

# 关于昌马7.5级地震的成因探讨

王 华 林

(国家地震局兰州地震研究所)

## 摘 要

本文从三维空间的角度,从昌马地震发生的区域构造背景和构造应力场,震源断裂和震源应力场,地震的动力来源,震源介质条件、震源闭锁形式和地震发震机制等方面探讨了昌马地震的成因,提出了“三维空间四方受压的震源闭锁模式和“倒楔型”劈裂的发震机制。

地震是一个发生在地下深处的、复杂而特殊的构造现象。只有地震地质方法与地球物理方法相结合,在三维空间内从多方面去研究才有可能解决地震的成因问题。基于这一基本思想,作者试图探讨1932年昌马地震的成因问题。

## 一、昌马地震的构造背景和区域构造应力场

### 1. 构造背景

昌马地震发生在青藏高原北缘现今活动强烈的北祁连山褶皱带与阿尔金山左旋走滑断裂系结合部位的附近,深部地球物理背景表现为北东向重力异常梯度带和地壳厚度梯度带与北西向重力异常梯度带和地壳厚度梯度带的复合。地震震中恰好落在地壳厚度和岩石圈厚度急剧变化带上。

昌马地震的发震断裂为昌马断裂带。昌马断裂属昌马—俄博断裂的西段,是加里东古缝合线的组成部分。断裂西起昌马,东止臭水柳沟,全长120公里,总体走向北西,断裂面向南倾,倾角70度左右,为左旋走滑逆断层。

昌马断裂形成于下古生代。形成后经历了多期活动。自第三纪以来断裂活动显著。断裂南侧的夷平面高度高于北侧同级夷平面500—900米,表明断裂南侧上升幅度大于北侧。由于断裂的活动,在断裂北侧形成一宽达2—6公里的断裂谷地。第三纪末,断裂显示挤压逆冲性质,在大泉口、月牙大坂等地见到前震旦系逆冲到第三系之上。第四纪晚期,断裂活动表现为以左旋走滑为主,兼有垂直运动,从获得的断裂水平位移和垂直位移资料以及沿断裂

第四纪沉积厚度分析,昌马断裂的水平位移由东向西变小,而垂直位移由东向西变大。

1932年昌马地震时产生了长达120公里的地震形变带。形变带的空间展布和破裂性质与昌马断裂一致。形变带按其破裂强度可分西、中、东三段,以中段破裂强度最大。故认为昌马地震的宏观震中位于昌马断裂中段的三个泉—灰条沟一带<sup>[1、2]</sup>

## 2. 区域构造应力场

根据文献<sup>[3]</sup>所提供的断裂活动变形、震源机制解、地震形变带、基性和三角网测量等资料分析,发现青藏高原北缘的构造应力场由西(阿尔金断裂)至东(祁北地震带以西)其主压应力方向有由南北向北东东旋转的趋势。昌马地震发生在构造应力场由南北向北东转化的部位上。

昌马地震形变带由北西西、北东东和北北西三个方向的破裂而组成。根据沿破裂带出现的鼓包、裂缝的排列方向和组合方式以及纹沟的水平错动资料分析,北西西和北东东破裂带显示左旋运动,北北西破裂带显示右旋运动。指示了北东—南西向挤压的构造应力场。由在昌马地区所做的8个土应力解除资料得出构造应力场的平均主压压力轴向为北36.8°东。

# 二、昌马地震震源应力场和震源断裂

## 1. 昌马地震震源机制解

昌马地震震源机制解(表1、表2)反映了昌马地震北北西—南南东向挤压,北东东—南南西向拉张,作用应力近于水平的震源应力场。地震形变带和地震等震线的长轴方向均呈北西西向展布的事实,说明发震断裂是第一断层面解的北西西向断层。断层面解和震源机制解资料进一步说明,发震断裂是以走滑为主的右旋平移逆冲断层,断层面向北东倾,北东盘的错动方向为116°~119°,破裂深度由北西向南东变浅。

昌 马 地 震 震 源 机 制 解

表 1

| 参 数 名 称 | 方 位 角 | 仰 角 | 参 数 名 称 | 方 位 角 | 仰 角 |
|---------|-------|-----|---------|-------|-----|
| P       | 348°  | 8°  | x       | 123°  | 20° |
| T       | 74°   | 20° | y       | 290°  | 10° |

昌 马 地 震 震 源 断 层 解

表 2

| 断 层 性 质 | 第一断层面解答       | 第二断层面解答     |
|---------|---------------|-------------|
| 平       | 走向: 112°~119° | 走向: 28°~33° |
| 移       | 倾向: NE        | 倾向: SE      |
| 逆       | 倾角: 79°       | 倾角: 58°~70° |
| 断       | 上盘错动方向        | 上盘错动方向      |
| 层       | 方位: 116°~119° | 方位: 22°     |
|         | 倾角: 20°~32°   | 倾角: 10°     |

(据郭增建、秦保燕)

## 2. 昌马地震的强余震分布

有关主震和余震关系的研究结果<sup>[4、5]</sup>表明,强余震的分布可用来判断震源断裂的破裂方式,从而确定震源应力场。

Chinnery<sup>[6]</sup>(1961)和罗灼礼<sup>[7]</sup>(1980)的研究结果表明,走滑断层产生的附加应

力场具有象限分布的特点。海城、通海、唐山、龙陵、炉霍等地震的强余震主要分布在走滑断层产生的引张区内〔5、8〕。

昌马地震的强余震分布在昌马地震震源断裂北盘的西北部的阿尔金山断裂带内和南盘的东南部。由此得出引张区和压缩区的四象限分布图案(图1), 该图显示了昌马地震的震源应力场为北北西~南南东向挤压, 北东东~南西西拉张, 同时指示了震源断裂具有右旋错动的特点。

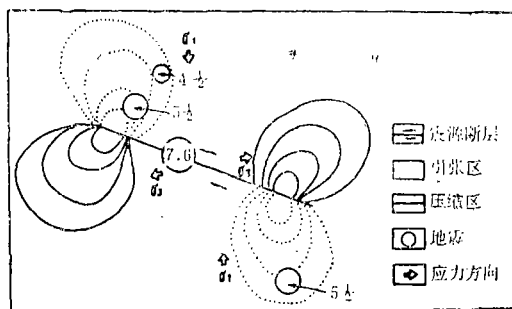


图1 昌马地震震源应力场和强余震分布图

Fig. 1 The source stress field and strong aftershock distribution on Changma earthquake

### 三、昌马地震的区域受力分析

昌马地震发生在青藏高原的北缘, 主要受到三种力—地壳结构力, 板块运动传递的应力和地幔物质对流产生的壳下应力的作用。

#### 1. 地壳结构力

地壳结构力〔9〕是指由于地壳结构不均一所产生的力, 本文特指在重力作用下, 巨厚的青藏高原的地壳中具有的巨大位能所产生的强大水平应力。

岩石力学实验证明〔10〕, 在应力长期作用下, 岩石具有流变特征。在高原地壳中, 由于能量和应力的不均衡, 在地壳结构水平应力作用之下, 地壳物质必然产生背离高原的流变运动, 并促使岩石块体沿断层面以层面滑动的方式将高原地壳多余的位能释放。

地壳结构力在高原边缘最强, 并表现为强烈的挤压作用。这一水平应力与地壳等位能线(莫霍界面等深线)的走向近于正交(图2a), 由此推断水平压应力在北西西向祁连山这一地壳厚度陡变带的方向为北东~南西, 在北东东向的阿尔金山地壳厚度陡变带的压应力方向为北北西~南南东。水平应力随深度变化, 其最大值达2千巴(图2b), 分布在10~20公里的范围内, 这与震源分布的最大概率相一致〔13〕。所以这一水平应力是高原四周断裂现今活动强烈和地震活动频繁的力学原因所在, 也是昌马地震孕育形成的重要力源。

#### 2. 地幔物质对流产生的壳下应力

Liu〔12〕(1978)根据资源卫星资料得到了亚州地区地幔物质上升流产生的壳下应力分布图。图中显示, 北祁连及河西走廊地区处在其邻近地区地幔物质上升流汇聚的压缩区内。青藏高原地幔物质上升流对本区产生的压应力方向由西向东、由北北西转为北东向。黄培

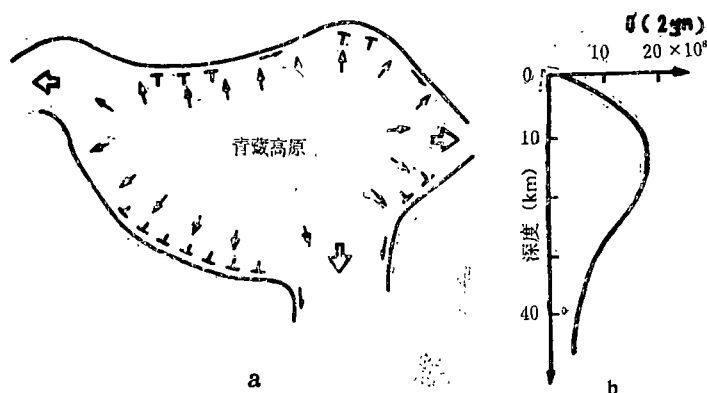


图2 青藏高原地壳结构力源水平应力平面及垂向分布示意图  
a. 高原地壳水平应力平面分布图 b. 高原地壳水平应力垂向分布图

图中上表示逆冲断层； $\rightarrow$ 表示断层走滑方向； $\rightarrow$ 表示高原地壳水平应力作用方向，  
空心箭头表示高原地壳物质流优势运动方向

Fig. 2 A distribution and change of horizontal stresses generated by the plateau crust's force resource in horizontal direction and with depths

华<sup>[13]</sup>研究指出，这种地幔物质对流产生的壳下应力，可以近似地看成岩石圈内的构造应力。

Liu和黄培华先后利用卫星测量的地球重力场的球谐函数系数和地幔流体力学方程计算得到，地幔物质对流产生的张应力和压应力的大小为 $10^8 \sim 10^9$ 达因/厘米<sup>2</sup>，这与引起大陆破裂的应力为同一数量级<sup>[14]</sup>。也就是说地幔物质时流产生的壳下应力是可以引起介质的破裂而发生地震。

### 3. 板块运动传递的应力

印度板块现今正在向北东方向运动，在喜马拉雅地区与欧亚板块碰撞，形成了喜马拉雅缝合带，并积累了巨大的压应力。如把板块视为弹性体时，板缘的巨大压应力可以通过板块碰撞直接向板内传递。如把板块视为弹塑体，板缘的巨大压应力可以通过板块相互作用引起的应变向板内扩散。这种传递的应力在青藏高原北缘，由于地壳厚度的变化和昌马断裂的存在，导致应力在此不断积累，为构造活动和地震孕育提供力源。

以上三种力的性质均属压应力，其作用方向和大小是随地区和深度而变化的。它们的联合作用，就形成了区域的北东～南西向的挤压应力场和北北西～南南东挤压的深部震源应力场，构成了昌马地震孕育和形成的动力学条件。

## 四、昌马地震震源的介质条件

在构造应力作用之下，在特定的构造部导致应力集中，引起介质的变形，但这并不能发生地震。只有应力以突然的方式释放才发生地震。这与介质的物性条件直接相关。因此，震源介质条件也是探讨地震成因所必须进行的研究的一个方面。

根据有关公式计算，昌马地震可能发生在地下20～30公里范围（计算深度为23公

里)<sup>1)</sup>。这一深度大致相当于该区上地壳与下地壳的分界面。Chen和Mojnar<sup>[15]</sup>(1982)指出,大陆地区的热分布状态可能造成上地壳以地震方式发生变形,而较热的下地壳以非地震的方式发生变形。这就是说,上地壳的介质相当于脆性体表现为弹性变形。弹性应变相当于一个“存贮”应力的机制,有利于地震发生。下地壳的介质相当于塑性体,表现为塑性变形、塑性变形是一个“解除”应力的机制,不利于地震的发生。可见上地壳与下地壳的分界面相当一个韧~脆性转换区<sup>[16]</sup>。实验表明,剪切阻力在韧~脆性转换区附近达到峰值<sup>[17、19]</sup>(Matsushima 1961, Rutter 1972), Ramsay<sup>[20]</sup>的研究表明,断层的几何性质受介质强度的控制,最强的岩石中断层面最陡。高角度的震源断层反证了震源介质具有高强度。高强度的震源介质为地震的孕育和形成提供了“能干层”<sup>[18]</sup>,而成为地震的“储能体”。

## 五、昌马地震的闭锁形式

从上述的研究发现,昌马地震形变带的空间展布与昌马断裂带的空间位置基本吻合,说明昌马地震的发生与昌马断裂密切相关。但是昌马地震的地表断裂和震源断裂虽走向一致,且均属压扭性断裂。但二者的倾向和旋向相反,所反映的应力场不一致。这就涉及到断裂的空间交汇、闭锁和应力集中在地震孕育过程中的作用。

模拟实验结果<sup>[21]</sup>和许多震例的研究结果<sup>[22-25]</sup>均表明,平面上在两条断裂交汇情况下,一条断裂对另一条断裂起到了阻挡和闭锁作用,应力在交汇处集中,一条断裂冲破另一条断裂充当发震断裂。同一条断裂走向发生变化的地方,往往也是应力集中的场所。如果这些平面断裂作一个直立翻转,似乎平面的问题就成了三维空间的问题。平面上两条断裂的交汇问题就成了三维空间上两条断裂交汇问题。平向上一条断裂的走向变化问题就成了三维空间上一条断裂的倾向或倾角变化的问题。所不同的是在三维空间情况下,上覆岩石的自重掺入了构造力,所以三维空间上两条断裂的交汇,是可以引起断裂的空间闭锁,导致应力集中,最终发生地震的。

前面的研究表明,昌马地震的上地壳断裂<sup>2)</sup>——地表实际观察到的断裂的活动特点是:断层面向南西倾,断层倾角70°左右。现今活动表现为强烈的左旋压性活动,断裂的北东盘向下“俯冲”,并向北西方向水平运动,其垂直运动幅度由东向西变大,水平运动幅度由东向西变小。上地壳断裂的活动是北东~南西向挤压构造应力作用的结果。下地壳断裂的活动特点是:断层面向北东倾,倾角79°。断裂的北东盘向上“逆冲”,并向南东方向运动,其破裂深度由西向东变浅。下地壳断裂的活动是北北西~南南东方向深部震源挤压应力作用的结果。

$$1) 1. M_s = 0.67 I_0 + 1.7 \lg h - 1.4 \quad h_1 = 22.5 \text{公里}$$

$$2. I_0 - I = 6 \lg \left( \left( \frac{\Delta}{h} \right)^2 + 1 \right)^{1/2} \quad h_2 = 18.8 \text{公里}$$

$$3. \lg h = \lg \Delta i - \frac{1}{2} \lg \left[ 10^{(I_0 - I_i/s - 1)} \right] \quad h_3 = 27.8 \text{公里}$$

$$\bar{h} = (h_1 + h_2 + h_3) / 3 = 23 \text{公里}$$

2) 震源深度为23公里,将震源以上的断裂称上地壳断裂,震源以下的断裂称下地壳断裂

当上地壳断裂与下地壳断裂在空间交汇时,由于上地壳断裂北东盘的向下运动,就会使下地壳断裂北东盘的向上运动受到限制和阻挡,同样,下地壳断裂北东盘的向上运动,也会使上地壳断裂北东盘的向下运动受到限制和阻挡;上地壳断裂北东盘的向北西运动,就会使下地壳断裂北东盘的向南东运动受到限制和阻挡,同样,上地壳断裂北东盘的向北西运动也受到下地壳断裂向南西方向运动的阻挡和限制,从而形成空间闭锁区域,造成应力在交汇处高度集中(图3)。这种闭锁是一种四方受压的三维空间闭锁,而不是一种简单的、平面几何形态的闭锁。

由于上地壳断裂和下地壳断裂的特殊活动方式,决定着断裂的闭锁段在平面上处于上地壳断裂水平运动变弱,垂直逆冲运动强烈的三个泉~灰条沟一带,在三维空间上处于上地壳断裂与下地壳断裂交汇处。

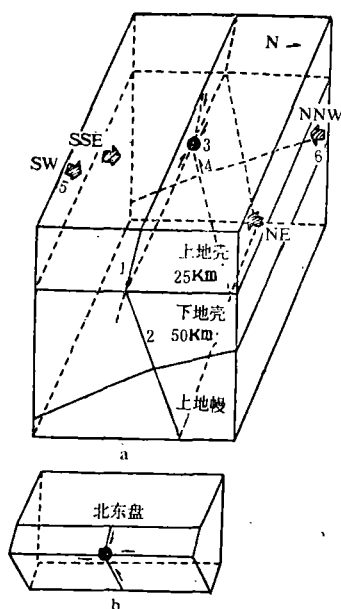


图3 昌马地震空间闭锁模式图

a.空间闭锁立体图解 b.空间闭锁剖面图解

1.上地壳断裂 2.下地壳断裂 3.闭锁段 4.断层  
盘运动方向 5.上地壳主压应力 6.下地壳主压应力

Fig. 3 The source locked model  
within three dimensional  
space on changma earthquake

## 六、昌马地震的发震机制

前已述及,昌马断裂是北祁连山加里东古缝合线的西延部分,系一条超岩石圈断裂。大地电磁测深资料表明,沿昌马断裂带,上地幔第一低阻层有一个明显的交异,显示了岩石圈由昌马向北显著增厚,形成一陡坡带(这一陡坡带可能与昌马超岩石圈断裂有关)。如图4所示,这一陡坡带,对软流圈物质运动起到了阻挡作用,使软流圈物质运动复杂化。软流圈物质除了对岩石圈底面产生的拖曳力外,还产生一个重要的推拉力,使岩石圈底面沿已经存在的断裂软弱面裂开。具有高内压和炽热的软流圈物质沿其挤入,产生了“倒楔型”向上劈裂作用,进而扩大了破裂,并使其向上发展。同时,产生了一个水平张应力。当破裂向上扩展到上地壳断裂与下地壳断裂的交汇部位时,使下地壳断裂长期积累的应变能以突然的方式释放,引起震源断裂的破裂和闭锁段的破坏,发生地震。

关于软流圈炽热物质上涌,可以从该区大地热流值较高得到佐证(图5)。肃北地区热流值为1.44,托来为1.83,昌马地区为2.6,饮马为1.29,金塔为1.36。昌马地区热流值最高,

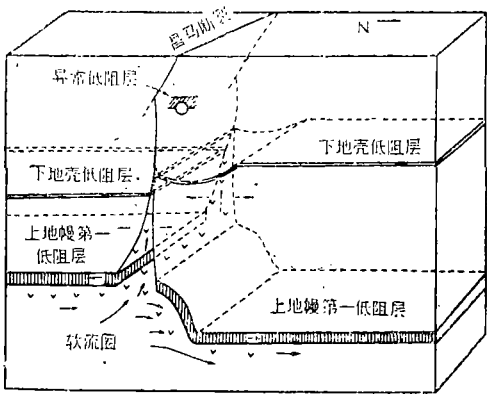


图 4 昌马地震“倒楔型”劈裂发震机制模式图

Fig. 4 The seismoccurring mechanism caused by reserved wedye splitting on changma earthquake

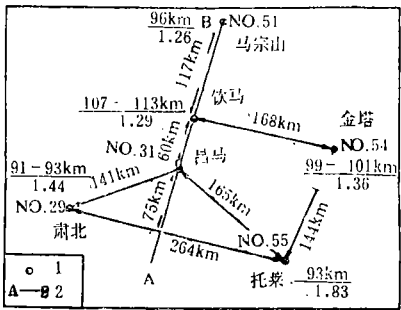


图 5 昌马地区上地幔第一低阻层埋深及其热流值分布

1.大地电测深点位及编号 2.电测深剖面 3.横线之上数字表示地幔第一低阻层埋深横线之下数据表示换算得出的地热值

Fig. 5 The depth of the first low resistivity layer in the supper mantle and distribution of estimated thermal current value in and near Changma area

在这一地区可能存在一个埋深 10 公里，厚 11 公里的上地壳低阻层。

昌马地区热流值最高和厚达 11 公里的上地壳低阻层存在，标志着软流圈物质在此处的向上挤入作用强烈，因此，地震破裂首先由此开始，并向南东方向扩展，破裂传播到三个泉～灰条沟，引起断裂闭锁段的破坏，形成了昌马地震的宏观震中。由于下地壳断裂冲破了上地壳断裂，使上地壳长期积累的左旋应变能和垂直应变能得以释放，而下地壳断裂的应变能在断裂的深部交汇处释放，在地表得不到反映。从而地表形变带显示了左旋逆冲运动的特点。下地壳震源断裂的右旋平移逆冲破裂，导致断裂两端应力重新调整，控制着强余震的发生和迁移，完成了整个地震序列。

本文从三维空间的角度研究了昌马地震的成因。笔者认识到地震的发生与所受的应力，介质条件和断裂的闭锁形式密切相关，同时有其触发原因。地壳结构力，地幔对流产生的壳下应力和板块运动传递的应力是昌马地震的动力源。昌马地震的震源闭锁是通过上地壳断裂与下地壳断裂的空间交汇来实现的，是一种四方受压的三维空间闭锁形式。导致这种闭锁的条件是断裂的倾向、倾角和运动方向随深度而变化，引起这种变化的原因是构造应力的

小,方向和性质随深度而变化並因地而导。其闭锁深度位于韧-脆性转换区内,为应力的集中提供了“能干”介质条件。软流圈的物质运动,撕裂岩石圈底面,软流圈物质沿超岩石圈断裂向上挤入,引起的倒楔型劈裂作用,对昌马地震的发生起到了积极的“触发”作用。昌马地震的成因可能反映了一部分地震的发震特点,对研究地震的成因具有一定的意义。

本文得到了侯珍清先生的悉心指导,时振梁、张裕明和杨理华三位老师审阅了论文初稿,提出了宝贵意见,笔者在此一并致谢。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 时振梁等, 1932年昌马地震破裂带及其形成原因的初步探讨, 地球物学报, Vol.17, №4, 1974.
- [ 2 ] 白启圣, 关于1932年昌马地震破裂带, 西北地震学报, Vol. 3, №4, 1980.
- [ 3 ] 李玉龙, 陕甘宁青四省(区)新构造与现代构造应力场及其动力来源的初步分析, 西北地震学报, Vol. 1, №4, 1979.
- [ 4 ] A.Nur and J.R.Booker, Aftershocks caused by pore fluid flow, Science, Vol.175, №4024, p885~887.
- [ 5 ] 张之立等, 三维断裂扩展方向的理论分析和余震分布图象的预报, 地球物理学报, Vol.25, 增刊, 1982.
- [ 6 ] M.A.Chinnery, The deformation of the ground around surface faults, B.S.S.A., Vol.51, №3, p355~372, 1961.
- [ 7 ] 罗灼礼, 震源应力场、变形场和倾斜场, 地震学报, Vol. 2, №2, 1980.
- [ 8 ] 黄福明等, 倾斜断层产生的应力场, 地震学报, Vol. 2, №1, 1980.
- [ 9 ] 周玖等, 青藏高原重力构造, 地质科学, №4, 1983.
- [ 10 ] Гзовский, М.В. Основы тектонофизики, изд. «Научка», Москва, p 23~42, 1975.
- [ 11 ] 国家地震局, 中国地震简目, 地震出版社, 1977.
- [ 12 ] Liu, H.S, Mantle convection pattern and subcrustal stress field under Asia, phys. Earth planet Inter., Vol.16, №3, p247~256, 1978.
- [ 13 ] 黄培华等, 中国岩石层底面地幔对流状态的讨论, 地球物理学报, Vol.26, №1, 1983.
- [ 14 ] Sbar, J.L. and Sykes, L.D., Contemporary compressive stress and seismicity in eastern North America: an example of intra-plate tectonics, Bull.Geol.Soc. Am., 1973.
- [ 15 ] Chen, W-P and P.Molnar, The depth distribution of intra continental and intraplate earthquake and its implication for the thermal and mechanical properties of the lithosphere, J.G.R.in press, 1982.
- [ 16 ] R.H, Sibson, Fault rocks and Fault mechanisms, J.Geol.Soc.London, Vol.133, part 3, p191~213, 1977.
- [ 17 ] S.Matsushima, On the strength distribution of the earth's crust and mantle, and the distribution of great earthquake with depth, J.phys.



Earht, Vol. 9, №1, 1961.

[18] 马宗晋, 1966—1976年中国九大地震, 地震出版社, 1982.

[19] Rutter, E.H., The influence of interstitial water on the rheological behaviour of calcite rocks, Tectophysics, Vol.14, p13—33, 1972

[20] Ramsay, J.G, 剪切带的几何性质, 地震地质译丛, Vol. 4, №5, 1982.

[21] 叶洪等, 从破裂模拟实验探讨破裂性地震发震条件的一些初步成果, 地质科学, №1, 1973.

[22] [英] H.Kolde and S.Bhattachaji, 活动走向滑动断层的几何图型及其作为应力释放区域标志的意义, 地震地质译丛, Vol. 4, №1, 1982.

[23] [日] 小出, 仁等, 活断层力学, 地震地质译丛, Vol. 3, №3, 1981.

[24] 向宏发等, 1978年海城6级地震的构造条件分析, 地震地质, Vol. 2, №2, 1980.

[25] 邓起东等, 关于海城地震震源模式的讨论, 地质科学, №3, 1976.

## THE STUDY ON THE GENESIS OF CHANGMA EARTHQUAKE (M=7.5)

Wang Hualin

(*Seismological Institute of Lanzhou, State Seismological Bureau*)

### Abstract

The genesis of Changma earthquake has been studied in three dimensional space in the paper, including the regional tectonic background and tectonic stress field, the focal fault and stress field, the earthquake force resource, medium condition in and near focus, the source locked model of the earthquake and the seismooccurring mechanism. The author puts forward the source locked model from four direction compression in three dimensional space and the seismooccurring mechanism caused by reserved wedge splitting on the earthquake with  $M_s=7.5$ .