

陈向军、上官文明、宋秀青等, 2014, 新疆全区和分区地壳速度模型的分析, 中国地震, 30(2), 178~187。

新疆全区和分区地壳速度模型的分析

陈向军¹⁾ 上官文明¹⁾ 宋秀青²⁾ 王俊³⁾ 刘双庆⁴⁾
缪发军³⁾ 朱元清²⁾

1) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐市新市区科学二街 338 号 830011

2) 上海市地震局, 上海 200062

3) 江苏省地震局, 南京 210014

4) 天津市地震局, 天津 300201

摘要 首先分析了新疆地震台网长期使用的“3400 走时表”, 并拟合得到了符合该走时表的速度结构模型。然后对新疆地区 2009 年 1 月~2013 年 12 月间记录的所有地震震相数据进行了速度拟合, 并对速度的可靠性和稳定性进行了模拟分析。提出了根据地震密集区域划分和建立分区地壳速度模型的概念。采用以 2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震为中心、半径为 1° 范围内、自 2009 年 1 月以来所有地震事件的震相数据, 拟合了适合于于田的地壳速度模型, 该模型在于田 $M_s7.3$ 地震的精定位和地震序列的震源深度确定中得到了应用。

关键词: 3400 走时表 分区地壳速度模型 于田 $M_s7.3$ 地震

[文章编号] 1001-4683(2014)02-0178-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

如何得到合适的地壳速度模型是地震学研究中的经典问题。准确地测定地震震中的经纬度和震源深度一直是地震学家关心和研究的热点(朱元清等, 1997b), 而地壳速度模型与地震的定位精度密切相关^①。同样, 在测定地震震源深度时, 地壳速度模型的作用更加突出(朱元清等, 1990)。在日常地震监测工作中, 合适的地壳速度模型可以帮助地震学家准确地判断测定的精度(朱元清等, 1997b; 张天中等, 2007)。全球性的分层速度模型有 IASPEI91、AK135 等, 但是这些模型不能够满足区域尺度的地震定位(李志伟等, 2006)。新疆占中国国土面积的 $1/6$, 天山山脉横贯东西, 南边紧靠帕米尔高原, 又夹于塔里木盆地和准噶尔盆地之间, 东西绵延约 2500km, 其具有的特殊地质构造活动背景被认为是印度板块与欧亚板块碰撞的结果(孙安辉等, 2011; Abdrakhmatov et al, 1996)。新疆复杂的地质构造

[收稿日期] 2014-03-09; [修订日期] 2014-03-26

[项目类别] 中国地震局监测预报司专项(1309010)、新疆地震科学基金(201207)、中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20130201)和地震科技星火计划项目(XH13007)共同资助

[作者简介] 陈向军, 男, 1978 年生, 工程师, 硕士, 现从事地震观测和软件开发工作。E-mail: 5768006@sina.com
朱元清: 通讯作者, E-mail: yqzhu@stn.sh.cn

① 赵仲和, 2010, 区域地震台网的地震定位, 见: 全国地震台网实用技术培训之统一编目培训班讲义

使得当对该地区发生的地震进行精定位时,选用适合震区的速度结构模型就显得十分重要(唐明帅等,2010)。

新疆全区大震频繁,地震丛集,随着地震台网监测能力的提高,每年记录到的发生在本区的地震数已经超过 2 万个,其中有多台记录的地震比例超过 50%。这对研究新疆地区的速度结构提供了极大的帮助。根据历史上新疆全区记录的地震震中分布图,可以清楚地划分出 3 个地震密集区域,即中天山地区、喀什地区和于田地区。

本文对全新疆范围的平均速度模型、3 个地震密集区域的区域速度模型以及“3400 走时表”进行了分析研究,特别是对 2014 年 2 月 12 日新疆于田 $M_s 7.3$ 地震及其附近区域进行了地壳速度结构的拟合,得到了符合地震实际记录结果的速度结构模型。此外,多年丰富的地震震相数据使我们能对得到的速度结构模型的可靠性和稳定性进行分析,这对认识新疆地区各分区地壳速度模型的差异十分重要。

1 “3400 走时表”的地壳速度模型解析

前苏联 И. Л. 涅尔赛索夫、Т. Г. 拉乌金 1964 年发表了“3400km 走时表”(以下简称“3400 走时表”),其测线从帕米尔至贝加尔,全长 3500km,穿过中亚、哈萨克斯坦、阿勒泰萨彦和贝加尔湖沿岸等几个地区。新疆与其中的中亚、俄罗斯西萨彦岭相邻,“3400 走时表”的西部走时表也部分适用于新疆地区,该成果在新颖性、严谨性等方面胜过在新疆应用的其他走时表。新疆有帕米尔地区的中深源地震带,也有阿勒泰运动学及动力学明显异常的地区,即使沿天山两麓的地震带,也有西克尔、呼图壁等范围较小的走时异常区(新疆地震局分析预报室,1982;张诚等,1977;曾融生等,1965)。

“3400 走时表”是一个大范围内的平均走时表,震中距愈大,符合愈好。在小区域范围内,其结果偏差稍大。“3400 走时表”在震中距 0 ~ 50km 时由于受震源深度及小构造的影响,时距曲线的双曲线弯曲程度不同而未给出数据。这段空白是根据新疆新源大爆破得到的地壳参数、速度值进行计算填补上的,其在 $\Delta(D) = 50\text{km}$ 处衔接较好^②。

由于历史上新疆地震观测台站较少,故从 1977 年“3400 走时表”在新疆推广使用以来,其运动学特征在新疆较大范围内基本符合。2000 年以来“3400 走时表”依然作为重要的走时表在继续使用。但其蕴含的地壳速度模型一直不清晰,相关研究较少。为了更好地研究如何以地震密集区域建立分区地壳速度模型,首先需要解析“3400 走时表”的速度模型。

1.1 “3400 走时表”分层速度的解析

“3400 走时表”直接给出了震中距和 3 种主要地震波的走时,故可以采用时距曲线拟合的方法直接计算 P_g 、 P_b 、 P_n 速度。其中 P_g 、 P_b 和 P_n 分别代表直达 P 波、康拉德面和莫霍面的滑行波。计算结果表明“3400 走时表”为 2 层均匀模型,第 1 层速度为 5.960km/s,第 2 层为 6.302km/s,莫霍面速度为 8.364km/s(图 1)。

1.2 “3400 走时表”固定震源深度的解析

根据“3400 走时表” P_g 到时数据,震中距为 0 时走时为 1.7s,依据 $v_{P_g} = 5.960\text{km/s}$,可计算得到“3400 走时表”暗含的震源深度为: $H = 1.7\text{s} \times 5.960\text{km/s} \approx 10\text{km}$ 。因此,“3400 走

② 新疆地震局办公室,1982,3400 公里内的地震波走时表手册

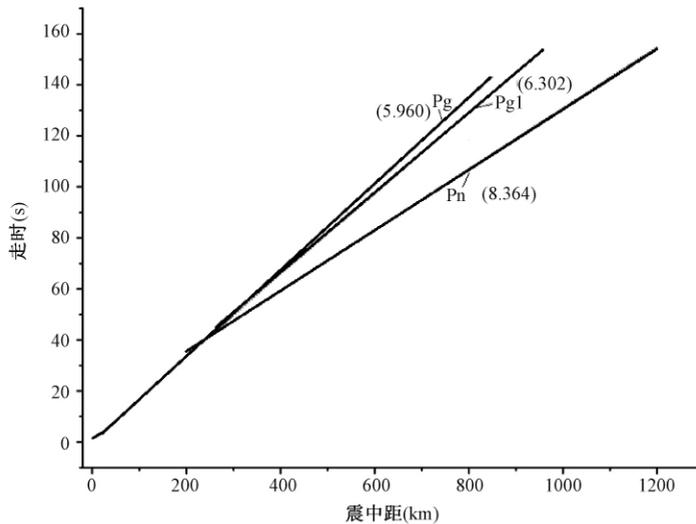


图1 新疆“3400走时表”时距曲线
Pgl代表Pb;括号内为速度值,单位km/s

时表”为固定震源深度为10km的走时表。

1.3 “3400走时表”2层速度模型层厚的解析

以震源深度为10km分析“3400走时表”, Pn、Pb首次分别出现在震中距200、250km时。根据地震学的时距理论关系,在已知 v_{Pg} 、 v_{Pb} 、 v_{Pn} 和对应的走时条件下,可以计算出对应“3400走时表”的2层模型平均厚度,其深度应该分别对应于康拉德面和莫霍面的平均深度。

(1) 康拉德面深度计算

已知: $H = 10\text{km}$, $\Delta(D) = 250\text{km}$ (Pb), $v_{Pg} = 5.960\text{km/s}$, $v_{Pb} = 6.302\text{km/s}$, 变换 $H + h$ (变量), 依据斯奈尔定律和走时方程, 分别计算对应不同震中距的Pb走时。根据经验可以假设第1层的厚度小于60km, 即 $h \in [1, 50]$ 。计算表明, 当 $h = 12\text{km}$ 、 $H + h = 22\text{km}$ 时, 不同震中距的理论Pb走时与“3400走时表”的所有对应震中距的走时数据一致, 从而得出第1层的厚度为22km, 即康拉德面深度为22km。

(2) 莫霍面深度计算

已知: $H = 10\text{km}$, $\Delta(D) = 200\text{km}$ (Pn), $v_{Pg} = 5.960\text{km/s}$, $v_{Pn} = 6.302\text{km/s}$, 第1层的厚度为22km, 变换 $H + h + L$ (变量), 依据斯奈尔定律和走时方程, 分别计算对应不同震中距的Pn走时。根据经验可以假设第2层的厚度小于100km, $L \in [1, 80]$, 当 $H + h + L = 57\text{km}$, 即 $L = 35$ 时, 不同震中距的理论Pn走时与“3400走时表”的所有对应震中距的走时数据一致, 从而求得第2层的厚度为35km, 即莫霍面深度为57km。该结果也与前人采用不同方法得到的结果基本一致(刘文学等, 2011)。

1.4 “3400走时表”速度模型的误差分析

综合上述结果可以得到“3400走时表”地壳速度模型如表1所示, 其中康拉德面深度为22km, 莫霍面深度为57km。对该结果的验证如下: 已知震源深度 H 固定为10km, $v_{Pg} =$

5.960km/s, $v_{\text{康拉德面}} = 6.302\text{km/s}$, $v_{\text{莫霍面}} = 8.364\text{km/s}$ 。根据“3400 走时表”中给出 v_{Pg} 、 v_{Pb} 、 v_{Pn} 的起始、终止距离,变换震中距 $\Delta(\text{Pg}) \in [0\text{km}, 850\text{km}]$, $\Delta(\text{Pn}) \in [250\text{km}, 1200\text{km}]$, 根据地震波射线路径计算 Pg 和 Pn 走时表。结果

表 1 “3400 走时表”速度模型

地壳分层	速度 (km/s)	厚度 (km)
第 1 层	5.960	22
第 2 层	6.302	35
莫霍面	8.364	

显示, Pg 理论走时与“3400 走时表”Pg 走时总体的标准差为 0.099s, 误差小于 0.2s 的占到走时表全部路径中 0 ~ 850km 的 93%; Pn 理论走时与“3400 走时表”Pn 走时的标准差为 0.055s, 误差小于 0.1s 的占到走时表中全部路径中 250 ~ 1200km 的 97%。说明该速度结构模型可以较好地表示“3400 走时表”。

2 新疆全区和分区地壳速度结构分析

自 2008 年“十五数字地震观测网络项目”实施以来,新疆地震记录的数据量一直处于全国前列,每年多达 2 万条以上,至 2014 年已经积累了丰富的测震震相数据资料。根据新疆地震震中分布图很容易区分出新疆的 3 个地震密集区域,即中天山地区、喀什地区和于田地区。这 3 个地区多台记录的地震事件数量占新疆全部地震事件的 76%, 其中中天山地区占 48%, 喀什地区占 27%, 于田地区占 1%, 这些区域均为 $M \geq 3.0$ 地震的多发区(表 2、图 2)。该现象与新疆测震台站的空间分布及新疆特殊的地质构造相符。

表 2 新疆 2009 年 1 月 ~ 2013 年 12 月有多台记录到的地震事件分区表

区域	多台记录地震事件 占全部地震事件的比例 (%)	多台记录的 $M \geq 3.0$ 地震 占全部 $M \geq 3.0$ 地震的比例 (%)	多台记录的 $M \geq 5.0$ 地震 占全部 $M \geq 5.0$ 地震的比例 (%)
中天山地区	48	30	7
喀什地区	27	37	11
于田地区	1	12	2

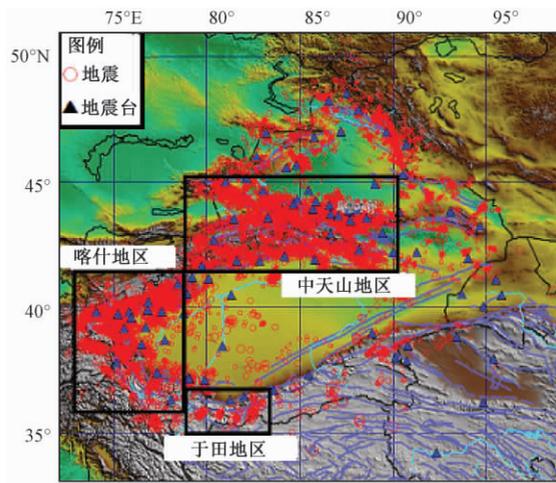


图 2 新疆地震震中分布
矩形框分别表示 3 个地震密集区

2.1 新疆全区地壳速度结构分析

地壳速度结构的数值模拟和分析方法已经非常成熟,本文的研究重点在于如何分析处理新疆数字地震台网记录到的几十万条震相数据,以得到能较好反映新疆地区特征的地壳速度。根据中国地震局地震编目标标准化的要求,自2008年7月份开始,全国将所有地震震相编目数据录入了中国地震台网中心的地震目录数据库。本文所使用的震相数据均来自该数据库。

拟合方法的基本思路为:根据新疆数字地震台网各个台站实际记录到的走时和震中距资料,采用线性拟合和滑动窗拟合两种方法进行。在拟合前先对数据进行必要的预处理,滑动窗是在全部资料包含的震中距范围内,以150km为固定窗长,并按50km的间隔进行滑动线性拟合(图3),最后根据每个窗所获得的结果进行加权平均求出最后的速度结果。在滑动窗拟合的过程中,如果单个窗内样本数少于平均样本数的80%,则不参加最后的加权平均计算。

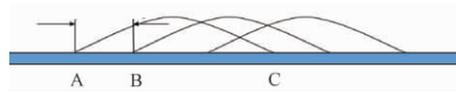


图3 滑动拟合的示意图

滑动步长 AB 为 50km;滑动距离 AC 为 150km

加权平均的具体做法是:首先,计算所有单个窗内获得结果的总平均值;然后,将每个窗内的结果与平均值之比的倒数作为权重系数,并将权重系数乘以相应窗对应的值后再求平均。其物理意义表示偏离平均值越远的值,其权重系数就越小。

本文线性拟合是求2个变量 X 、 Y 之间的线性函数关系

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中, (X_i, Y_i) 表示 (X, Y) 的第 i 个观测值; β_0, β_1 为参数, $\beta_0 + \beta_1 X_i$ 为反映统计关系直线的分量; ε_i 为反映在统计关系直线周围散布的随机分量, $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$, ε_i 服从正态分布。式(1)中 β_0, β_1 均为未知数,根据样本数据对 β_0 和 β_1 进行统计, β_0 和 β_1 的统计值为 b_0 和 b_1 , 建立一元线性方程

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X \quad (2)$$

利用最小二乘法,可求得 b_0 和 b_1 使每个样本观测点与拟合线性方程之间的偏差最小。

$$\text{令 } Q = \sum_{i=1}^n [Y_i - (b_0 + b_1 X_i)]^2 \quad (3)$$

$$\text{则 } \frac{\partial Q}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n [Y_i - (b_0 + b_1 X_i)] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n [Y_i - (b_0 + b_1 X_i)] X_i = 0 \quad (5)$$

求解式(4)、(5)可以得到

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) Y_i}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

残差为 $e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - b_0 - b_1 X_i$, 表明残差越小, 结果与观测值的拟合越好。本文的数据拟合分析均采用该方法, 以下不再赘述。

在中国地震台网中心的地震目录数据库里, 对 82 个地震台站记录到的 2009 年 1 月 1 日 ~ 2013 年 12 月 31 日地震事件的所有震相数据进行预处理, 得到可用的 Pg 震相数据 201326 条、Pn 震相数据 73589 条。Pg 震相数据直接拟合求得的速度为 6.22km/s, 均方差为 1.22s; Pn 震相数据直接拟合求得的速度为 8.47km/s, 均方差为 1.87s。滑动窗方法的拟合可以进一步研究新疆地壳结构分段速度的稳定性。Pg 震相数据滑动加权平均拟合的速度为 6.18km/s, Pn 震相数据为 8.37km/s。

为避免震源深度对速度拟合的干扰, 又选择震级大于 2.0 级, 震中距在 50 ~ 250km 范围的 Pg 震相数据进行速度拟合, 计算得到的速度 $v_{Pg} = 6.19\text{km/s}$; 选择震中距在 250 ~ 700km 范围的 Pn 震相数据进行速度拟合, 计算得到的速度 $v_{Pn} = 8.34\text{km/s}$ 。之所以选择 Pg 震相数据的震中距在 50 ~ 250km, 除了考虑避免震源深度对速度拟合的干扰外, 还考虑到当震中距小于 250km 时, Pg 震相数据的到时在新疆地区大多为初至, 容易正确辨认。选择 Pn 震相数据的震中距在 250 ~ 700km, 主要原因是当 Pn 震相在震中距大于 250km 以后为初至, 也容易正确辨认。取 700km 的距离主要是考虑除了中强地震, 绝大多数地震的记录其震中距小于 700km。如此得到的分析结果能较好地代表新疆全区的平均速度, 且便于对比和评价。

计算结果表明, 新疆全区 3 种方法拟合得到的 $v_{Pg} = 6.18 \sim 6.22\text{km/s}$, 平均 6.2 km/s。 $v_{Pn} = 8.34 \sim 8.47\text{km/s}$, 平均 8.4km/s。对比近 4 年由新疆天然地震数据拟合的速度结果与由“3400 走时表”速度模型拟合的结果, 发现 2 个比较突出的特征。一是新疆全区天然地震 Pg、Pn 震相数据拟合的速度结果的均方差分别为 1.22、1.87s, 表明全区的 v_{Pg} 、 v_{Pn} 均比较离散; 二是天然地震 v_{Pg} 比“3400 走时表”速度模型的结果系统地偏大 4%, 而 v_{Pn} 与“3400 走时表”速度模型所得结果基本一致, 仅偏大 0.4%。

近年来, 中国地震局要求日常编目工作的震相标注必须严格以波形特征读图标注震相。而由上述 v_{Pg} 、 v_{Pn} 的离散宽度和 v_{Pg} 的系统偏差结果可见, 新疆全区的波速存在较大的区域性差异, 所以研究各个地震密集区的地壳速度结构可以更好地满足地震监测的需要。

需要指出的是, “3400 走时表”速度结构模型给出的康拉德面和莫霍面的平均深度还是可以作为新疆地壳速度结构的重要依据的。

2.2 中天山地区地壳速度结构分析

对中天山地区 2009 年 1 月 ~ 2013 年 12 月的地震震相数据预处理后, 再分别对所有 Pg、Pn 震相数据进行总体拟合、滑动窗分段拟合以及滑动加权平均的计算。另外考虑到中天山地区的空间特点和丰富的震相数据量(达到总数据量的 48%) (图 2), 还对该区的 v_{Pg} 震相数据进行了细处理, 即将该区再分为 3 个 1° 左右、地震更为密集的小区域, Pg 震相震中距取值 50 ~ 250km。结果显示, v_{Pg} 值在该区域从西向东逐渐减小, 从 6.16 km/s 减小到 6.02km/s, 且标准差较小; Pn 震相震中距取值范围 250 ~ 700km, v_{Pn} 数值的稳定性较好, 具有区域代表性。震相取值范围即选择震中距的理由与前述新疆全区地壳速度结构分析中的依据一致。与“3400 走时表”速度结构模型相比, v_{Pg} 在该区域处于相对高值, 区域差异明显; v_{Pn} 相对较稳定, 差值较小。

通过对比分析各项拟合结果(表3),本文中 v_{Pg} 取平均值6.14km/s, v_{Pn} 取平均值8.33km/s。当然也可以取其他数值,但是差别不大,这一点可以进一步通过地震精定位的方式来确认。

2.3 喀什地区地壳速度结构分析

喀什地区处于天山山脉与昆仑山脉交汇区,断层发育,地质构造破碎。为了与中天山地区进行对比,选择了同时段数据,采用了3种相同的Pg、Pn速度计算方法。Pg震相震中距取值50~250km,Pn震相震中距取值250~700km。结果表明, v_{Pg} 、 v_{Pn} 值与中天山地区差异不大,但是从全部震相数据拟合的速度对比来看,喀什地区的 v_{Pg} 平均值为6.14km/s,比中天山地区($v_{Pg}=6.09$ km/s)略大,这进一步表明了新疆各区域的地壳速度差异和西部的 v_{Pg} 略大于东部; v_{Pn} 值在震中距大于500km后趋于稳定,略大于“3400走时表”模型中天山地区的 v_{Pn} 。从新疆全区范围来看, v_{Pn} 值的波动较小,数值较稳定。

经过对各项拟合结果的对比分析(表4), v_{Pg} 取均值6.13km/s, v_{Pn} 取均值8.39km/s。

同样也可以取其中间值,这也可以进一步通过地震精定位的方式来确认。

2.4 于田地区地壳速度结构的分析

2014年2月12日新疆于田发生了 $M_s7.3$ 地震,所以本文特别讨论了于田震区的地壳速度模型,以便用于主震的精定位和地震序列的深度测定。

由于于田地区的地震密集区域范围和前2个区域相比较小,震相数据明显较少,所以为确定于田震区地壳速度采用了如下4个参考模型:①前述的“新疆3400走时表”速度模型;②选用以2014年于田 $M_s7.3$ 主震为中心,半径为 1° 范围内,自2009年1月以来 $M \geq 2.0$ 所有地震事件的Pg、Pn震相数据,该范围包含了2008年该区域的另一个7.3级地震,通过时距曲线拟合方法,计算其速度值,考虑到该区域数据量较少而没有采用滑动窗方式;③采用2014年2月11日于田5.4级、2月12日于田7.3级、2月12日于田5.7级地震事件的Pg、Pn震相数据,通过时距曲线拟合方法,计算其速度值;④仅采用2014年2月12日于田7.3级主震事件的Pn震相数据,通过时距曲线拟合方法,计算其速度值。

由4个模型计算出的结果如下:模型① $v_{Pg}=5.96$ km/s, $v_{Pn}=8.364$ km/s;模型② $v_{Pg}=6.07$ km/s, $v_{Pn}=8.298$ km/s;模型③ $v_{Pg}=5.98$ km/s, $v_{Pn}=8.239$ km/s,其拟合效果见图4(a);模型④计算时考虑到于田 $M_s7.3$ 主震震相数据中Pg震相过少,故仅对Pn震相数据进行了拟合,计算得到 $v_{Pn}=8.21$ km/s,其拟合效果见图4(b)。

需要强调的是,用上述4种参考模型来确定新疆于田7.3级地震主震区地壳速度模型是基于从整体到局域来观察和分析该区域速度结构的思路。由上述4种方法得到的 $v_{Pg}=5.96 \sim 6.07$ km/s,均值为6.00km/s; $v_{Pn}=8.21 \sim 8.364$ km/s,均值为8.277km/s。由此可知,该地区的 v_{Pg} 均值相对比较稳定,然而于田7.3级主震震中附近的近台较少,绝大多数为远台,所以使用合适的 v_{Pn} 将对定位结果有较大的帮助。

表3 中天山地区3种方法求得的 v_{Pg} 、 v_{Pn} 速度

处理方式	v_{Pn} (km/s)	v_{Pg} (km/s)
全部震相数据拟合	8.33	6.09
滑动窗150km、滑动步长50km	8.34	6.18
按数据量加权后平均	8.32	6.15
对以上3种处理方式取平均值	8.33	6.14

表4 喀什地区3种方法求得的 v_{Pg} 、 v_{Pn} 速度

处理方式	v_{Pn} (km/s)	v_{Pg} (km/s)
全部震相数据拟合	8.39	6.14
滑动窗150km、滑动步长50km	8.38	6.16
按数据量加权后平均	8.40	6.10
对以上3种处理方式取平均值	8.39	6.13

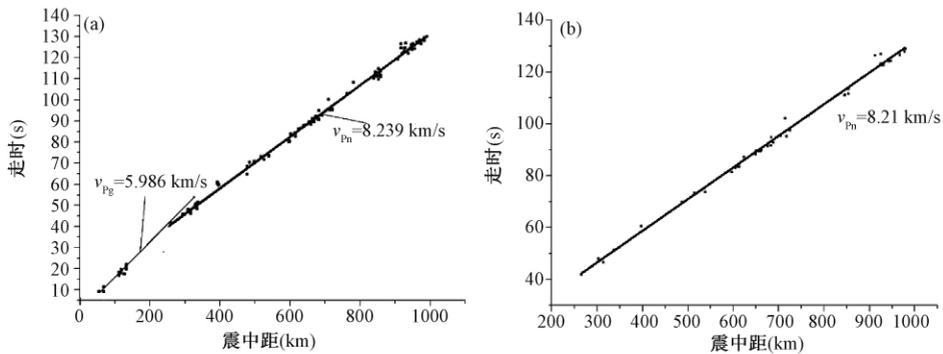


图4 2014年于田 $M_S 7.3$ 地震前震及 $M \geq 5.0$ 主、余震震相数据拟合计算 v_{Pg} 、 v_{Pn}
 (a) 2014年于田 $M_S 7.3$ 地震主震及前后两个 $M \geq 5.0$ 地震事件Pg、Pn震相数据拟合计算 v_{Pg} 、 v_{Pn} ; (b) 2014年于田 $M_S 7.3$ 地震主震震相数据拟合计算 v_{Pn}

为确定4种模型计算结果的合适初始速度,特作如下假定:①如果由多种方法求得的结果和现在一直使用的结果一致或差别很小则选用原结果,反之则用新的计算结果;②如果没有更好的方法、资料 and 结果证明原常用结果的不正确则选用原结果,反之则用新的计算结果;③通过试错法来计算震区主要地震的震中位置和震源深度,根据定位误差和震源深度的收敛程度判定模型分层速度和厚度。

试错时初始模型以新疆“3400走时表”速度模型为原型,结合4种分析结果分别调整该速度结构的不同参数,通过单纯形法试错震中位置,通过PTD方法(朱元清等,1990、1995、1997a)试错震源深度,然后综合统计分析试错的结果,深度收敛,定位误差小的速度结构模型选为最终结果。最后得到适合新疆于田 $M_S 7.3$ 地震序列的地壳速度模型:第1层速度为 5.96 km/s ,厚度 22 km ;第2层速度为 6.302 km/s ,厚度为 35 km ;莫霍面速度为 8.21 km/s ,深度为 57 km 。

用PTD方法来计算震源深度时,地壳深度结构模型中的各层层厚对深度的影响很大,不适合的地壳厚度将会使深度的结果发散(宋秀青等,2014)。单纯形法是一种直接搜索法,是非线性最优化理论中的全局搜索算法。单纯形法通过在模型空间中构造单纯形来逼近目标函数的极小点,它不要求偏导数或逆矩阵(Prugger et al, 1988; 朱元清等, 2002)。当地震台站包围震中时用单纯形法可以有效地确定震中位置,这时地壳速度结构模型的优劣会直接在走时误差中反映出来(王俊等,2014)。

3 讨论与结论

通过分析“3400走时表”的地壳速度模型和处理新疆27万余条地震震相数据,分别对新疆全区以及中天山地区、喀什地区、于田地区等3个地震密集区的地震震相资料进行了分析研究,得到以下结论:

(1) “3400走时表”作为一个大区域的平均走时表,其速度模型为固定震源深度为 10 km 的2层模型,即第1层速度为 5.96 km/s ,厚度 22 km ;第2层速度为 6.302 km/s ,厚度 35 km ;莫霍面速度为 8.364 km/s ,深度 57 km 。

(2) 新疆3个地震密集区的区域地壳速度存在明显差异。其各自的平均速度模型结果:中天山地区 $v_{Pg} = 6.14\text{km/s}$, $v_{Pn} = 8.33\text{km/s}$;喀什地区 $v_{Pg} = 6.13\text{km/s}$, $v_{Pn} = 8.39\text{km/s}$;于田地区 $v_{Pg} = 6.00\text{km/s}$, $v_{Pn} = 8.277\text{km/s}$ 。

(3) 适合2014年于田 $M_s 7.3$ 地震序列使用的地壳速度模型为2层, v_{Pg} (第1层速度) 为 5.96km/s , 第2层速度为 6.302km/s , 深度 22km ; v_{Pn} (莫霍面速度) 为 8.21km/s , 莫霍面深度为 57km 。

需要特别指出的是,本研究工作的目的是讨论如何在复杂的地质构造区,根据巨量的地震震相资料,获得能供地震台网日常分析地震事件使用的等效的平均速度结构。

综合上述分析结果,建议新疆数字地震台网日常分析地震事件时采用地震密集区速度结构模型,而对于大震序列的精定位则应采用地震序列区域的局域地壳速度模型以提高地震定位的精度。

致谢:感谢中国地震局监测预报司、中国地震台网中心、新疆维吾尔自治区地震局、上海市地震局、江苏省地震局、天津市地震局和地震震源深度研究推进小组全体成员对本文研究工作的大力支持和帮助。

参考文献

- 李志伟、胥颐、郝天眺,2006,利用DE算法反演地壳速度模型和地震定位,地球物理学进展,21(2),370~378。
- 刘文学、刘贵忠、周刚,2011,新疆和周边地区地壳厚度和 V_p/V_s 比值变化的接收函数约束,地球物理学报,54(8),2034~2041。
- 李秀青、缪发军、刘双庆等,2014,2014年新疆于田 $M_s 7.3$ 地震序列的震源深度测定,中国地震,30(2),198~207。
- 孙安辉、陈棋福、陈颢,2011,天山东北部地震的重新定位和一维地壳速度模型的改善,中国地震,27(3),235~246。
- 唐明帅、王海涛、段天山,2010,利用和田地震台阵数据对2008年于田7.3级地震序列重新定位,内陆地震,24(3),227~235。
- 王俊、李秀青、陈向军等,2014,新疆于田 $M_s 7.3$ 主震精定位研究,中国地震,30(2),188~197。
- 新疆地震局分析预报室,1982,“3400公里走时表”及其应用、新疆走时表工作的设想,地震地磁观测与研究,3(4),25~30。
- 曾融生、滕吉文、阚荣举等,1965,我国西北区地壳中的高速夹层,地球物理学报,14(2),94~106。
- 张诚、张伶、邓齐赞等,1977,甘肃及邻近地区的地壳结构,西北地震学报,1(2),22~26。
- 张天中、武巴特尔、黄媛等,2007,近台资料对近震相对定位算法的影响,地球物理学报,50(4),1123~1130。
- 朱元清、范长青、浦小峰,1995,南黄海地震序列时空参数的精细测定和分析,中国地震,11(1),54~61。
- 朱元清、石耀霖、李平,1990,一种确定地震深度的新方法,地震地磁观测与研究,11(2),4~12。
- 朱元清、夏从俊、李平,1997a,确定震源深度的PTD方法及其应用,地震地磁观测与研究,18(3),21~28。
- 朱元清、于海英,2002,上海地震台阵(网)近震定位的翻台方法,地震地磁观测与研究,23(2),97~106。
- 朱元清、赵仲和,1997b,提高地震定位精度新方法的研究,地震地磁观测与研究,18(5),59~67。
- Abdrakhmatov K Y, Aldazhanov S A, Hager B H, et al, 1996, Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present day crustal deformation rates, Nature, 384(6608), 450~453。
- Prugger A F, Gendzwill D J, 1988, Microearthquake location: A nonlinear approach that makes use of a simplex stepping procedure, Bull Seism Soc Am, 78(2), 799~815。

Study on crustal velocity model in Xinjiang and its subareas

*Chen Xiangjun*¹⁾ *Shangguan Wenming*¹⁾ *Song Xiuqing*²⁾ *Wang Jun*³⁾ *Liu Shuangqing*⁴⁾
*Miao Fajun*³⁾ *Zhu Yuanqing*²⁾

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

2) Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China

3) Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

4) Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China

Abstract Study of crustal velocity model is very important basic work. It has a long span of 16° from south to north, and 17° from east to west in Xinjiang. Three mountains and double basins, the special topography and complex geological structure have a great influence on the average crustal velocity model of the Xinjiang area. The paper analyzed the 3400 travel time table that has been used in Xinjiang, and obtained the most suitable velocity structure model of the travel time table after fitting. Then a velocity fitting was made by using all data of seismic phase from January 2009 to December 2013, and a simulation analysis of velocity reliability and stability followed. A concept that subarea crustal velocity mode of earthquake concentration area was proposed. Based on all the historical records of earthquake from January 2009 in the area within a radius of 1° with the Yutian $M_s7.3$ earthquake as the center, crustal velocity model suitable for Yutian area is fitted. The model has been applied in the fine positioning of Yutian $M_s7.3$ earthquake and the depth of earthquake sequence, and achieved very good results. The process can be used in similar studies.

Key words: The 3400 travel time table Crustal velocity model of subareas The Yutian $M_s7.3$ earthquake