第43卷 第2期
2000年 3月

地球物理学报
CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS

Vol.43, No.2
Mar., 2000

[文章编号] 0001-5733(2000)02-0184-10 [中图分类号] P315.2

天山地震带的地壳结构与强震构造环境

胥 颐 刘福田 刘建华 孙若昧

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100101)

[摘 要] 以中国西北地区的地震层析成像为基础,研究了天山地震带深部结构的基本特征.结果表明,天山地震带的地壳中部为低速的韧性滑脱层,南天山的断裂深度超过莫霍面,北天山的断裂深度一般只到地壳中部;天山莫霍面的深度一般大于50km,壳-幔边界由宽而缓的速度过渡带构成,中强地震主要位于盆山边界地壳中下部位波速变化较大的区域.帕米尔、南天山和塔里木之间存在一个北北东方向的低速带,乌恰和伽师地震分别位于该低速带东、西两侧的梯度带附近.推测帕米尔、南天山和塔里木之间的相对运动是导致低速带内部物质发生形变并在边界附近产生破裂的主要原因,地幔热物质的侵入对该地区的构造活动起到了重要的动力学作用.

[关键词] 天山地震带,地壳结构,速度图像,伽师地震.

1 引 言

利用地球物理方法研究新疆部分地震震源区的深部构造,其中地震层析成像极大地丰富了人们对地震带地壳上地幔三维速度结构的整体认识[1—3],并不断发展和完善了大陆地震的孕震构造模式[4].通常人们对于那些明显受控于活动断裂的地震赋予较为合理的描述和解释,然而对构造相对稳定、历史上少有地震发生、地表未见到地震断层痕迹的地区突然在较短的时期内发生一系列的强震感到迷惑,例如1996—1998年新疆塔里木盆地西部边缘伽师发生的六级强震群受到了关注.由于地表较厚的沉积层覆盖了可能存在的地震断层或破裂的痕迹,因此地球物理资料成为解释地震深部构造成因的重要依据.

本文从最近完成的中国大陆西部地区的地震层析成像结果中截取了3条地壳速度剖面,它们分别穿过天山地震带3个七八级地震的震源区(图1),由于1979年以前的新疆地震目录缺少震源深度,因而使用1979年以后的地震目录做为参考.

2 天山地震带的深部构造

2.1 北天山地震带

北天山地震带历史上发生过1906年玛纳斯7.7级地震和1944年乌苏7.2级地震;1990

[收稿日期] 1999-02-01收到; 1999-09-06收修定稿.

[基金项目] 国家自然科学基金项目(49474214).

[作者简介] 胥 颐,男,1957年生,1982年毕业于成都地质学院应用地球物理系,1999年在中国科学院地球物理研究所获博士学位,现为该所博士后,主要从事地震层析成像和深部地球物理研究.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

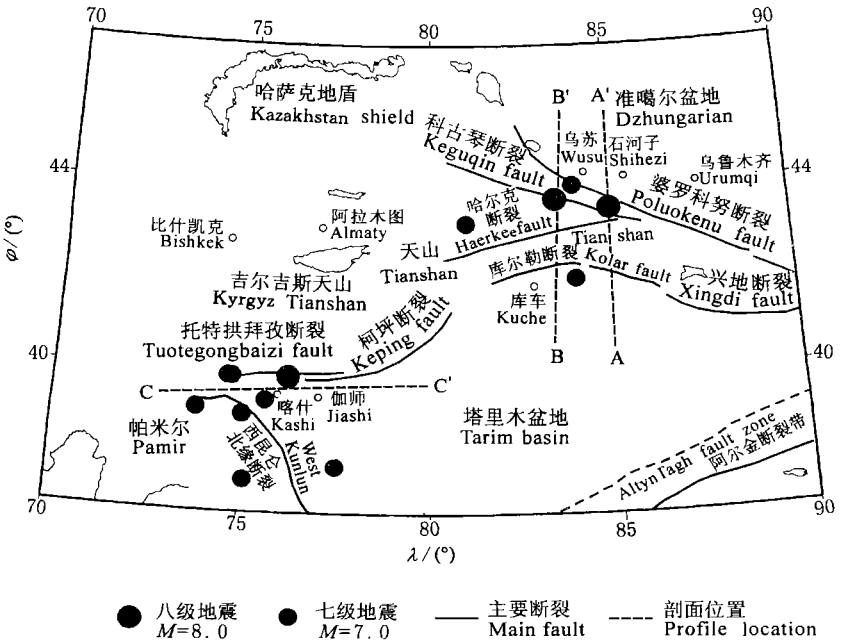

图 1　天山及其邻区七级以上地震分布和纵剖面位置(φ 为纬度，λ 为经度)

Fig.1　Earthquake distribution ($M>7$) and profile location in the Tianshan and adjacent regions

年乌苏先后两次发生 5.2 级地震，又于 1995 年发生 5.8 级地震；1980 年和 1996 年石河子分别发生了 5.7 级和 5.2 级地震．在地震成像剖面 A-A'中(图 2(a))，天山与准噶尔盆地的上地壳和中地壳性质相差较大．在 15 km 以上，天山的地壳呈块状高速体，20—30 km 左右存在低速层；而准噶尔盆地 25 km 以上均为低速，显然与盆地南缘山前坳陷中较厚的沉积层有关；在 30—50 km 的深度范围内，天山与准噶尔盆地的速度相差不大，准噶尔盆地一侧的速度略高，盆地与天山之间的过渡区域为近于垂直的速度梯度带．天山的莫霍面深度超过 50 km，由一个较宽的壳-幔过渡带构成；相比之下，天山两侧塔里木盆地和准噶尔盆地的莫霍面比较清晰，深度大致为 50 km．

北天山地震带的地震大部分位于天山和准噶尔盆地之间的边缘地带，解释为与断裂或褶皱的活动有关。从上述深部速度剖面分析，天山与准噶尔盆地南缘之间近于垂直的速度梯度带反映了断裂带的特点，它是两个不同性质地壳单元之间的边界，但是断裂带的深度似乎没有超过 30 km。1906 年玛纳斯 7.7 级地震和 1980 年以后石河子的两个五级地震位于地壳中部盆山边界速度梯度带的底部，这个部位可能是北天山断裂带的下界．

2.2　南天山地震带

南天山地震带东起库尔勒、西至乌恰的许多地区都发生过七级以上的地震，其中阿图什 1902 年八级地震、乌恰 1955、1974、1985 年的几次七级地震位于南天山的西段与帕米尔交汇的地区，1949 年库车七级地震位于南天山地震带的东段，中强地震更为频繁．地震成像剖面 B-B'穿过南天山库车和北天山乌苏两个地震区(图 2(b))．

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

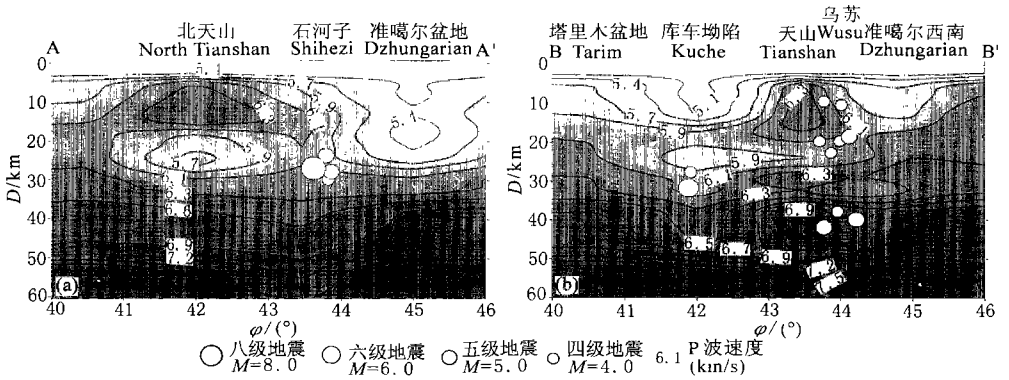

图 2 南、北天山地震带的地壳速度结构和震源分布

(a) 北天山; (b) 南天山(东段).

Fig.2 Crustal velocity structure and hypocenter distribution in the Tianshan earthquake belt (Northern Tianshan (a) and easten part (b) of Souther Tianshan)

库车坳陷的深度较大,可以达到 15 km 左右,在 20—30 km 之间出现低速层. 该低速层向北延伸到天山的中地壳,库车坳陷下地壳至莫霍面的速度仍然很低. 上地壳的低速反映了坳陷的沉积特点,中地壳至莫霍面的低速与深断裂的性质有关. 上地幔热物质有可能沿着断裂的通道上侵,在地壳中部形成低速层,该剖面附近的大地电磁测深证实在相应的部位和深度上存在壳内高导层[5]. 相比之下,天山上地壳的速度远高于库车坳陷,中地壳 25 km 左右存在低速层,下地壳由高速块体构成;天山的莫霍面向下凹陷,出现相对宽缓的壳-幔过渡边界. 1979 年库车六级地震位于坳陷带地壳中部低速层的下方(1949 年七级地震无深度资料). 乌苏一带的地震位于天山北侧、准噶尔盆地的西南边缘. 准噶尔盆地西南沉积坳陷的深度大致为 10 km,盆地与天山的过渡边界可以追溯到 30 km 左右,因而构造边界的断裂切割深度不会超过 35 km. 四级以上地震分布在上地壳和下地壳的高速体周围(1944 年七级地震无深度资料).

通过分析上述两条剖面的速度结构和地震分布,它们共同的特征和简单的构造模式为:天山南缘的断裂深度大于北缘,已经切割到莫霍面附近;中地壳存在低速层,它有可能是上地壳和下地壳之间的韧性剪切带,起到了滑脱层的作用;宽缓的壳-幔过渡带意味着天山的莫霍面和上地幔顶部附近存在着与热活动有关的壳-幔分异作用,说明以高密度矿物组分下沉和低密度矿物组分上升为形式的物质交换仍在继续,由此产生的上地幔形变将附加应力作用在天山地壳的底部,使其成为构造不稳定的区域. 在南北方向的水平挤压和地幔形变力的共同作用下,天山的刚性上地壳可能沿着中地壳的韧性剪切带发生滑脱,在构造边界附近由于受到相邻块体的阻挡和边界断裂的制约不得不向旁侧的盆地发生推覆逆冲,造成脆性岩体的破裂或断层的错动,因此五级以上地震主要发生在地壳中下部位介质速度变化较大的区域或是高速块体的周围. 此外,吉尔吉斯天山与楚河盆地之间的地震带也存在着类似的特征[6,7,8]. 天山地区的震源参数表明大部分强震的破裂面具有逆冲走滑性质[9,10],这些结果与地表观测到的逆冲推覆现象基本吻合.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　伽师强震群

3.1　地震背景

伽师地处塔里木盆地西部边缘，毗邻南天山地震带和帕米尔弧形构造的东北侧．1996 年以来，伽师连续发生强烈地震，六级以上地震 11 次．根据经“主事件法”修定后的部分地震的震中位置[11]，地震主要集中在东经 76°50′—77°10′、北纬 39°25′—39°45′ 之间一个非常狭小的地带内(图 3)，震中呈近南北方向分布，特别是较大的地震更为明显，震源深度主要位于 10—30 km 之间．

伽师强震群比较靠近天山南麓的断裂带，如柯坪、托特拱拜孜等断裂(图 1)．虽然对伽师外围地区的活动构造做过大量的工作，也曾提出过一些发震的构造模式，但是震后在伽师地区没有发现地震断层的活动迹象，不易确定外围断裂与伽师地震的直接联系．是否地壳深部存在隐伏断裂？它们与伽师地震有什么联系？发震构造的动力学背景是什么？

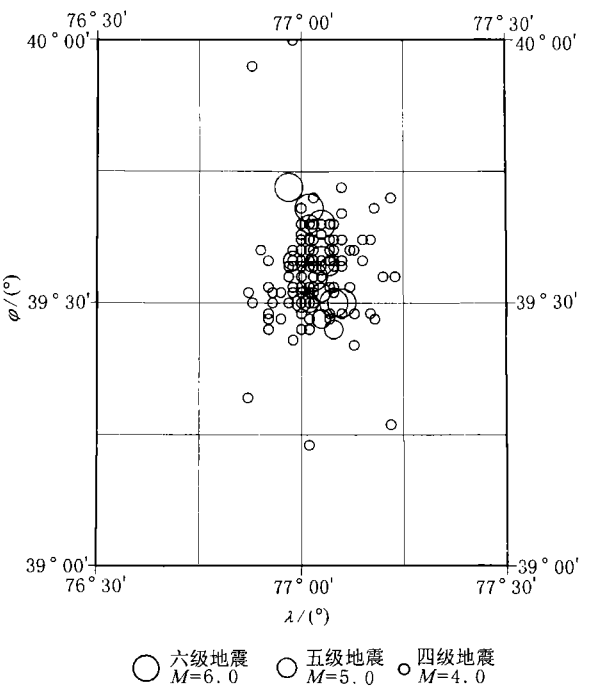

图 3　伽师 1997 年 $M_L \geq 4.0$ 地震的震中分布[11]

Fig.3　Epicenter distribution of Jiashi $M_L \geq 4.0$ earthquakes in 1997[11]

3.2　震源机制和应力特征

根据新疆和全国地震台网 P 波初动求取的震源机制，1997 年 6 个六级地震的震源断错以走滑为主，带有张扭性质，主压应力的方向多为北北东；但是 4 月 6 日两个地震的震源断错为正走滑，主压应力的方向为近南北，推测南北走向的断错面为主要的发震断层[12]．另外根据哈佛大学提供的伽师和柯坪一带 1996—1998 年五级以上地震的震源机制(图 4)，伽师西北部两个靠近柯坪断裂的地震为纯逆冲型，断层面走向近东西，主压应力北北西．这两个地震的震源断错面走向与柯坪断裂基本一致，显然震源机制中北倾的节面应该是地震的发震断层．伽师的地震分为走滑和倾滑两种类型，走滑地震的主压应力方向均为北北东，倾滑地震的张应力方向为北西．伽师地震走滑拉张的震源断错类型不同于天山其它地区在挤压环境下以逆冲为主的地震，说明伽师地区存在挤压与拉张共存并且相互制约的构造背景，而在伽师北面的柯坪一带转为挤压逆冲．鉴于天山大部分地震的破裂面平行于断裂的走向，推测伽师地震的主破裂面可能以近南北方向为主．

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

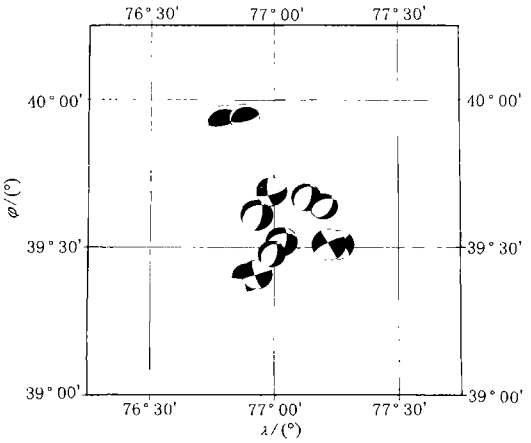

图 4 伽师 $M_S \geq 5.0$ 地震的震源机制(据哈佛大学)

Fig.4 Focal mechanism of Jiashi $M_S \geq 5.0$ earthquakes (from Harford)

3.3 深部构造

在伽师及其邻近地区的速度图像中(图 5(a)),南天山、帕米尔和塔里木盆地之间存在一个北北东方向展布的壳内低速带,它从帕米尔弧形构造带的东北侧沿着塔里木盆地的西南边缘延伸到南天山的山前地带,深度可以达到莫霍面. 其东侧的巴楚、麦盖提一带为高速区,是塔里木盆地西南地壳抬升幅度较大的一个古老块体;低速带西侧的帕米尔和南天山西端也是高速区,反映了造山带地壳的速度特性. 将 1996—1998 年伽师 4.0 级以上的地震和 1985 年乌恰 7.4 级地震及其余震投影在 20 km 深度的水平速度图像上时,发现它们分别位于这个低速带的东、西两侧. 穿过上述两个震源区的纵剖面 C–C',并将附近的地震投影在相应的深度上,得到纵向地壳速度结构和震源深度的分布状况(图 5(b)).

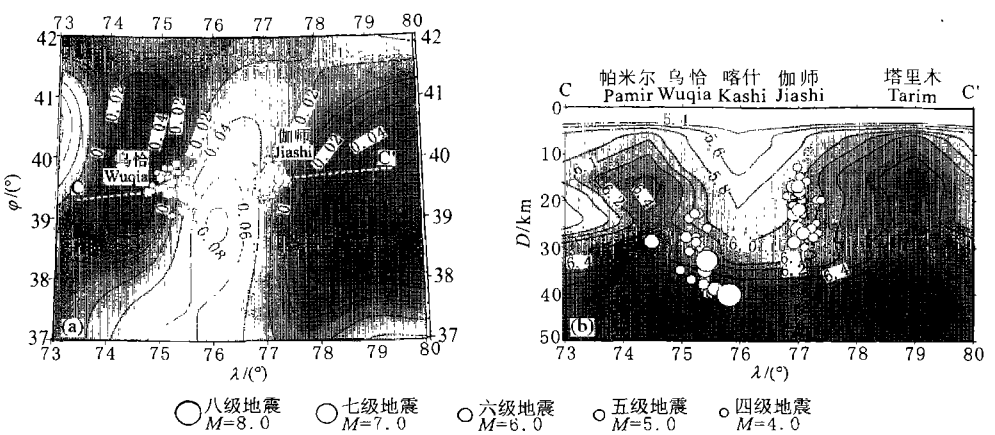

图 5

(a) 20 km 深度的速度扰动图像和伽师—乌恰地震的震中投影,图中数字表示 P 波速度扰动量;

(b) 伽师—乌恰地壳速度结构和震源分布图中数字表示P 波速度(单位km/s).

Fig.5

(a) Velocity perturbation image (depth = 20 km) and epicenter projection of Jiashi, Wuqia earthquakes;

(b) Jiashi-Wuqia crustal velocity structure and hypocenter distribution.

喀什坳陷上部沉积层的深度可达 15—20 km,中地壳直至下地壳的速度仍然很低,莫霍面附近变成宽缓的速度过渡带,而且明显地向下凹陷. 塔里木盆地西南巴楚隆起的地壳平均速度较高,莫霍面明显地被抬升;西侧的帕米尔也是高速区,它们共同组成两隆一坳的构造形态. 伽师的地震大部分沿着喀什坳陷与巴楚隆起之间的速度梯度带分布在 20—30 km 之间,1985 年乌恰 7.4 级地震和 1902 年阿图什八级地震位于喀什坳陷西侧的

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

速度梯度带附近,它们的震源深度比伽师地震略大,一般为 30—40 km. 推测该低速带是塔里木盆地和南天山、帕米尔弧之间的深部构造边界,速度梯度带反映了深部隐伏断裂的位置,它们的深度已经达到莫霍面,造成莫霍面被错断数公里,但是在浅部被较厚的盆地沉积覆盖. 伽师一侧的断裂有可能沿着梯度带向北北东方向延伸,这与伽师地震的震中分布和等震线的长轴方向基本吻合,同时也与震源机制中近南北方向的节面一致. 这两个地震区都位于该低速带向相邻高速体过渡的区域,它们代表了地壳介质物性变化较大的地带,说明地壳介质强烈的非均匀性是伽师地区发生强震的构造背景之一.

4　伽师地震的成因分析

伽师处在一个比较特殊的构造部位,它周围的塔里木盆地、南天山地震带和帕米尔构造弧分别属于不同的大地构造环境. 无论是地壳和上地幔的结构组成、物性状态,还是断裂运动方式、地壳形变速率以及热流和应力分布等方面均存在较大的差异,正是由于这些因素的共同作用制约了伽师和邻近地区的构造活动.

4.1　岩石物性差异及其原因

伽师及其邻区的地壳组成和物性状态有所不同. 虽然它们反映的是地震波速度的差别,实质上也是对地壳结构的物性状态、尤其是脆韧性程度的客观表述. 与高速的脆性岩体相比,低速体在一定程度上具有韧性,易于应变的积累.

前震旦纪结晶基底在喀什坳陷的深度达到 18 km[3],而在塔里木西南巴楚隆起仅仅只有 2—5 km,因此上地壳的低速主要为浅部沉积层所致;根据高温高压下岩石物性测试的研究[13],温度和压力是影响岩石地震波速度的两个主要因素,当深度较小时压力是引起岩石波速变化的主要原因;深度较大时,温度成为影响地震波速度的主要因素. 地壳岩石波速的研究也表明[14],在 700—800 MPa 的恒压条件下,当温度高于 400—500℃ 并达到一定的温度之后,由于羟基矿物的脱水作用,岩石或多或少会发生出溶(Exsolution). 岩石的出溶与波速的大小存在密切的联系,当岩石中含有熔体时,特别是在初熔阶段只要存在少量的熔体便可以导致地震波大幅度的降低[15].

伽师位于帕米尔、南天山、塔里木三个构造单元之间,构造边界附近的断裂带完全可能成为地幔热物质上侵的通道,因此下地壳较低的速度以及较宽的壳-幔过渡带也许是地幔热物质对下地壳发生底侵造成局部熔融的结果. 按照构造活动地区 30℃/km 的地温梯度,深度到 30 km 时伽师低速带的温度为 900℃,高于羟基矿物岩石的出熔条件;而构造稳定区的平均地温梯度为 20℃/km,相邻的塔里木盆地至 30 km 深度时的温度仅为 600℃,岩石出溶的可能性极小. 由此看来,温度增高导致岩石物性状态发生改变是构造边界下地壳速度偏低的主要原因.

4.2　热结构的影响

单纯的地壳生热不足以提供岩石出溶所需要的热量,地幔热物质的上涌有可能造成该地区构造不稳定,但是地幔热物质的来源是需要考虑的一个问题. 吉尔吉斯天山的热流值(77 mW/m^2)比周围的费尔甘纳盆地、伊塞克盆地和哈萨克地盾的伊犁盆地高出将近一倍[16],而塔里木盆地的热流值只有 20 mW/m^2 [17].

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

早期对吉尔吉斯天山地壳和上地幔的研究认为,那里存在"较热"的上地幔和小尺度对流[16],此后逐渐得到其它地球物理研究的支持[6,18,19,20],其中最重要的依据包括低速的上地幔和较宽的壳-幔过渡带. 相比之下,与此相邻的塔里木盆地西部巴楚隆起的壳-幔过渡带非常清晰,地震转换波测深表明塔里木盆地具有相对稳定的壳-幔结构[21],地震体波成像也证实塔里木是一个厚度为 250 km 左右的高速岩石层块体[1,3],这些事实说明塔里木盆地具有大陆稳定地块的必备条件. 因此从某种意义上分析,尽管伽师在地理位置上处于塔里木盆地的西部边缘,但是上地幔深部的构造活动仍然受到相邻造山带上地幔动力学作用的影响,吉尔吉斯天山上地幔的热活动有可能通过对流的方式传递到南天山西段和塔里木盆地的西部边缘,并沿着断裂部位向上侵入.

4.3 地壳形变速率和断层运动方式

帕米尔构造弧位于青藏高原西北角的突出部位,最北端的挤压速率达到 20—40 mm/a,东北侧为 9—13 mm/a[22]. 近期的 GPS 观测发现吉尔吉斯天山的地壳形变速率由南向北递减,吉尔吉斯天山南缘最大的形变速率为 20 mm/a,在天山北缘与盆地交界处突然降低,至哈萨克斯坦地盾南缘仅有 0—5 mm/a[23]. 这些资料表明造山带的地壳构造形变十分强烈,整个天山地区都是应变能量积累的场所;相比之下,地盾或地台等构造稳定区的内部形变则比较微弱,GPS 观测表明在南北方向上塔里木块体基本上是不动的,由于它的岩石层强度较大,地壳的形变主要以整体的移动为主[17]. 地壳形变速率相差最大的地带位于造山带与盆地的结合部位,也是地震活动比较强烈的地区.

上述资料表明,尽管在印-欧大陆碰撞的影响下,帕米尔、南天山以及塔里木均发生向北的运动,但是它们的形变速率是不同的,表现为由南向北、由西向东逐渐递减,显然帕米尔和南天山的形变速率高于塔里木盆地. 除此之外,新构造运动的升降幅度也存在较大的差异. 帕米尔和南天山都是高海拔的地区,山体的抬升至今仍在继续,而塔里木则处于相对的沉降区. 帕米尔、南天山和塔里木之间一快一慢、一升一降的相对运动势必在构造边界附近产生较大的应力差,喀什一带的低速带可能正是边界附近发生剪切作用造成岩石破裂的结果.

天山两侧的断裂基本上都是纬向构造,一些较大的断裂基本平行于天山主构造线的方向,并且近于垂直南北方向的主压应力轴,震源机制的主破裂面也大都与天山南北缘的断裂面吻合,因此不难理解在南北方向压应力的影响下天山沿着两侧断裂向盆地逆冲. 但是伽师地震的构造背景有所不同,深部地球物理资料揭示的构造走向为北北东或近南北方向,它们大致平行于南北方向的主压应力场,因此在近南北走向的构造边界附近非常容易发生剪切破裂或者在先期断裂的基础上发生走滑运动,伽师五级以上地震的震中分布似有北北西和北北东两组排列方向;北西西和近东西方向的张应力和相邻块体之间的垂直升降运动使震源断错面发生正倾滑运动.

4.4 低速层的滑脱作用

通常认为壳内低速层是由于温度升高导致岩石的地震波速度降低所致,这一推论得到了大地电磁测深的有力支持,吉尔吉斯天山和南天山、西昆仑山等地震活动带都存在壳内高导层[5,7]. 有关研究认为地震的能量释放往往发生在速度较高的区域,而破裂的起始和终止通常位于低速区附近[24],这说明发震构造主要分布在岩石强度较大的地区. 在整

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

个天山地区，较大的地震或震群事件主要集中在高速和低速块体之间的过渡区域，那里也是断裂发育的地带．相反，低速区因自身具有较低的抗剪能力不易应力的积累，但是它可以通过形变将较大的能量传递到相邻的高速块体周围，促使脆性岩体发生破裂．由于少量的部分熔融能够有效地增加岩石蠕变的扩散速率，使岩石的变形机制从位错蠕变向扩散蠕变转化，大幅度地降低了应变需要的差异应力[25]．可见随着岩石变形机制的转变和应变速率的增加，岩石的强度也必然会降低，导致在地壳深部形成韧性剪切带．特别当它们出现在造山带的地壳中部和盆-山边界附近时，低速层作为上地壳和下地壳之间的滑脱带，为脆性岩体发生层间滑动创造了条件．

5　结　　论

天山地震带的深部结构具有构造活动地区的特征．地壳中部存在低速带，天山南缘的断裂深度较大，达到或超过了莫霍面的深度，而天山北缘的断裂仅仅达到中地壳的底部；盆-山之间的强震主要发生在地壳中、下部位速度变化较大的区域，或者是壳内高速体的周围，并与岩石的刚性程度有关；地壳中部的低速层对上地壳的滑动和向两侧盆地的逆冲推覆起到了重要的作用，受莫霍面和上地幔顶部物质交换作用的影响，天山还未形成清晰的壳-幔边界．

伽师强震群发生在塔里木与帕米尔、南天山的构造边界附近．尽管在地表上看不到构造活动的痕迹，但是在地壳深部存在一个北北东向的低速带，成为相邻构造块体之间的韧性剪切带和深部边界；沿着壳-幔边界可能存在上地幔热物质的侵入，帕米尔、南天山和塔里木之间的相对运动以及在物性结构、形变速率、升降幅度等方面的差异是造成低速带边界岩石破裂、导致伽师、乌恰、喀什一带发生强烈地震的主要原因．

参　考　文　献

[1] LIU Fu-Tian, WU Hua, LIU Jian-Hua, et al. 3-D velocity images beneath the Chinese continent and adjacent regions. *Geophys. J. Int.*, 1990, **101**:379—394.

[2] 李　强，刘瑞丰，杜安陆．新疆及毗邻地区深部孕震环境和地震成因研究．地震学报，1995，**17**(4)：432—439.
LI Qiang, LIU Rui-Feng, DU An-Lu. Research on seismogenic environment for deep earthquakes and cause of earthquakes in Xinjiang and its adjacent areas. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1995, **17**(4):432—439.

[3] 胥　颐．中国大陆西北地区的地震层析成像及其构造意义［博士论文］．北京：中国科学院地质与地球物理研究所，1999.
XU Yi. Seismic tomography beneath northwestern Chinese continent and its tectonic implication [Ph. D thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Gedogy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1999.

[4] 梅世蓉．新疆及邻区强震发生的深部条件与坚固体孕震模式的新证据．内陆地震，1997，**11**(2)：97—101.
MEI Shi-Rong. Deep condition of strong earthquakes occurring in Xinjiang and neighboring areas and new evidence for strong body seismogenic pattern. *Inland Earthquake*, 1997, **11**(2):97—101.

[5] 鲁新便，田春来．新疆天山及邻区电磁测深剖面地质结构和构造研究．见：新疆第三届天山地质矿产研讨会论文集．乌鲁木齐：新疆人民出版社，1995.
LU Xin-Bian, TIAN Chun-Lai. Research on geological structure and tectonics based on magnetotelluric sounding profiles of the Tianshan and adjacent regions in Xinjiang. In: Symposium for the 3th Tianshan

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

geology and minerals seminar in Xinjiang (in Chinese). Urumqi: Xinjiang People Publishing House, 1995.

[6] Roecker S W, Sabitova T M, Vinnik L P, et al. Three-dimensional elastic wave velocity structure of the western and central Tien Shen. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(B9):15779—15795.

[7] Trapeznikov Yu A, Andreeva E V, Eatalev V Yu, et al. Magnetotelluric soundings in the Kyrgyz Tien Shan. Izvestiya, *Physics of Solid Earth*, 1997, **33**(1):1—17.

[8] Sujoy Ghose, Michael W Hambueger, Jean Virieux. Three-dimensional velocity structure and earthquake locations beneath the northern Tien Shan of Kyrgyzstan, central Asia. *J. Geophys. Res.*, **103**(B2):2725—2784.

[9] Nelson M R, McCaffrey R, Molnar P. Source parameters for 11 earthquakes in the Tien Shan, central Aisa, determined by P and SH waveform inversion. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**:12629—12648.

[10] Sujoy Ghose, Michael W Hambueger, Charles J Ammon. Source parameters of moderate-sized earthquakes in the Tien Shan, central Asia from regional moment tensor inversion. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(26):3181—3184.

[11] 周仕勇. 1997 年伽师强震群研究及其生成机理的探索 [博士论文]. 北京:中国地震局地球物理研究所,1999.
ZHOU Shi-Yong. Research on source parameters and seismogenisis of the Jiashi strong earthquake swarm 1997 [Ph. D thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 1999.

[12] 朱令人,苏乃秦,杨马陵. 1997 年新疆伽师强震群及三次成功的临震预报. 中国地震,1998,**14**(2):101—115.
ZHU Ling-Ren, SU Nai-Qin, YANG Ma-Lin. Activity of the 1997 Jiashi strong swarm in Xinjiang and three successful impending predictions for it. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1998, **14**(2):101—115.

[13] 刘永祥,伍旭光. 高温高压下岩石波速与地壳深部的物质组成. 地球物理学报,1997,**40**(2):221—229.
LIU Yong-Xiang, WU Xu-Guang. Wave velocity in rocks under high temperature and pressure and composition of the deep crust. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(2):221—229.

[14] 张友南,马 瑾. 深部地壳镁铁质岩石波速研究. 地球物理学报,1997,**40**(2):221—229.
ZHANG You-Nan, MA Jin. Investigation on compressional wave velocity of mafic rocks in deep crust. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(2):221—229.

[15] 杨晓松,金振民. 壳内部分熔融低速层及其研究意义. 地球物理学进展,1998,**13**(3):38—45.
YANG Xiao-Song, JIN Zhen-Min. The low velocity zone resulted from crustal partial melting and its significance. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 1998, **13**(3):38—45.

[16] Vinnik L P, Saipekova A M. Structure of the lithosphere and asthenosphere of the Tien Shen. *Annales Geophysicae*, 1984, **2**(6):621—626.

[17] 高 锐,李德兴,卢德源等. 新疆地学断面(西昆仑—塔里木—天山)岩石圈的现今活动. 中国地球物理学会年刊. 西安:西安地图出版社,1998,336.
GAO Rui, LI De-Xin, LU De-Yuan, et al. Recent lithospheric activity along the geotransect across west Kunlun—Tarim—Tianshan in Xinjiang. In: Annual of the Chinese Geophysical Society in 1998. Xi′an: Xi′an Cartographic Publishing House, 1998, 336.

[18] Kosarev G L, Petersen N V, Vinnik L P, et al. Receiver function for the Tien Shen analog broaden network: Constrains in the evolution of structures across the Talasso-Fergan fault. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(B3):4437—4448.

[19] Curtis Andrew, Woodhouse John H. Crust and uppermantle shear velocity structure beneath the Tibeten plateau and surrounding regions from interevent surface wave phase velocity inversion. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(B6):11789—11813.

[20] Makeyava L I, Vinnik L P, Roecker S W. Shear-wave splitting and small convection in the continental upper mantle. *Nature*, 1992, **358**(9):144—145.

[21] 张家茹,邵学钟,范会吉. 塔里木盆地中部地震转换波测深及其解释. 地震地质,1998,**20**(1):34—42.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ZHANG Jia-Ru, SHAO Xue-Zhong, FAN Hui-Ji. Deep sounding survey by converted waves of earthquakes in central part of the Tarim basin and its interpretation. *Seismology and Geology*, 1998, **20**(1): 34—42.

[22] 国家地震局．中国岩石圈动力学地图集．北京：中国地图出版社，1989．
State of Seismological Bureau. Lithospheric dynamic atlas of China (in Chinese). Beijing: Cartographic Publishing House, 1989.

[23] Addrakhmatov K Ye, Aldazhanov S A, Hager B H et al. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, 1996, **384**(5):450—453.

[24] Eberhart-Phillips D, Michael A J. Three-dimensional velocity structure, seismicity, and fault structure in the Parkfield region, central California. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**:15737—15758.

[25] Dell' Argelo L N, Tullis J. Experimental deformation of partially melted granitic aggregates. *J. Metamophic Geol.*, 1998, **6**:495—515.

CRUSTAL STRUCTURE AND TECTONIC ENVIRONMENT OF STRONG EARTHQUAKES IN THE TIANSHAN EARTHQUAKE BELT

XU YI　LIU FU-TIAN　LIU JIAN-HUA　SUN RUO-MEI

(*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

[Abstract] The deep structure of the Tianshan earthquake belt is investigated, based on the seismic tomography of the northwestern China. The result indicates that a ductile detachment layer with low velocities exists in the mid-crust of the Tianshan earthquake belt; the fault in the southern Tianshan extands beyond the depth of the Moho, while the fault in the northern Tianshan only reaches mid-crust; the depth of the Moho of the Tianshan is more than 50km; moreover, the crust-mantle boundary is composed of a wide velocity transition belt. Strong earthquakes are mainly concentrated in the mid-lower crust where a sharp velocity variation is observed near the basin-mountain boundaries. A low velocity zone is found between the Pamir, southern Tianshan and Tarim, with an orientation of NNE. The earthquakes in Wuqia and Jiashi are separately located in the west and east sides of this low velocity zone. It is inferred that the relative motion of the Pamir, southern Tianshan and Tarim is a major reason to cause deformation occurring within this low velocity zone and fracturing near its boundaries. Besides, the intrusion of hot mantle has played an important dynamic role in tectonic activities in this region.

[Key words] Tianshan earthquake belt, Crustal structure, Velocity image, Jiashi earthquake.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net