

东昆仑大地震的深部构造背景

李秋生^{1,2)} 彭苏萍²⁾ 高 锐¹⁾ 管 烨¹⁾ 范景义³⁾

(1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 中国矿业大学, 北京, 100083;

3) 国土资源部实物地质资料中心, 河北 燕郊, 065201)

P5 A

摘 要 本文以深地震测深剖面资料揭示的地壳结构形态为切入点, 探讨东昆仑 8.1 级大地震的深部构造背景。沱沱河—小柴旦长 500 km 的剖面范围内发现两处大的莫霍面错断, 分别位于东昆仑—柴达木结合带之下和金沙江断裂之下。青藏高原北部的地壳厚度 61~75 km; 莫霍面具有一致南倾, 逐步加深的产状及弱反射性特征; 下地壳明显增厚, 但速度未见明显降低; 上地壳发育逆冲、走滑断裂; 地壳中部存在低速层。北邻的柴达木盆地地壳相对刚性, 厚 52 ± 2 km。

东昆仑及邻区的壳幔结构有利于强地震孕育。在印度板块向北推挤和柴达木地块的向南插入的区域挤压应力场中, 青藏高原北部较弱的下地壳缩短增厚, 变形过程中的蠕滑引起地壳浅部的应力放大。但 NE 向主压应力的作用不是大地震形成的唯一要素, 与青藏高原北部各地体侧向运动有关。侧向运动速率和幅度的差异使应力在各地体的边界断裂积累并使其复活。而低速层对形成孕育大地震需要的“立交桥式”的局部应力环境是必不可少的条件。

关键词 深地震测深剖面 地壳结构 地震 青藏高原 东昆仑

Deep Tectonic Background of the 8.1 Ms Earthquake in the East Kunlun

LI Qiusheng^{1,2)} PENG Suping²⁾ GAO Rui¹⁾ GUAN Ye¹⁾ FAN Jingyi³⁾

(1) Institute of Geology, CAGS, Beijing, 10037; 2) China University of Mining Technology, Beijing, 100083;

3) Geological Practical Data Center, MLR, Sanhe, Hebei, 065201)

Abstract This paper has discussed the deep background of East Kunlun Ms 8.1 earthquake through the crust structure derived from the deep seismic sounding profile. Along a 500 km profile from Tuotuohe to Xiaochaidan, there exist two large Moho offsets under the transitional belt from East Kunlun Mountains to Qaidam basin and under Jinshajiang suture respectively. The crustal thickness is 61 to 75 km beneath the northern Tibet plateau. Moho with weak reflectivity remains continuously dipping southward and gets deepened. The low crust has been thickened with no obvious decrease of velocity. In the upper crust, thrust and slide faults are developed, and the lower velocity layer appears between the upper and the lower crust. The Qaidam basin has a thickness of 52 ± 2 km, being more rigid than the northern Tibet plateau.

The special structure of the crust and the upper mantle beneath the East Kunlun Mountain and its surrounding areas is favorable for the formation of violent (great) earthquakes. In the regional stress field where the India plate pushes northward and the Qaidam block underthrusts southward, the relatively weak low crust beneath the northern Tibet plateau has been shortened and thickened. The creep-slide movement in the process of deformation has enlarged the stress in the shallow part of the crust. Nevertheless, the formation of a great earthquake is related not only to the northeastern main compresso-stress but also to the lateral movement of the blocks in the northern Tibet plateau. The differences in velocity and magnitude of the lateral movement between various terrenes of northern Tibet have resulted in the stress accumulation along the boundaries of the blocks and reactivated boundary faults. The existence of the low velocity layer is the prerequisite for the formation of such local stress setting as 'viaduct' which is the favorable site for violent (great) earthquake.

Key words deep seismic sounding crust structure earthquake Tibetan Plateau East Kunlun

本文由国家重点基础研究发展规划项目(编号:G1998040800)资助。

收回日期:2002-11-4; 责任编辑:宫月萱。

第一作者:李秋生,男,1958年生,研究员,在读博士生,长期从事地壳与上地幔深部构造研究;E-mail:liqiusheng@cags.net.cn。

2001 年 11 月 14 日,在青藏高原北缘昆仑山口以西(36.2°N,90.9°E)发生了一次 Ms 8.1 级大地震^①,震后在昆仑山南缘形成宽度数米至数千米、呈 NWW(N80°W)走向延展、长度超过 350 km 的地表破裂带(党光明等,2002;Aiming 等,2002),大地震的形成与青藏高原大尺度的地壳运动及其变形的关系已被论述(江在森等,2003),本文将探讨地震与地壳深部结构的关系。

近 20 年来,利用多种地震学方法对东昆仑及邻区进行了探测(图 1)。主要有①沱沱河-格尔木深地震测深剖面(卢德源等,1990);②中美合作拉萨-格尔木宽频带地震观测剖面(吴庆举等,1998);③格尔木-额济纳旗深地震测深剖面(崔作舟等,1995);④中法合作唐古拉山口-锡铁山天然地震探测剖面(Wittlinger 等,1996;Vergne 等,2002);以及区域性的地震反演和综合研究(丁志峰等,1999;Zhu Lupei 等,1998)。特别是对天然地震剖面观测资料的接收函数分析显示了亚洲(柴达木)岩石圈地幔向南俯冲到青藏高原北部之下的几何图形(Kind 等,2002)引起人们对青藏高原隆升机制的进一步思考。在这些资料的基础上,本文通过对沱沱河-格尔木和格尔木-额济纳旗深地震测深剖面资料的联合分析,以所得的二维地壳结构为依据,讨论东昆仑 Ms 8.1 级大地震的深部构造背景。

1 区域地质构造背景

东昆仑 Ms 8.1 级大地震的发震断裂为东昆仑南缘断裂,具左行走滑性质,露头表现为向北陡倾。该断裂以北是东昆仑地体(造山带),以古生代地层为主,曾经历复杂的演化历史(姜春发等,1992;Mattauer 等,1992),于三叠纪末褶皱隆升成山。断裂以南是巴颜喀拉地体(或称松潘-甘孜-可可西里地体),以广泛分布的三叠系沉积为特点,主要为一套复理石建造。晚三叠世末巴颜喀拉地体拼贴到欧亚大陆南缘成为其组成部分。

东昆仑造山带北邻的柴达木盆地的基底形成于晚元古代。基底之上发育长城系和蓟县系-青白口系及震旦-中奥陶世地台型盖层沉积,长期处于稳定的构造环境。柴达木盆地形成于侏罗纪以来,主要是渐新世至上新世中期的喜马拉雅运动的结果。柴达木沉降成盆的同时东昆仑和巴颜喀拉抬升形成现今的地貌特征。

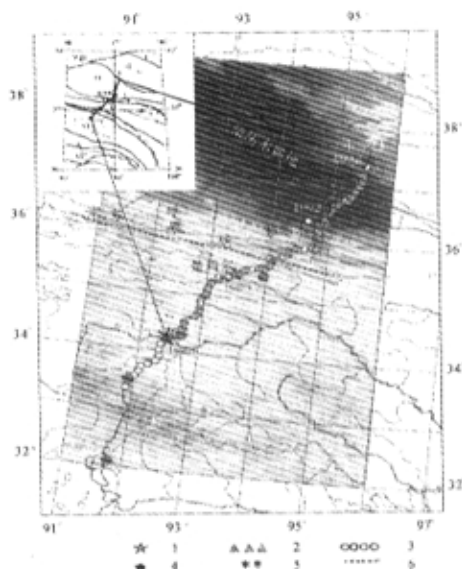


图 1 构造背景和深地震测深剖面布置图

Fig. 1 Tectonic setting of the epicenter area of Ms 8.1

earthquake at and deep seismic sounding profiles

1-炮点位置,旁注数字代表实施年份;2-宽角反射与折射地震剖面测点(已按 1:10 抽稀);3-中法合作布置的天然地震临时观测站(1993);4-中美合作布置的天然地震临时观测站(1991~1992);5-Ms 8.1 级地震震中位置;6-东昆仑南缘断裂;左上角索引图:1-祁连山北缘断裂;2-柴达木北缘断裂;3-东昆仑北缘断裂(隐伏);4-东昆仑南缘断裂;5-金沙江缝合带;6-班公-怒江缝合带;构造单元:Ⅰ-河西走廊;Ⅱ-祁连造山带;Ⅲ-柴达木地块;Ⅳ-东昆仑造山带;Ⅴ-巴颜喀拉地块;Ⅵ-羌塘地块;Ⅶ-拉萨地块;Ⅷ-塔里木地块

1-shotpoint, beside number show the carried year; 2-DSS stations; 3-BB stations of Sino-Frence cooperation (1993); 4-BB stations of Sino-America cooperation (1991~1992); 5-the epicenter of Ms 8.1 earthquake; 6-Southern fault of east Kunlun; Upleft Index fig: 1-northern fault of Qilianshan; 2-northern fault of Qaidam; 3-northern fault of East Kunlun; 4-southern fault of east Kunlun; 5-Jinshajiang suture; 6-Bangong-Nujiang suture; I-Hexi corridor; II-Qilianshan orogen; III-Qaidam Block; IV-east Kunlun orogen; V-Bayan Har block; VI-Qiangtang Block; VII-Lhasa Block; VIII-Tarim Block

2 资料概况及震相分析

沱沱河-格尔木(以下简称 TG)剖面 and 格尔木-额济纳旗(以下简称 GE)剖面都分别作过单独解释(卢德源等,1990;崔作舟等,1995),其成果被分别用于亚东-格尔木地学断面(吴功建等,1991)和格尔木-额济纳旗地学断面(高锐等,1995)地球物理综合解释图中。

① 美国地质调查局(USGS)的测定结果为 Ms7.9,震中位于 36.014°N,90.504°E。

1983年施测的TG剖面分别在沱沱河(92°29'12"E,34°11'58"N;4 530 m)、楚玛尔(93°27'40"E,35°24'03"N;4 475 m)、格尔木(95°07'18"E,36°23'27"N;2 820 m)3个炮点位置爆炸6次,每炮炸药量0.7~9 t,全部以多井组合方式激发。单井深度30~40 m。观测点距6 km。野外观测记录绘制成3幅记录剖面图。

南端的沱沱河炮(向北观测)与北端的格尔木炮(向南观测)的仪器排列都长达300 km以上。而中间的楚玛尔炮南、北观测排列约160 km。沱沱河、楚玛尔和格尔木三炮构成由浅到深控制地壳结构的完整观测系统。

1992年施测的GE剖面也在格尔木设置了炮点(94°53'43"E,36°28'23"N;2 774 m),与1983年格尔木相距约6.7 km(图1)。为与1983年剖面衔接,测线被延伸到格尔木以南170 km。通过校正炮点位置,本次研究已将1983年和1992年两次观测的记录合并成一条长记录剖面(图2-a)。格尔木向北观测距离达260 km,与小柴旦炮向南的观测形成控制柴达木盆地地壳结构的相遇系统。柴达木盆地的观测点距平均为4 km。

沱沱河炮的记录剖面(图3-a)。在0~150 km炮检距范围,Pg以优势波组出现,走时最大可达2 s,其后的P2震相视速度较小,在70 km左右与视速度较大的P3震相斜交。120~200 km可见一组强震相以初至波形式出现,向近炮点可延伸到90 km,向远炮点可追踪到260 km,命名为P4,代表下地壳顶面的反射(原被当作莫霍面反射)。莫霍面反射震相在该强震相之后近2 s处(以128 km的记录为例),在120~200 km其能量略小于P4,在250 km以后成为初至波组,反演深度为70 km。

从楚玛尔炮点南北两侧的观测距离都不大于160 km,未能识别出莫霍反射震相。但是初至的Pg波组很发育,折合走时小于1 s,反映该区结晶基底埋深深度不大。由于激发能量充足,从记录剖面上还识别出几个壳内反射震相(记录剖面图略)。

在合成的格尔木炮记录剖面图上(图2-a),炮点两侧的Pg波到时差异较大。炮点以南的Pg波走时较小,仅可追踪约20 km,与昆仑山区沉积层较薄或缺失有关。炮点以北的Pg波发育,并分成两段,合计追踪长度达到80 km以上。Pg波折合走时达2.4 s,表明炮点处沉积层厚度较大,有钻井资料显示达10 km以上。

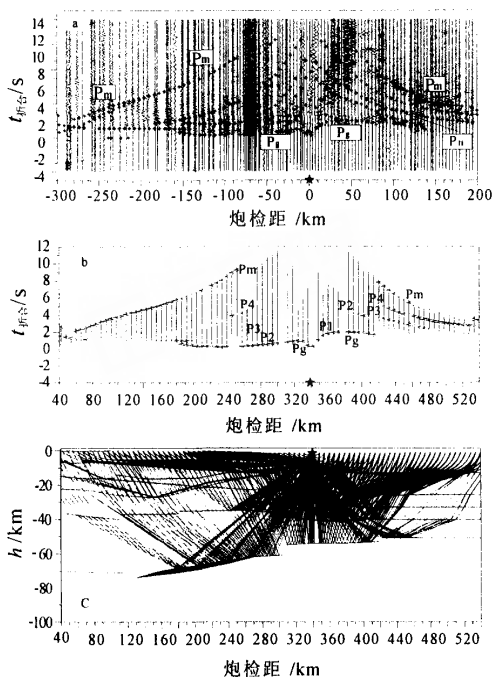


图2 格尔木南北的地震记录及射线追踪拟合

Fig.2 The diagram of ray tracing to the reflection phases on the record section from Golmud Shot

在格尔木炮点两边的地震波能量差异是另一个重要特征。在格尔木以南的昆仑山区记录到的地震波能量明显弱,在0~170 km,除初至波组外,壳内反射震相不易辨认,大于200 km莫霍面反射才能有效识别。1983年的格尔木炮使用炸药4 000 kg以上,这么大的炸药量为什么没有激发出足够强的莫霍面反射?推测为青藏高原北部地壳介质对地震波的强衰减以及界面南倾(引起反射能量相对发散)所致。

作为一个辅证,1992年格尔木炮的情形与上述相反,因为在柴达木盆地内观测,虽然药量只有1 000 kg,但不仅初至的Pg波能量较强、特征清楚,而且Pm反射震相也以明显的优势能量在续至区出现,说明相对刚性的盆地地壳有利于地震波有效传播。Pm震相可从60 km处追踪至炮检距240 km处,在100 km附近表现出临界反射特征,按临界点与反射面深度的关系估计莫霍面深度在50 km左右。在120 km处Pm走时突然减小0.8 s左右,表明柴达木盆地地壳南、北有差异。200 km以后Pm具回折波性质,表明上地幔顶部为梯度层。

小柴旦炮(95°34'08"E,37°29'06"N;3 176 m)记

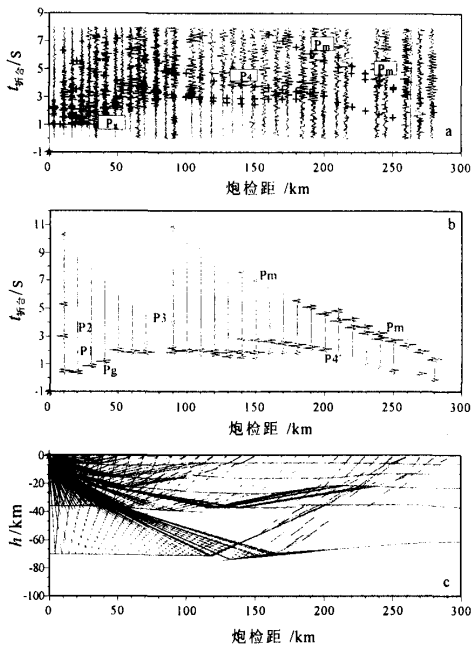


图3 沱沱河向北的地震记录及射线追踪拟合
Fig.3 The ray tracing diagram for the reflection

Phases on the record section of Tuotuohe Shot

a-原始地震记录剖面与震相,图中蓝色十字表示下图的地壳结构模型计算的理论时间;b-由c所示地壳结构模型计算的理论地震图;c-地壳结构模型和射线路径;震相代号与意义:Pg-沉积层中的回折波及结晶基底顶面折射波;P1至P4-地壳内界面面上的反射波;Pm-莫霍界面反射波;Pn-莫霍界面折射波;★表示炮点位置
a-field record section and seismic phases,the blue cross show the calculated traveling time through the crust model at the fig 2-c;b-the synthetic seismic diagram from the crust model at the fig 2-c;c-crust structure model and ray path;Seismic phases meaning:Pg-diving wave in sedimentary layer and refraction wave on crystalline basement surface; P1~P4-reflection wave from inner interface of crust;Pm-reflection wave from Moho interface;Pn-refraction from Moho interface;
★ shot-point locations

录剖面(图4)反映的波场特征与格尔木炮北支的特征相似,莫霍面反射自炮检距100 km附近出现,可以追踪到200 km以远,除了初至的Pg和Pm外,壳内反射都较弱,表明柴达木盆地地壳具有相对简单的结构。

所有识别出来的震相都在图2、图3和图4中的记录剖面图上以“+”联线表示。

3 巴颜喀拉-东昆仑-柴达木二维地壳结构

对识别出的各炮每一个震相进行反演,得到各反射界面的深度和上覆介质的平均速度,依此构建

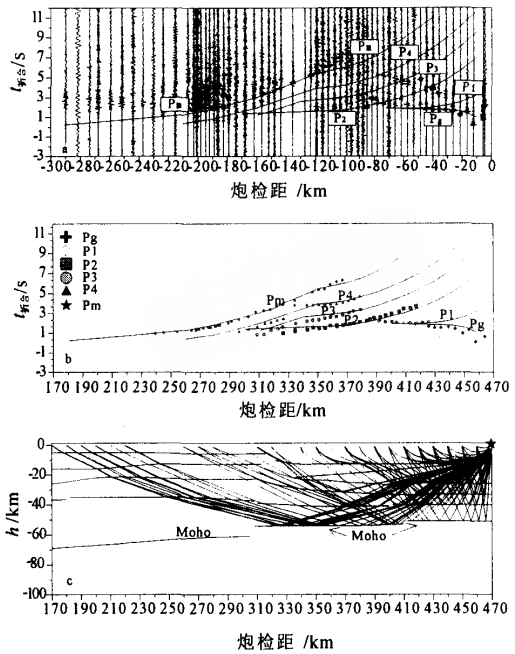


图4 小柴旦向南的地震记录及射线追踪拟合

Fig.4 The diagram of ray tracing to the reflection

phases on the record section from Xiaochaikan Shot

图a,c说明同图2;b-蓝线为下图的地壳结构模型计算的地震波理论时距曲线;不同颜色符号分别代表各震相的实测走时

Fig. a, c same as Fig.2(except for the middle diagram);

b-the synthetic seismic diagram, the color

mark show travel-time data of the reflection phases

地壳初始模型,用SEIS88程序(Červený, 1985)对初至及续至的各震相的走时进行射线追踪拟合,并用射线理论地震图对振幅特征做半定量的约束,逐步改进模型使计算走时曲线及振幅相对强弱与实测记录剖面的细节吻合程度达到最佳(误差一般小于0.05 s,均小于0.15 s)时计算终止。最终获得的二维地壳速度结构模型,如图5所示:①柴达木盆地平均地壳厚度 52 ± 2 km,较相邻的塔里木盆地厚10 km;②东昆仑地体、巴颜喀拉地体的地壳厚度是由北向南逐渐加厚,自东昆仑北坡下的61 km,到金沙江缝合带下的75 km;③羌塘地体北部的地壳厚度为68~70 km。

柴达木盆地的莫霍面近水平展布,盆地南缘有1~2 km的下降。东昆仑地体、巴颜喀拉地体之下,莫霍面一致南倾,倾角约 5° ,羌塘地体北部莫霍面近水平,微向北倾。

柴达木盆地沉积层速度为3.0~5.2 km/s,产

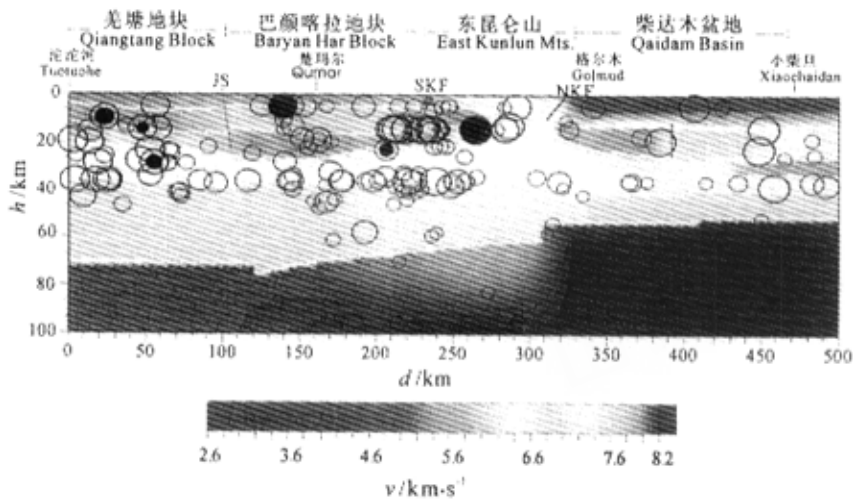


图 5 穿过东昆仑 Ms 8.1 级地震震中区的 P 波速度地壳结构剖面

Fig. 5 The crust structure profile of P wave cross the epicenter of Ms 8.1 earthquake at East Kunlun

JS-金沙江缝合带;SKF-昆仑南缘断裂;NKF-昆仑北缘断裂;空心圆-1964~2003($M_s>5.0$)震源深度;
实心圆-1980~2003($M_s>6.0$)震源深度(纬向投影,数据来自 IRIS 网站)

JS-Jinshajiang suture;SKF-the southern edge fault of East Kunlun;NKF-the northern edge thrust fault of East Kunlun;hollow circles - 1964~2003 ($M_s>5.0$) epicenters;solid dot-1980~2003 ($M_s>6.0$) epicenters (projection along attitude,data from www.iris.washington.edu)

状平缓,表现为地台型沉积盖层特征。盆地地壳中部横向变化明显,南部存在低速层,北部有高速夹层(6.8~7.2 km/s)。下地壳速度正常(6.7~6.9 km/s)。上地幔速度为 8.2 km/s。

东昆仑山区几乎缺失沉积层,6.1~6.3 km/s 的速度等值线接近地表。地壳中、上部速度较两侧高,可能与昆仑北部大面积出露的岩浆岩及昆仑南部出露的基底及古生代地层有关。而深部(下地壳)速度较低(6.6~6.7 km/s)。上地幔速度为 7.6 km/s。

巴颜喀拉地体的沉积层速度(5.4~5.8 km/s)厚度 5~7 km,产状近水平,微向北倾。结晶基岩速度(5.9~6.0 km/s)较柴达木盆地基底(6.1~6.3 km/s)为低。其下为厚度约 10 km 的低速层(5.6 km/s)。巴颜喀拉地体下地壳已增厚,但其层速度值(6.7~6.9 km/s)较正常下地壳没有明显减小。上地幔速度为 7.6~8.2 km/s。

在东昆仑-柴达木结合带之下存在莫霍面错断,垂向断距 7~9 km。昆仑南缘断裂向下延伸被低速层限定,而低速层的北延又被该断裂截断。金沙江断裂切穿上地壳,其下方存在莫霍面错断,但其错断方向与露头及其浅部不一致,其是否属于同一条断裂还需其他的资料证实。限于现有资料的分辨率,东昆仑-柴达木结合带之下的莫霍面错断的水平断距及断裂倾向资料不能有效约束,昆仑中央断裂也

没有明显反映。

4 讨论与结论

本文利用人工地震观测记录,对天然地震剖面的结果(Zhu Lupei 等,1998;Kind 等,2002;Vergne 等,2002)进行了检验,由于柴达木盆地莫霍面深度被精确约束在 52 ± 2 km,而不是 Zhu Lupei 等(1998)模型中使用的 40 km,从而莫霍面的垂断距被约束在 9 km 左右,这与吴庆举等(1998)的结果(5~8 km)相近。相当于雅鲁藏布江缝合带两侧地壳厚度变化的数量级。莫霍面自东昆仑北缘到金沙江断裂显示出一致南倾、加深的趋势,且该产状特征不受古-中生代缝合线限制,以及其弱反射性特征都暗示莫霍面是新形成的。接收函数剖面(Kind 等,2002;Vergne 等,2002)则显示了莫霍面良好的连续性以及柴达木岩石圈向青藏高原北部之下俯冲的几何图形。

上述地壳结构与东昆仑及邻区地震活跃有密切关系。印度板块向北推挤和柴达木地块的向南插入,NE 向的双向挤压作用为震中区的应力积累提供了动力来源。由于青藏高原北部较弱的地壳增厚,东昆仑-柴达木之间地壳厚度急剧变化产生了地震形成的区域水平应力。莫霍面倾斜代表一种不稳定状态,而地壳中部的低速层作为滑脱面,会将地壳深部缩短变形的剩余应力向地壳浅部传递,其蠕滑

作用将导致应力集中。低速层限制了发震断裂向深部的延伸,同时也为其走滑运动提供了条件。

但是 NE 向主压应力不是东昆仑 8.1 级大地震的孕育和发生的唯一要素,还与大区域的水平运动和变形背景有关(江在森等,2003)。剪切波分裂研究表明,东昆仑地体快波偏振方向有一定的顺时针偏转(史大年等,1996),与印度板块的俯冲主方向有一定交角。古地磁研究(李朋武等,2001)和 GPS 观测结果(Qi Wang 等,2001)也显示高原整体向东旋转变背景下的各地体的差异运动。资料表明(白超英等,1990),在与主压应力斜交的走滑断裂已经存在的前提下,深部与浅部成“立交桥”式的地壳应力场环境成为形成断裂闭锁(孕育大地震)的最有利场所。

参考文献

- 白超英,秦保燕. 1990. 深部剪切形变带对浅源地震的控制——立交模式有限元的模拟计算. 西北地震学报, 12(1): 1~11.
- 崔作舟,李秋生,吴朝东等. 1995. 格尔木-额济纳旗地学断面的地壳结构与深部构造. 地球物理学报, 38(增刊 II): 15~27.
- 党光明,王赞军. 2002. 青海昆仑山口西 Ms 8.1 级地震地表破裂带特征与主要震害——对青藏高原区域稳定性评价的制约. 地质通报, 21(2): 105~108.
- 丁志峰,何正勤,孙为国等. 1999. 青藏高原东部及其边缘地区的地壳上地幔三维速度结构. 地球物理学报, 42(2): 197~205.
- 高锐,丁谦,成湘洲. 1995. 格尔木-额济纳旗地学断面地球动力学模型初探. 地球物理学报, 38(增刊 II): 3~14.
- 姜春发,杨经绥,冯秉贵等. 1992. 昆仑开合构造. 北京:地质出版社.
- 江在森,张希,祝意青等. 2003. 昆仑山口西 Ms 8.1 级地震前区域构造变形背景. 中国科学(D), 32(增刊): 163~172.
- 卢德源,王香泾. 1990. 青藏高原北部沱沱河-格尔木地区的地壳结构和深部作用过程. 中国地质科学院院报, 21: 227~237.
- 李朋武,崔军文,高锐等. 2001. 柴达木地块新生代古地磁新数据及其构造意义. 地球学报, 22(6): 563~568.
- 史大年,董英君,姜枚等. 1996. 西藏定日-青海格尔木上地幔各向异性研究. 地质学报, 70(4): 144~157.
- 吴功建,高锐,余钦范等. 1991. 青藏高原“亚东-格尔木地学断面”综合地质地球物理调查研究. 地球物理学报, 34(5): 552~561.
- 吴庆举,曾融生. 1998. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构. 地球物理学报, 41(5): 669~679.

References

- Aiming Lin, Bihong Fu, Jiangming Guo et al. 2002. Co-Seismic strike-slip and rupture length produced by the 2001 Ms 8.1 Central Kunlun Earthquake. Science, 296: 2015~2017.
- Bai Chaoying, Qin Baoyan. 1990. The shallow earthquake controlled from the deep shear deformation zone-finite elementary modeling of the cross fashion stress field. Northwest Seismic Sinic, 12(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Červený V. 1985. The application of ray tracing to the numerical modeling of seismic wave-fields in complex structures: Handbook of geophys. expl., Geophys Press, 15A: 1~124.

- Cui Zuozhou, Li Qisheng, Wu Chaodong et al. 1995. The crustal structure and deep tectonics in Golmud-Ejin Qi GGT. Acta Geophysica Sinica, 38(Sup. II): 15~27 (in Chinese with English abstract).
- Dang Guangming, Wang Zanjun. 2002. The surface rupture and main earthquake disaster of Ms 8.1 earthquake epicenter in the Western of Kunlun Pass, Qinghai province——estimation for regional stability of Qinghai-Xizang plateau. Bulletin of Geology, 21(2): 105~108 (in Chinese with English abstract).
- Ding Zhifeng, He Zhengqin, Sun Weiguo et al. 1999. 3-D Crust and upper mantle velocity structure in Eastern Tibetan plateau and its surrounding areas. Chinese Journal of Geophysics, 42(2): 197~205 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Ding Qian, Cheng Xiangzhou. 1995. Preliminary geodynamic model of Golmud-Ejin Qi Geoscience Transect. Acta Geologica Sinica, 38(Sup. II): 3~14 (in Chinese with English abstract).
- Gérard Wittlinger, Frédéric Masson, Georges Poupinet et al. 1996. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun: Evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. Earth and Planetary Science Letter, 139: 263~279.
- Jérôme Vergne, Gérard Wittlinger, Qiang Hui et al. 2002. Seismic evidence for step wise thickening of the crust across the NE Tibetan plateau. Earth and Planetary Science Letters, 203: 25~33.
- Jiang C F, Yang J S, Feng B G et al. 1992. Opening-closing tectonics of Kunlun Mountains geological memoirs. Series 5. Number 12. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Jiang Zaisen, Zhang Xi, Zhu Yiqing et al. 2003. Before 2001 Ms 8.1 earthquake epicenter in the Western of Kunlun Pass. Science in China (Series D), 33(Sup.): 163~172 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengwu, Cui Junwen, Gao Rui et al. 2001. New Cenozoic paleomagnetic data from Qaidam massif and their tectonic implications. Acta Geoscientia Sinica, 22(6): 563~568 (in Chinese with English abstract).
- Lu Deyuan, Wang Xiangjing. 1990. The crustal structure and deep process beneath the Tuotuohe - Golmud profile in the northern Tibet plateau. Bulletin of Chinese Academy of Geological Science, 21: 227~237 (in Chinese).
- Qi Wang, Pei-Zhen Zhang, Jeffrey T Freymueller et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. Science, 294: 574~577.
- Kind R, Yuan X, Saul J et al. 2002. Seismic Image of crust and Upper Mantle beneath Tibet: evidence for eurasian plate subduction. Science, 298: 1219~1221.
- Shi Danian, Dong Yingjun, Jiang Mei et al. 1996. Shear wave anisotropy of the upper mantle beneath the Tingri of Tibet to Golmud of Qinghai. Acta Geologica Sinica, 70(4): 291~297 (in Chinese with English abstract).
- Wu Gongjian, Gao Rui, Yu Qinfan et al. 1991. Geophysics survey and studies of Yadong-Golmud global geoscience transect in Qinghai-Tibet plateau. Acta Geophysica Sinica, 34(5): 552~561 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qingju, Zeng Rongsheng. 1998. The crustal structure of Qinghai-Xizang plateau inferred from broadband teleseismic waveform. Acta Geophysica Sinica, 41(5): 669~679 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lupei, Donald V Helmburger. 1998. Moho offset across the northern margin of the Tibetan plateau. Science, 281: 1170~1172.