区局部应力场的特征以及各断裂带的活动程度等。计算中选取了两种模型, 即直立模型 I 和倾角模型 II, 分别计算了发震前后的应力场, 做出各层平面最大剪应力分布图和第一层主压应力方向及其位移矢量分布图。现只给出与实际情况较吻合的倾角模型 II 的计算结果(图 6-10)。

下面结合前人所做的工作评价了本次模拟的可靠性并给出了主要模拟结果:

兰州地震研究所陈志泰研究员等对昌马地震破裂带进行过系统研究, 认为第四纪以来昌马断裂带的活动在空间上具有明显的分段性, 其西段以挤压逆冲为特征, 中段和东段以左旋走滑运动为主兼有一定程度的挤压。这与模拟结果相吻合。弱震主要分布在昌马断裂的

表 2 节点位移

节点号	381	382	383	384	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	557	558	559	560	561	562	563	564
X(厘米)	0	0	0	0	282	191	121	147	173	148	84	80	0	0	0	0	-282	-191	-121	-147	-173	-148	-84	-80
Y(厘米)	0	0	0	0	-103	-110	-70	-85	-100	-26	-15	-29	0	0	0	0	-103	110	70	85	100	26	15	29
Z(厘米)	90	120	65	45	95	60	25	33	40	40	45	45	-90	-120	-65	-45	-95	-60	-25	-33	-40	-40	-45	-45

西南端, 有少部分分布在西段和中段连接点以南, 这与该区域平面最大剪应力值较高的模拟结果相一致。谢富仁和刘光勋研究员(1989)利用采得的 198 个断层擦痕数据反演了阿尔金地区的应力场并认为阿尔金断裂有两个活动期: 第 I 期为上新世至更新世主压应力方向近南北向, 逆断层为主, 兼有左旋走向滑动分量; 第 II 期为更新世至今, 主压应力方向为北东-南西方向, 左旋走滑运动为主兼有逆断层运动分量^[5]。祁连山北缘断裂带西段也是以左旋走滑兼逆冲为特征, 但走滑量很小。笔者通过模拟发现上述三条断裂带均以相对左旋走滑兼挤压为特征, 但走滑量的分布是不均匀的。另外, 应变能密度, 应力降也达到了同一数量级, 其弱震的分布与平面最大剪应力在昌马断裂西端的西南和中段以南较高这一模拟结果相一致。图 7 和图 9 与文献[1]求得的祁连山北部及邻近地区震源机制解的主压应力方向较吻合。总体

看来, 本次模拟的结果是可靠的。现将模拟结果归纳如下: (1) 昌马断裂西端的西南和中段以南都有相应的高剪应力区。第二层平面最大剪应力值比第一层相应单元高 10-20MPa。(2) 昌马、阿尔金和祁连山北缘断裂带均以相对左旋走滑兼挤压逆冲为其运动学特征, 但走滑量的分布是不均匀的。(3) 昌马断裂各段之间间隔部位平面最大剪应力很高, 而且多峰值,

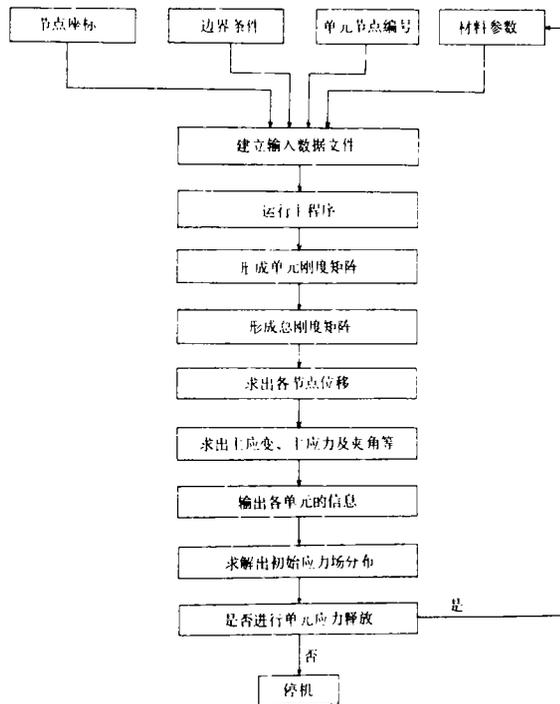


图 5 计算程序流程图

Fig. 5 Flow diagram of Computation program.

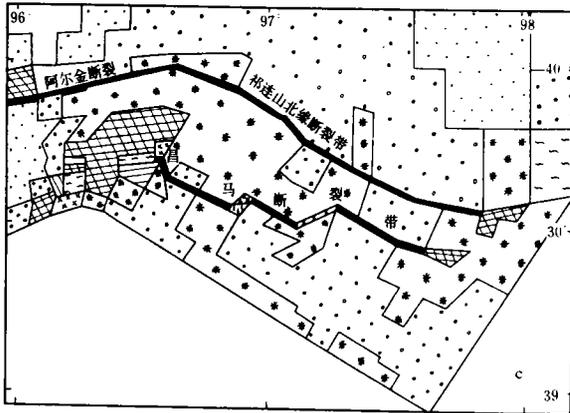
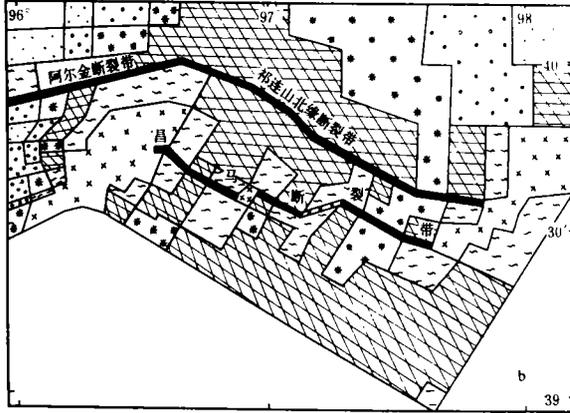
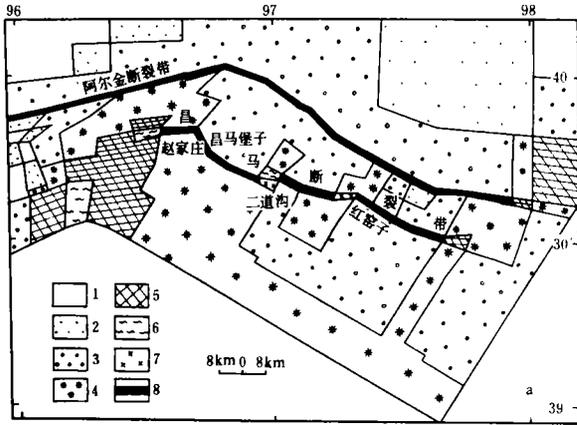


图6 模型Ⅱ—震前昌马地区 τ_{max} 分布图

- 1. $\tau=0-1$; 2. $\tau=1-2$; 3. $\tau=2-3$;
- 4. $\tau=3-4$; 5. $\tau=4-5$; 6. $\tau=5-6$;
- 7. $\tau>6$; 8. 断裂带

a. $h=0-20\text{km}$; b. $h=20-25\text{km}$; c. $h=25-40\text{km}$

Fig. 6 Model I: the distribution of τ_{max} before the Changma earthquake.

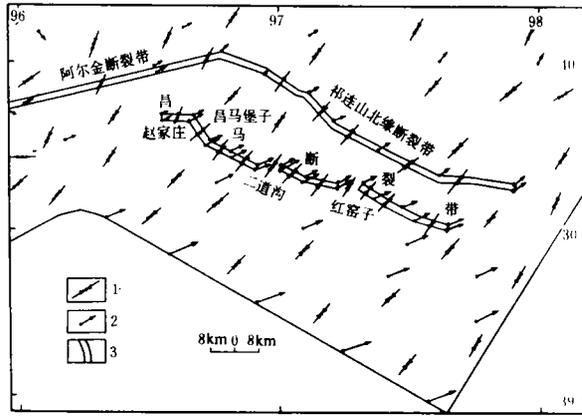


图7 模型Ⅱ—震前昌马地区平面主压应力方向及位移矢量分布图 (0—20km)

- 1. 主压应力方向; 2. 位移矢量; 3. 断裂带

Fig. 7 Model I: the distribution of plane principal stress direction and displacement vector before the Changma earthquake.

这些部位即为闭锁点,因此该断裂带具有多点闭锁特征。(4)用地震位移模拟释放后发现在红窑子北部出现主压应力方向顺时针旋转变化的,但对其余部位影响不大(图7、9)。(5)在中段以南0—20km深处平面最大剪应力值较高,在20—25km深处,出现了应力松弛单元(图8),该单元的出现可能与下次孕震有关。(6)昌马盆地整体受到北东向挤压力的作用,质点向北东迁移,其位移量南部大于北部。(7)断层倾角可以缓冲对昌马盆地的挤压,增大了垂向应力和位移,但对平面最大剪应力的展布方向影响不大,只是使其值相应减小。(8)平面最大剪应力在各研究断裂带上分布不均匀,这与活动程度和分段性成正相关。

4.3 1932年昌马地震机制分析

1932年12月25日在昌马盆地发生了7.6级强烈地震,仪器震中为

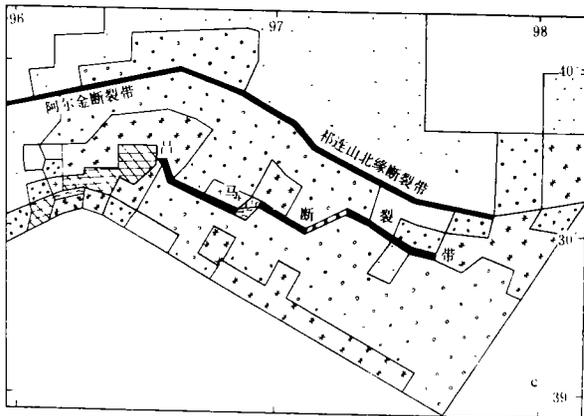
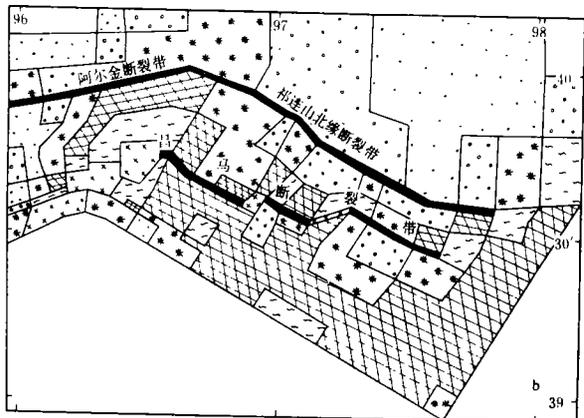
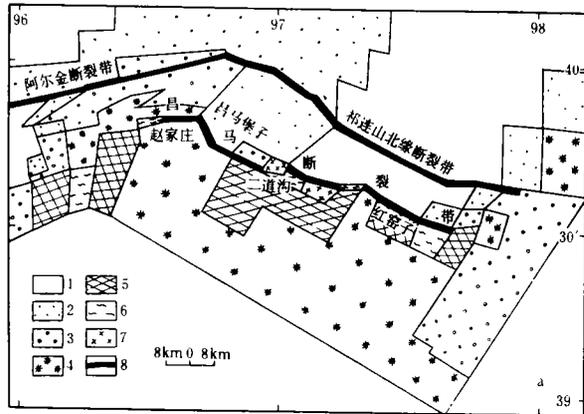


图 8 模型 II—震后昌马地区 τ_{max} 分布图

1. $\tau=0-1$; 2. $\tau=1-2$; 3. $\tau=2-3$; 4. $\tau=3-4$;
5. $\tau=4-5$; 6. $\tau=5-6$; 7. $\tau>6$; 8. 断裂带

a. $h=0-20\text{km}$; b. $h=20-25\text{km}$; c. $h=25-40\text{km}$

Fig. 8 Model II: the distribution of τ_{max} before the Changma earthquake.

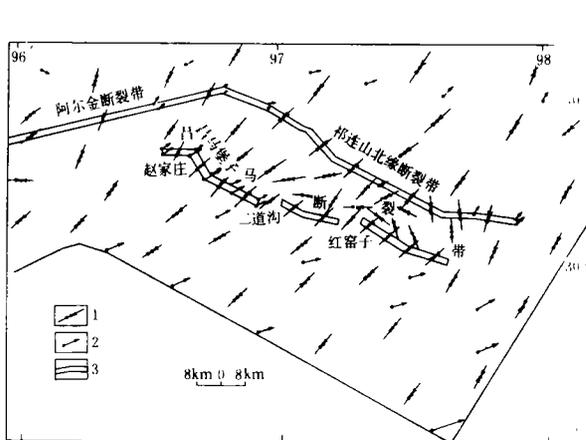


图 9 模型 II—震后昌马地区平面主压应力方向及位移矢量分布图 (0—20km)

1. 主压应力方向; 2. 位移矢量; 3. 断裂带

Fig. 9 Model I: the distribution of plane principal stress direction and displacement vector after the Changma earthquake.

北纬 $37^{\circ}7'$, 东经 97° , 宏观震中为北纬 $37^{\circ}7'$, 东经 $97^{\circ}7'$, 即位于昌马东南 50km 的红窑子南沟处, 震源深度 20km, P 轴方位角 348° , 倾角 8° , T 轴方位角 74° , 倾角 24° , 节面 A 的方位角为 115° , 倾向北东, 倾角 79° , 节面 B 的方位角为 30° , 倾向南东, 倾角 70° 。由等震线长轴方向推断节面 A 为震源断层, 属右旋走滑断层 (图 11)。该次地震形成了复杂的地震破裂带, 其中有地震陡坎、鼓包、裂缝、山脊和水系的转折、山崩、滑坡等。破裂带主要由两条北西西向、四条北北西向、两条北东东向、一条北北东向和三条东西向地震破裂带组成。在红窑子附近极震区内有北西西向、北北西向及北北东向破裂带。其中北西西向破裂带在红窑子南沟处有宽大的基岩裂缝, 裂口宽 2—3m, 深 4—5m, 呈左旋雁列鼓包带, 南缓北陡, 甚至有的北翼

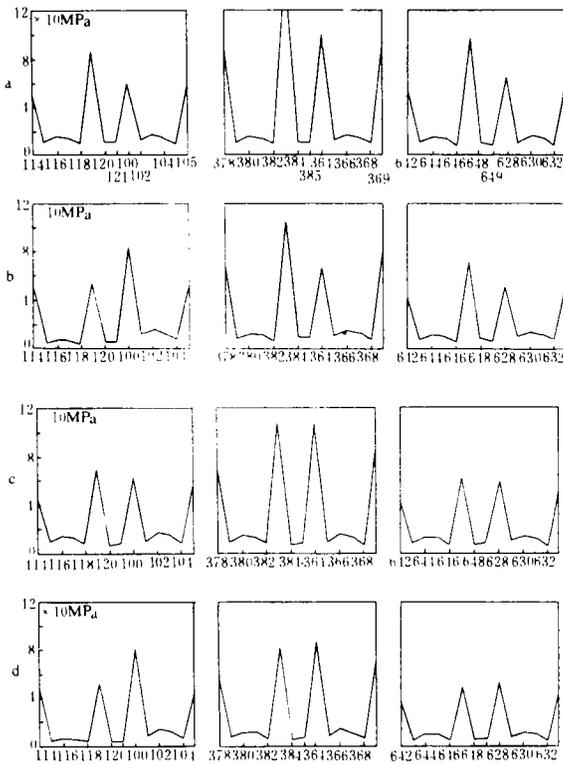


图 10 昌马断裂带从东向西 τ_{max} 曲线图

- a. 模型 I — 震前昌马断裂带 τ_{max} 曲线图 b. 模型 I — 震后昌马断裂带 τ_{max} 曲线图
- c. 模型 II — 震前昌马断裂带 τ_{max} 曲线图 d. 模型 II — 震后昌马断裂带 τ_{max} 曲线图

Fig. 10 τ_{max} curves of the changma fracture zone from east to west.

近于直立；北北西向破裂带由西高东低的陡坎及张裂缝组成，具有右旋水平错动的特点，这两条形变带是断裂带水平错动挤压形成的。而北北东向断裂带则由右旋雁列张裂缝组成，长约 5km，宽 30—60m，同时可见右旋水平错断的纹沟等形变遗迹，显示有左旋剪切力的作用。以上破裂带均是断裂带水平错动和块体破坏联合作用形成的。根据岩石破裂准则，破裂面与最大主压应力方向的夹角为 $30^\circ - 22.5^\circ$ [6]，如果按 25° 计算利用 P 轴推测的节面走向与震源断层走向相差 26° ，利用计算的主压应力方向推测的破裂面走向与震源断层走向相差 65° ，它们虽然有相同的运动学特征，即均为右旋，但角度相差太大，尤其震源应力场 P 轴与节面 A 的夹角达 53° ，这与岩石力学的实验结果相差较大。地震断层应以昌马断裂为主，属左旋断层。这一系列矛盾很难用单一断层的运动来解释。从图 9 中的模拟构造应力场主压应力方向可以看出，在红窑子附近主压应力方向发生了较大的变化，这种变化可能导致块体旋转，但在 20—25km 深处，主压应力方向仍为北东向，这二者相互作用，必然在一定的深度，尤其在 20km 附近会形成枢纽点，即震源，这样形成的断裂倾角较大，震源断层倾角为 79° ，这似乎是相吻合的。由于挤压作用，在地表形成倾向南西的左旋断裂，由于旋转，在震源处形成倾角较大、倾向北东的右旋震源断层。由此可见，昌马地震是在闭锁、贯通和块体旋转联合作用下形成的。这也是区域应力场和局部应力场，深部应力场和浅部应力场不一致造

成的。从以上的分析可以看出,图 12 的发震机制有一定的合理性。

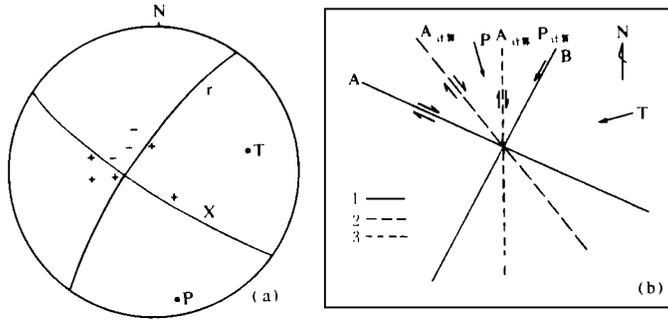


图 11 昌马地震震源机制解

1. 节面; 2. 推测节面; 3. 计算节面

Fig. 11 Focal mechanism Solution of the Changma earthquake.

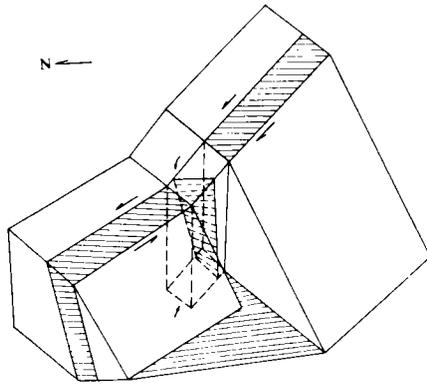


图 12 1932 年昌马地震发震机制图

Fig. 12 Seismogenic mechanism of the Changma earthquake in 1932.

5 结束语

在模型中,尽管对 P 波资料的选取是近似的,断裂向深部的扩展也不太清楚。计算分析表明,在目前没有确切资料的情况下,这样分析是比较可靠的。图 12 提出的发震机制还有待深入研究,以便解决震源深度与破裂深度是否一致,以及闭锁区应力场有何特点等问题,从而为确定潜在震源区提供地质和地球物理方面的指标。

本文是在陈志泰研究员的悉心指导下完成的,在工作中得到了才树华副研究员的帮助,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

1. 魏顺民, 陈志泰, 等. 祁连山—河西走廊活动断裂系. 北京: 地震出版社, 1993.
2. 侯珍清, 等. 昌马活动断裂带. 北京: 地震出版社, 1993.
3. 殷有泉, 有限元法及其在地学中的应用. 北京: 地震出版社, 1987.
4. 王仁, 丁中一, 等. 固体力学基础. 北京: 地质出版社, 1979.
5. 谢富仁, 刘光勋. 阿尔金断裂带中段区域新构造应力场分析. 中国地震, 1989, 3(1).
6. 陈颙. 地壳岩石的力学性能—理论基础与实验方法. 北京: 地震出版社, 1988.
7. 国家地震局《深部物探成果》编写组. 中国地壳上地幔地球物理探测成果. 北京: 地震出版社, 1986.

RESEARCH ON STRESS FIELD AND CAUSATIVE MECHANISM OF THE CHANGMA EARTHQUAKE, GANSU PROVINCE

Li Buyun

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China)

Abstract

Based on the geological and geophysical data, this paper establishes a stereogeologic model of the Changma basin. The change of stress field and the earthquake mechanism before and after the Changma Ms7.6 earthquake in 1932 are studied by 3-D finite element method. The results show that:

1. The difference between the focal fault strike and that inferred by the principal compression stress is 65° , this probably is due to the block rotation which results from the force moment produced by the rotated principal compression stress in shallow crust and the NE—directional principal compression stress in depth. The hinge point is the focal region. The block rotation results in the differences between the mechanical and geometrical natures of earthquake fault and focal tault.

2. The Changma earthquake is due to the cooperative interaction of closing joint and block rotation.

3. The regional stress field discords with local stress field and the appearance of stress relaxation unit is probably relative to the earthquake preparation and occurrence.

4. Nonuniformity of fault activity is positive correlative with the inhomogeneous distribution of plane maximum shearing stress. The fracture zones are characterized by relative levorotation, shove and compression, but the distribution of strike slip is inhomogeneous.

Key Words: Block rotation; Seismogenesis; Changma earthquake; 3-D finite element analysis