

# 新疆天山及邻区地壳上地幔 三维速度图象\*

胥 颐<sup>1)</sup> 朱介寿<sup>2)</sup> 刘志坚<sup>1)</sup>

张华卿<sup>1)</sup> 朱 燕<sup>1)</sup>

1) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

2) 中国成都 610000 成都理工学院

## 摘 要

利用地震层析成像法建立起天山和邻近区域的地壳上地幔三维速度图象, 结果表明: (1) 北天山和天山中部地区为隆起的高速地区, 吐鲁番盆地、库车拗陷、柯坪断块、喀什拗陷和准噶尔盆地南缘构成了天山北南两侧的山前低速区. 伊犁盆地和西昆仑是壳内稳定的高速块体, 巴楚隆起一直延伸到地壳的底部. 沿天山主峰和西昆仑公格尔一带, 莫霍面形成五大低速区; (2) 北天山和准噶尔西部岩石圈厚度较大, 具有高速特性, 在其顶部 80 km 左右可能存在软流物质. 天山南部岩石圈的性质不明显, 喀什地区位置 120—280 km 之间存在的低速锥形体估计与地幔软流物质的上涌有关; (3) 速度结构与地震活动的确存在着一定的联系, 特别是上地壳低速区与下地壳高速区之间的梯度带往往与强震的分布有关, 有可能成为中强地震的孕育场所; (4) 天山南北缘的地震多发地带是壳内介质结构极不均匀的地区, 也是深大断裂较为发育的区域, 在外力的作用下很容易产生破裂或层间滑动而引发地震.

**关键词** 层析成像; 非均匀性; 天山地区; 速度图象

## 引 言

天山地区位于亚洲大陆腹地, 是我国内陆地震活动最为强烈的地区之一, 同时也是世界著名的强震活动带. 由于天山被夹持在准噶尔、塔里木以及哈萨克等刚性块体之间, 在天山内部以及山麓和盆地的边缘地带形成了许多深大断裂(黄河源, 1992). 它们不仅影响和反映了不同地质构造单元的演化进程, 而且控制了天山地区中强地震的活动, 造成极为特殊的地震地质背景(杨章, 1990; 冯先岳, 1986). 由图 1 可见, 天山地区的中强地震主要分布在环绕塔里木、准噶尔两大盆地的山麓地带, 与深大断裂的构造运动有着密切的联系. 但是长期以来, 由于缺乏深部资料, 对天山地震带各个危险区的研

\* 1993 年 6 月 26 日收到初稿, 1994 年 3 月 27 日决定采用.

究仅仅限制在地表附近,或是利用重磁资料进行定性的解释,缺少比较完整和准确的资料,无法深入地认识天山地区强震的深部构造背景以及合理地解释地震的作用过程.近几年来,为了加强和进一步开展这方面的工作,不少专家和学者都作出了不懈的努力,通过各种方法和途径研究探讨天山地区的构造特点和地壳上地幔结构特征,其中包括天山活断层填图(冯先岳等,1991)、横波速度结构研究(宋仲和等,1991)、人工地震测深<sup>①</sup>取得了初步研究成果.但是它们都只反映了天山局部地区的构造特征,或者只建立了较大范围的地壳上地幔速度模型,难以对天山地区的深部构造建立一个统一的概念和认识,特别是没有反映出天山强震危险区的深部构造特征,无法研究强震的孕育背景和作用过程,因此有必要开展进一步的工作.

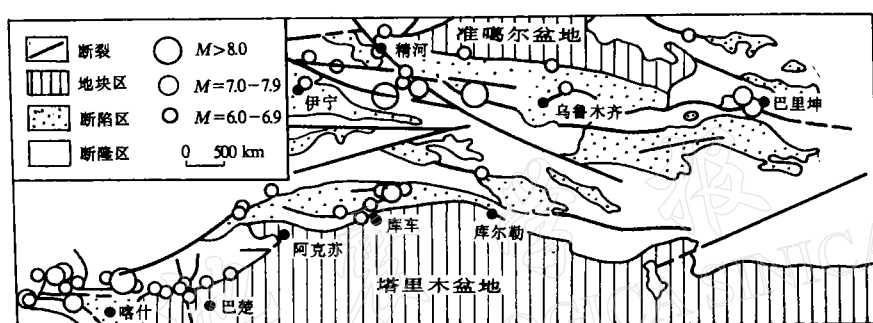


图1 天山活动断裂和强震

考虑到在天山地区开展地震测深工作的具体困难,只有充分利用天山一带中小地震繁多、分布相对均匀的特点,采用近些年发展起来的地震波层析成像技术,才有可能建立起天山地区地壳上地幔的三维速度图象,为研究整个天山地区强震危险区的深部构造背景提供基础资料.

## 1 资 料

研究区域位于北纬  $36^{\circ}-46^{\circ}$ 、东经  $74^{\circ}-94^{\circ}$  之间,基本上覆盖了整个天山地区和准噶尔、塔里木盆地与天山接壤的边缘部分,同时也包括了西昆仑地区的一部分.在研究范围内共存在三个强震构造带,即北天山强震构造带、南天山强震构造带和帕米尔—西昆仑强震构造带,它们控制了整个天山和西昆仑地区中强地震的活动,是断裂构造活动非常强烈的地区.研究区内共有地震台站近 30 个,它们基本均匀地分布在天山及其邻近区域内,长期以来这些台站积累了大量的地震资料(图 2).从地震的分布规律中可以看出,中强地震的发震地点主要集中在某些特殊的构造部位,具有一定的局限性,但是较小震级的地震,特别是 2—3 级以下的地震不仅频度较高,而且分布广泛,基本上覆盖了整个研究区域,为天山地区深部研究工作创造了有利的条件.

<sup>①</sup> 徐新忠、王有学、蒋亚明、党淑娟、聂定平,1991.新疆可可托海—甘肃阿克塞人工地震爆破测深剖面的地壳速度结构研究及其大地构造单元的划分.第二届天山地质矿产研讨会论文集,488—496.

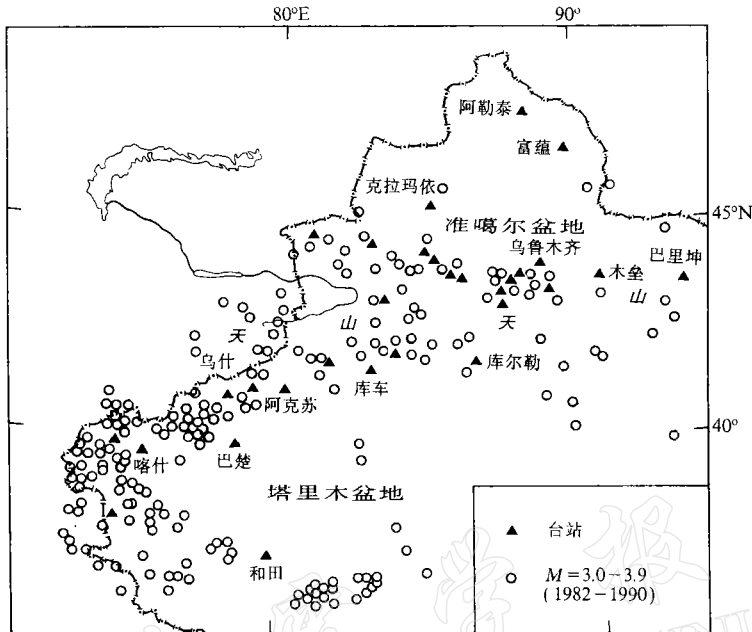


图 2 地震台网和小震分布

根据地震层析成像原理的要求,地震射线应尽可能地均匀覆盖反演区域. 由于各方面条件的限制,新疆地震台网的密度明显过于稀疏,必须使用大量的地震以便弥补射线的不足. 一般情况下,一个地震至少应保证 4—5 个以上的台站记录到比较清晰的初动 P 波,并且时间服务准确无误. 在地震频繁发生的地区,如乌恰、喀什等地,震级的下限一般在 2.0—2.5 左右;而对于某些地震比较稀少的地区,则将震级调整在 1.0—1.5 之间. 按照这一原则,我们从台网观测报告中挑选出 1982—1990 年发生在研究区域内的近 4 000 个地震,同时又选出了 150 个震中距大于 30°的远震到时数据,以便研究上地幔的速度结构,共获取了 2 万多组 P 波到时数据. 所有的区域地震 P 波到时输入计算机后,均重新进行定位,修订和删除了部分到时不合理和震中偏差较大的地震,远震数据也做了类似的处理.

## 2 方法概述

### 2.1 初始模型的选取

天山地区的测深工作基础非常薄弱,缺乏较为详细的速度资料. 石油部门取得的地震资料大都局限在两大盆地或是边缘地带的浅层附近,难以反映深层的速度分布规律. 为此,我们以可可托海—甘肃阿克塞依人工地震剖面新疆境内的资料为基础,并参考了面波反演的速度结构,得到研究区的初始速度模型(表 1).

表 1 初始速度模型

深度/km	5	16	27	35	50	50	80	120	200	280
速度/km·s <sup>-1</sup>	5.8	6.0	6.2	6.4	7.2	8.0	8.11	8.15	8.38	8.57

## 2.2 计算方法

根据地震层析成像技术的基本理论(朱介寿, 1988), 沿纵横方向将研究区域划分成许多规则的块体. 取  $v$  为初始速度模型,  $s=1/v$  为参考慢度, 相应的慢度扰动为  $\Delta s = -\Delta v/v^2$ . 当块体划分的足够小时, 块体内的慢度扰动  $\Delta s$  可以视为常数, 则第  $i$  个地震到达第  $j$  个接收台站时的直达波走时残差方程可表示为

$$\Delta t_{ij} = \sum_{k=1}^K l_{ijk} \Delta s_k + \left( \frac{\partial t_{ij}}{\partial x} \right) \Delta x_i + \left( \frac{\partial t_{ij}}{\partial y} \right) \Delta y_i = \left( \frac{\partial t_{ij}}{\partial z} \right) \Delta z_i + \Delta t_i + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

式中,  $l_{ijk}$  为第  $i$  个地震到达第  $j$  个台站时地震射线在第  $k$  块内的长度,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  为震源参数修正项,  $\Delta t$  为发震时刻的修正项,  $\epsilon_{ij}$  为观测误差和泰勒展开式中的高阶误差项. 根据式(1)对各个块体的慢度扰动  $\Delta s$ , 以及震源参数的修正项( $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 、 $\Delta t$ )进行联合反演, 即可得到介质的三维速度分布(朱介寿等, 1991).

## 3 计算结果

在各个深度的成像图中, 均以不同颜色的色标表示速度的扰动值, 共将地壳分为 5 层, 上地幔分为 4 层, 下面将分别讨论各层的速度特征.

### 3.1 地壳上层的速度图象

在 5 km 深度的图象中(图略), 巴里坤以北额尔齐斯地向斜的南部出现一个低速条带, 靠近三塘湖盆地, 那里曾被认为是西伯利亚板块和中国板块的缝合部位; 艾比湖断陷盆地、吐鲁番盆地、塔里木盆地西北缘均出现了低速区, 反映了这些盆地的沉积特点. 但是, 伊犁盆地的情形不同于上述盆地, 它属于山间盆地, 是山体内部一个相对稳定的地块, 基底埋深和沉积层厚度不大, 因此速度较高. 天山博格达一带和西昆仑的高速区显然与山区的基岩出露有关, 而巴楚的高速区估计是寒武、奥陶纪古老地层的外露造成的. 5 km 图象中, 最大正扰动 7%, 最大负扰动 -5%, 分别对应于 6.36 km/s 和 5.64 km/s 的速度值.

在 16 km 深度的图象中(照片 1, 见图版), 上述各速度异常区的范围进一步扩大, 正负速度扰动值也有所增加, 分别达到了 17% 和 -11%, 相应的速度值为 7.32 km/s 和 5.56 km/s. 最明显的是准噶尔盆地南缘、吐鲁番盆地和库车山前拗陷均为低速区, 它们构成了天山北南两侧的低速边界. 此外, 尤尔多斯盆地为负异常; 西昆仑、巴楚隆起、沙湾至博格达的天山中段仍为高速区. 塔里木盆地拗陷较深的地段, 如塔北的库尔勒、塔西北的喀什、塔西南的和田一带为低速区.

### 3.2 地壳中、下部的速度图象

地壳中下部是天山地区地震活动的主要场所. 因而, 地壳中下部的速度图象与地震活动的构造背景存在着一定的联系.

从 27 km 深度的图象(照片 2, 见图版)可以看出, 天山一带分布着一系列大大小小

的低速区. 若将区内 6.0 级以上强震震中投影到这个深度上, 统计后发现, 它们大多分布在低速区及其边界附近, 或是高速和低速区之间的过渡带内. 其中, 巴里坤和七角井以南的低速区曾发生过 1842 年 7.5 级和 1914 年 7.5 级地震, 并且有古地震活动迹象(Bo, 1992). 乌苏—玛纳斯低速带发生过 1906 年 7.7 级和 1944 年 7.25 级地震, 1812 年的 8 级地震发生在该低速区向伊宁高速区的过渡带上. 库车低速区 1949 年发生过 7.25 级地震. 柯坪—阿合奇低速区是天山主要中强震地区之一, 曾多次发生过中强地震. 喀什低速区发生过布伦口 7 级地震和 1902 年阿图什 8.25 级地震以及乌恰多次 7 级地震. 和田低速区发生过墨玉 7 级地震, 塔什库尔干高速区向喀什低速区的过渡带上发生过 1895 年塔什库尔干 7 级地震. 这些现象都表明, 地壳中部的低速层是一个比较软弱的构造层位, 有可能成为新疆天山及其邻区中强地震活动的构造背景之一.

在 35 km 深度的图象中(图略), 值得关注的是, 北天山西部高速区与博格达高速区之间出现了一个南北向的低速条带, 沿昌吉—后峡将天山分为东西两段, 乌鲁木齐地区的地震活动主要就发生在这个低速条带附近. 准噶尔盆地南部的低速区逐渐消失, 伊塞克湖地区形成大片低速区域, 库尔勒以南的沙雅、尉犁出现了局部负异常区.

### 3.3 莫霍面附近的速度图象

50 km 深度的图象(照片 3, 见图版)清晰地反映了天山及邻区莫霍面的起伏变化情况. 最大负扰动为  $-14\%$ , 相当于  $6.22 \text{ km/s}$  的地壳速度; 而边缘隆起部位的最大正扰动为  $7\%$ , 相当于  $7.74 \text{ km/s}$  的上地幔顶部速度. 主要有以下 5 个莫霍面拗陷区, 它们依次为:

- (1) 博格达拗陷区: 东起巴里坤、西至乌鲁木齐以东的博格达山一段, 其中心位于木垒附近, 南面的吐鲁番—哈密盆地呈隆起的条带, 北部的速度接近正常值;
- (2) 木孜达坂拗陷区: 位于轮台以北、新源以南的大尤勒都斯一带, 其南面的库车、轮台所在的塔里木盆地边缘局部隆起, 但幅度不大;
- (3) 哈尔克山拗陷区: 位于伊犁盆地以南、拜城以北的哈尔克山地区, 形成一近似椭圆形的区域;
- (4) 喀拉铁克山拗陷区: 位于阿合奇西南的喀拉铁克山地区, 其形状东宽西窄, 近似于三角形;
- (5) 公格尔山拗陷区: 位于西昆仑地区的公格尔、慕士塔格山一带, 其东部和南部的外侧存在条形隆起区域.

天山地区莫霍面拗陷区的地貌特征均为较高山峰所在地, 如博格达、汗腾格里等. 地壳厚度较大, 与地貌特征形成良好的镜像关系, 这种现象与新疆  $1^\circ \times 1^\circ$  布格重力异常的特点以及地壳等厚线的分布基本上是一致的.

### 3.4 上地幔的速度图象

80 km 深度的图象(照片 4, 见图版)显示出上地幔顶部附近的速度变化特征. 最引人注目的低速区位于精河、乌苏、石河子至乌鲁木齐以南后峡一带. 据资料介绍(黄和源, 1992), 婆罗科努超岩石圈断裂和准噶尔南缘岩石圈断裂在精河、乌苏一带交汇, 构成了一个三角形的区域. 估计在这两条深断裂的控制作用下, 交汇部位上地幔顶部的物质热动力状态发生了变化, 从而产生较大范围的低速区域.

在 120 km 深度上(图略), 最显著的是准噶尔西部的高速区和南天山乌恰、喀什一带的低速区. 前者的速度扰动高达 10%, 明显高于周边地区的平均速度, 表明在准噶尔盆地西部的深层存在着刚性的块体, 它的出现有可能反映了岩石圈的厚度和特性. 天山其它地区这一深度的速度分布很不均匀, 说明深部物质的成分非常复杂. 至 200 km 深度时(图略), 准噶尔盆地西部深层高速块体的扰动值有所下降, 而天山博格达和依连哈比尔尕一带出现了高速条带, 最大正扰动值达 13%; 乌恰、喀什低速区的范围有所减小. 在 280 km 深度上(图略), 北天山和准噶尔西部深层的高速区域趋于消失, 取而代之为零散分布的局部低速区, 表明已接近天山的岩石圈底部, 可能与深层物质的局部熔融状态有关.

#### 4 速度结构与强震分布

建立天山地区三维速度图象的目的, 不仅是研究该地区地壳上地幔介质的横向非均匀性, 更重要的在于寻找和发现与强震活动有关的深部构造特点, 以便合理地解释地震的深部形成机制. 统计资料表明, 天山地区大部分中强地震的震源深度位于 30 km 左右

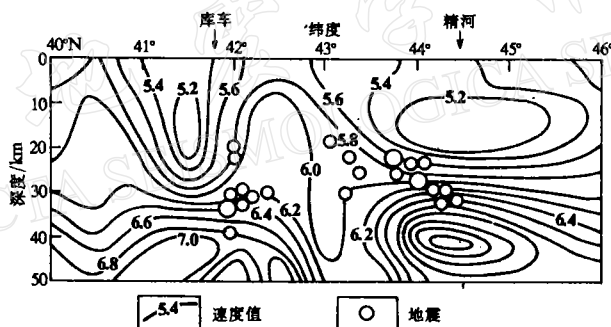


图 3 天山地壳速度剖面

的地壳中下部位, 并且有由北向南逐步加深的趋势. 从地表现象分析, 深大断裂的构造活动有着明显的控震作用. 但是, 在几十公里的地壳深处, 岩石是如何产生构造运动而引发地震的, 这正是我们想要知道的原因. 速度剖面 AB(图 3) 穿越库车和精河南这两个地震多发区, 同时将剖面附近发生的中强地震, 按其深度投影到相应的位置上, 目的是试图揭示这两个地区的深部孕震背景和发震构造的特征.

从图中看出, 库车和精河以南的上地壳速度等值线向下拗陷, 而下地壳中相应位置的等值线却向上隆起, 与上部的拗陷互相对应, 其间形成一个狭窄的速度梯度带. 它的深度约 30 km, 速度值从 6.0 km/s 陡然增至 7.0 km/s, 大部分中强地震的深度投影也都分布在上部拗陷的底部或是梯度带附近, 其中包括 3 个 7 级以上的较大地震. 在天山其它几个强震多发地区, 如喀什、柯坪、乌什、拜城、石河子等地都可看到类似的现象, 它们都反映出一个共同的深部构造特点, 即上地壳低速区与下地壳高速区之间存在明显的梯度层, 说明强震的发生与地壳介质的非均匀性有密切的关系.

通常非均匀物质的结构很不稳定, 极易在外力的作用下打破平衡状态. 速度急剧变

化的梯度带是岩石物性成分最不均匀的薄弱层,也是应力易于集中的场所,因而容易发生破裂.弹性理论的数值模拟结果表明(郭万武等,1993),壳内隆起和坳陷的轴部是环向拉压力和纵向拉压力作用最强的部位,而轴部的两侧是平错力作用最强的区域,尤其当壳内存在先期的断裂时,有可能沿隆起与坳陷轴部的先期断裂发生逆冲和走滑型地震.天山两侧的山前地带由于各自的构造演化和沉积特点不同,物质的成分和性质也截然不同,同时也是深大断裂分布较广的区域,在构造应力的长期作用下,很容易沿断裂或薄弱层位活动而引发地震.

## 5 结 论

(1) 天山及其邻区的地壳结构非常复杂.除伊犁盆地以外,几乎所有的盆地和盆地边缘部分均为低速区,伊犁盆地是地壳内一个相对稳定的刚性地块;北天山和天山中部基本上是高速异常区.吐鲁番盆地、库车山前坳陷、柯坪断块和喀什坳陷以及准噶尔南缘构成天山南侧的山前低速地带;巴楚隆起是一个纬向构造单元,一直延伸到地壳的底部,西昆仑为壳内的刚性块体,有可能反映了地壳的局部缩短(Molnar and Gray,1979);沿天山主峰和西昆仑公格尔一带,莫霍面形成五大拗陷区.

(2) 上地幔岩石圈的速度分布极不均匀.北天山和准噶尔西部岩石圈的厚度较大,结构比较稳定,在其顶部 80 km 左右出现软流层;南天山岩石圈的性质不明显,反映出很不稳定的结构特征(Vinnik and Saibekova, 1984);喀什地区 120—280 km 之间的低速锥形体,估计与地幔软流物质的上涌或帕米尔—兴都库什俯冲带的存在有关(Roecker, 1982; 宁杰远、臧绍先, 1990).

(3) 速度结构与地震活动存在着一定的联系,尤其是上地壳低速区和下地壳高速隆起之间的梯度带,有可能成为中强地震的孕震场所.

(4) 天山南北缘的地震多发区是壳内介质结构最不均匀的地区,同时也是深大断裂非常发育的地带,在外力的作用下很容易沿破裂面或构造薄弱层位滑动而引发地震.

## 参 考 文 献

- 冯先岳, 1986. 天山活动断层. 中国地震, 2, 2, 84—89.
- 冯先岳、邓起东、石鉴邦、李军、尤惠川、张勇、于贵华、吴章明, 1991. 天山南北缘活动构造及其演化. 活动断裂研究, p. 199, 1—15. 地震出版社, 北京.
- 郭万武、向光中、吕德徽、胡存德、王建瑞, 1993. 简析壳内隆起和坳陷构造在地震活动中的作用. 内陆地震, 7, 1, 65—73.
- 黄河源, 1992. 新疆深断裂与地震活动. 内陆地震, 6, 4, 340—350.
- 宁杰远、臧绍先, 1990. 帕米尔—兴都库什地区地震空间分布特征及应力场特征. 地球物理学报, 33, 6, 657—669.
- 宋仲和、安昌强、陈国英、陈立华、庄真、傅竹武、吕梓龄、胡家富, 1991. 中国西部三维速度结构及其各向异性. 地球物理学报, 34, 6, 694—707.
- 杨章, 1990. 天山地震地质概况. 内陆地震, 4, 4, 332—334.
- 朱介寿、刘富田、陆涵行、王椿镛、骆循, 1988. 研究地壳上地幔结构的地震体波计算方法, p. 181, 159—178. 科学出版社, 北京.
- 朱介寿、Chun, K. Y.、骆循、West, G. F.、Kokoski, R., 1991. 阿德朗达克—西魁北克地震带地壳三维速度结构成像. 地球物理学报, 34, 2, 161—171.

- Bo, M. X. , 1992. Analysis of historical macroquakes and paleo-seismotectonics in Xinjiang and its application in the medium and long term earthquake prediction. *Inland Earthquake*, **6**, 2, 206—215.
- Molnar, P. and Gray, D. , 1979. Subduction of continental lithosphere: some constraints and uncertainties. *Geology*, **7**, 58—62.
- Vinnik, L. P. and Saibekova, A. M. , 1984. Structure of the lithosphere and asthenosphere of the Tianshan, *Annales. Geophysica*, **2**, 621—625.
- Roecker, S. W. , 1982. Velocity structure of the Pamir—Hindukush region: possible evidence of subducted crust. *J. Geophys. Res.*, **87**, 945—959.

地震学报  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA