

陈向军,上官文明,宋秀青.新疆地区一维地壳速度模型研究[J].地震工程学报,2018,40(2):294-304.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.294

CHEN Xiangjun, SHANGGUAN Wenming, SONG Xiuqing. Study on One Dimensional Crustal Velocity Model of Xinjiang Area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 294-304. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.294

新疆地区一维地壳速度模型研究^①

陈向军¹, 上官文明¹, 宋秀青²

(1. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 上海市地震局, 上海 200062)

摘要: 利用新疆区域地震台网观测到的2009年1月—2014年7月Pn、Sn、Pg和Sg震相数据, 综合使用线性拟合、折合走时、PTD定深方法和HypoSAT定位方法确定该地区Pg、Pb和Pn的平均传播速度(v_{Pg} , v_{Pb} , v_{Pn})、康拉德界面和莫霍面的深度(H_{conr} 和 H_{moho})范围, 以速度和深度步长分别为0.1 km/s、1 km精度迭代计算样本数据, 通过对比分析计算结果与全国地震统一编目和3400模型下样本数据的定位结果后, 确定RMS平均值最小的一维速度模型。在新模型中 v_{Pg} 、 v_{Pb} 和 v_{Pn} 分别为6.10 km/s、6.70 km/s和8.20 km/s, H_{conr} 和 H_{moho} 分别为26 km、54 km。通过检验对比, 认为本文获得的新模型优于新疆地区现有的3400模型。

关键词: 新疆地区; 地壳; 速度模型; 3400模型; PTD方法; 莫霍面

中图分类号: P315.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)02-0294-11

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.294

Study on One Dimensional Crustal Velocity Model of Xinjiang Area

CHEN Xiangjun¹, SHANGGUAN Wenming¹, SONG Xiuqing²

(1. Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. Earthquake Agency of Shanghai Municipality, Shanghai 200006, China)

Abstract: Using the phase data of Pn, Sn, Pg, and Sg recorded by the Xinjiang seismic network from January 2009 to July 2014, the average traveling velocity of the Pg, Pb, and Pn phase (v_{Pg} , v_{Pb} , and v_{Pn}), and the depth range of Conrad and Moho discontinuities (H_{conr} and H_{moho}) are determined in the Xinjiang area using linear fitting, reduced travel time, PTD earthquake location, and HypoSAT location methods. Computational iteration is implemented on the sample data with velocity and depth steps of 0.1 km/s and 1 km, respectively. After analyzing and comparing calculated results between sample data from national unified earthquake cataloging and the existing 3400 model for the Xinjiang area, a 1D velocity model with a minimum average RMS is established. The parameters of the new model include v_{Pg} , v_{Pb} , and v_{Pn} of 6.10 km/s, 6.70 km/s, and 8.20 km/s, respectively, and H_{conr} and H_{moho} of 26 km and 54 km, respectively. Through tests and comparisons, the new model is found to be superior to the existing 3400 model for the Xinjiang area.

① 收稿日期:2017-01-24

基金项目:中国地震局监测预报司专项(15080404);新疆地震科学基金(201406);中国地震局地震科技星火计划(XH17043Y)

作者简介:陈向军,男,工程师,研究方向:主要从事地壳速度模型研究与软件开发。E-mail:5768006@sina.com。

Key words: Xinjiang area; crust; velocity model; 3400 model; PTD method; Moho

0 引言

新疆地区地处亚欧大陆腹地,地域辽阔。东西向的天山山脉横贯新疆,是印度洋板块与亚欧板块碰撞的结果,它将准格尔盆地和塔里木盆地南北分开^[1-2]。地震带分布、地质构造特征和地震活动的区域差异都表明新疆地区的地质构造非常复杂。帕米尔地区存在中深源地震,受阿尔泰造山运动影响存在动力学明显异常的区域,并在西克尔、呼图壁等地区存在小范围的走时异常^[3-5]。受活断层的控制,新疆地区的地震主要集中在分布在大地震带,即阿尔泰地震带、北天山地震带、南天山地震带、西昆仑地震带和阿尔金山地震带(图 1)。地震带分布与新疆地区深大活动断裂的走向基本一致。新疆地区经济带下的产业分布、人口聚集与地震带同带分布,地震风险影响到区域经济发展和民生安全。

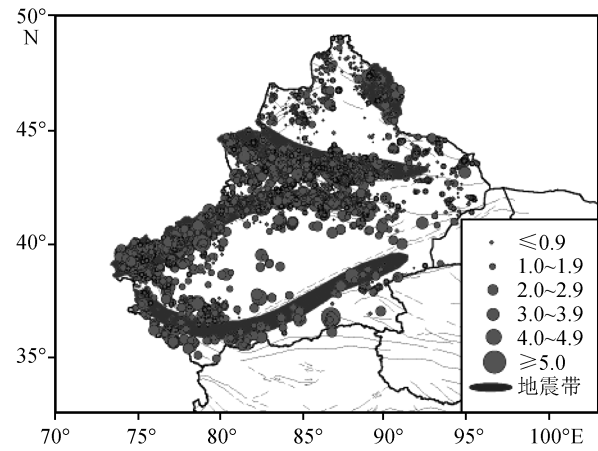


图 1 2014 年新疆地震震中分布

Fig.1 Epicenter distribution of Xinjiang earthquakes in 2014

从 2009 年开始,经过中国地震局“十五数字地震观测网络”项目建设,新疆地震台网进入全面数字化时代。截至 2015 年 8 月,新疆地震台网共有台站 85 个,其中国家台 19 个,区域台 66 个。其台站分布如图 2 所示。随着测震台网软硬件设施逐步完善,该地区现代化的数字地震台网初步形成,但其在地震定位模型和走时表研制方面却进展缓慢。自 1977 年以来,新疆地震台网一直使用前苏联 И.Л.涅尔赛索夫和 Т.Г.拉乌金 1964 年发表的“3 400 km 走时表”(以下简称“3400 走时表”)^[5]。“3400 走时表”将震源深度固定为 10 km,适用于震中距较大时的理论走时计算。震中距越大,走时符合愈好^[5]。

多年以来,使用“3400 走时表”的定位残差较大,震源深度局限在 5~15 km。“十五数字地震观测网络项目”实施以来,新疆地区的震源定位精度一直没有得到较大改善。实际上新疆地区已建成一定数量的数字地震观测台站,每年可记录地震 20 000 个以上,利用这些地震数据开展新疆地区地壳速度结构研究,对提高地震定位精度具有非常重要的意义。

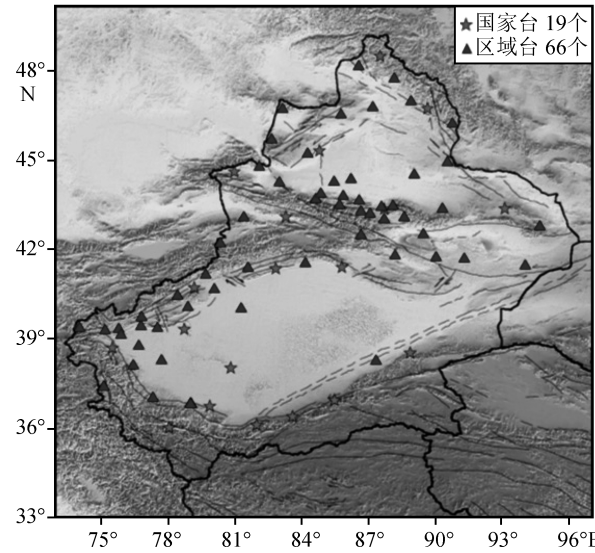


图 2 新疆地震台网台站分布

Fig.2 Distribution of monitoring stations in Xinjiang seismic network

1 研究方法

“3400 走时表”全长 3 500 km,其测线从帕米尔至贝加尔,中间穿过中亚、哈萨克斯坦、阿勒泰萨彦和贝加尔沿岸等地区。新疆与测线中的中亚和俄罗斯西萨彦岭相邻,因此该表在新疆西部部分地区的应用效果较好^[3-5]。“3400 走时表”在新疆地区推广使用以来,其运动学特征在较大范围内基本符合。2000 年以来,该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。陈向军等^[6]对“3400 走时表”地壳速度模型进行了解析(表 1)。国内很多学者也在新疆开展了壳幔速度结构的研究,如曾融生等^[7]、李秋生等^[8]、Zhao 等^[9]、王有学等^[10]及张先康等^[11]分别在新疆地区进行了 6 条测线的地壳速度结构研究,并得到了相应剖面下方的地壳速度结构和莫霍面深度,具体结果见图 3 (a)、(c)。根据前人的研究成果,将新疆地区的地壳速度模型分为 3 层:第 1 层速度为 5.9~6.1 km/s,

深度为 10~20 km;第 2 层速度约为 6.3 km/s,深度为 30~40 km/s;第 3 层速度为 6.4~7.0 km/s,莫霍面深度为 51 km;莫霍面速度为 8.1~8.3 km/s [图 3(b)]。

图 4 是本研究采用的数据分析、处理流程图。其中折合走时通过下述公式计算得到：

表 1 “3400 走时表”速度模型

Table 1 Crustal velocity model of the “3400 traveltime table”

地壳分层	(Pg/Pb/Pn)	(Sg/Sb/Sn)	深度 /km
	速度/(km·s ⁻¹)	速度/(km·s ⁻¹)	
第 1 层	5.960	3.573	22
第 2 层	6.302	3.582	57
莫霍面	8.364	4.830	-

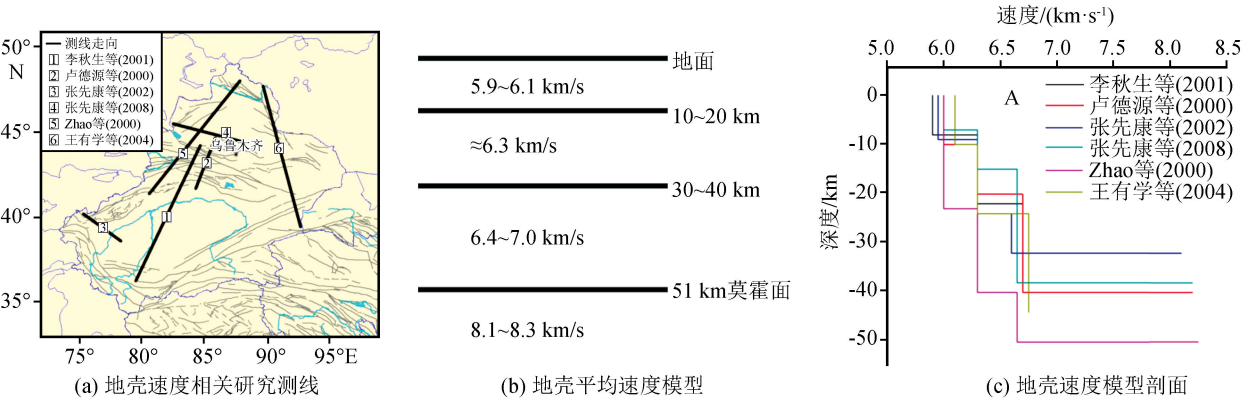


图 3 新疆地区地壳速度模型相关研究

Fig.3 Study on the crustal velocity model of Xinjiang area

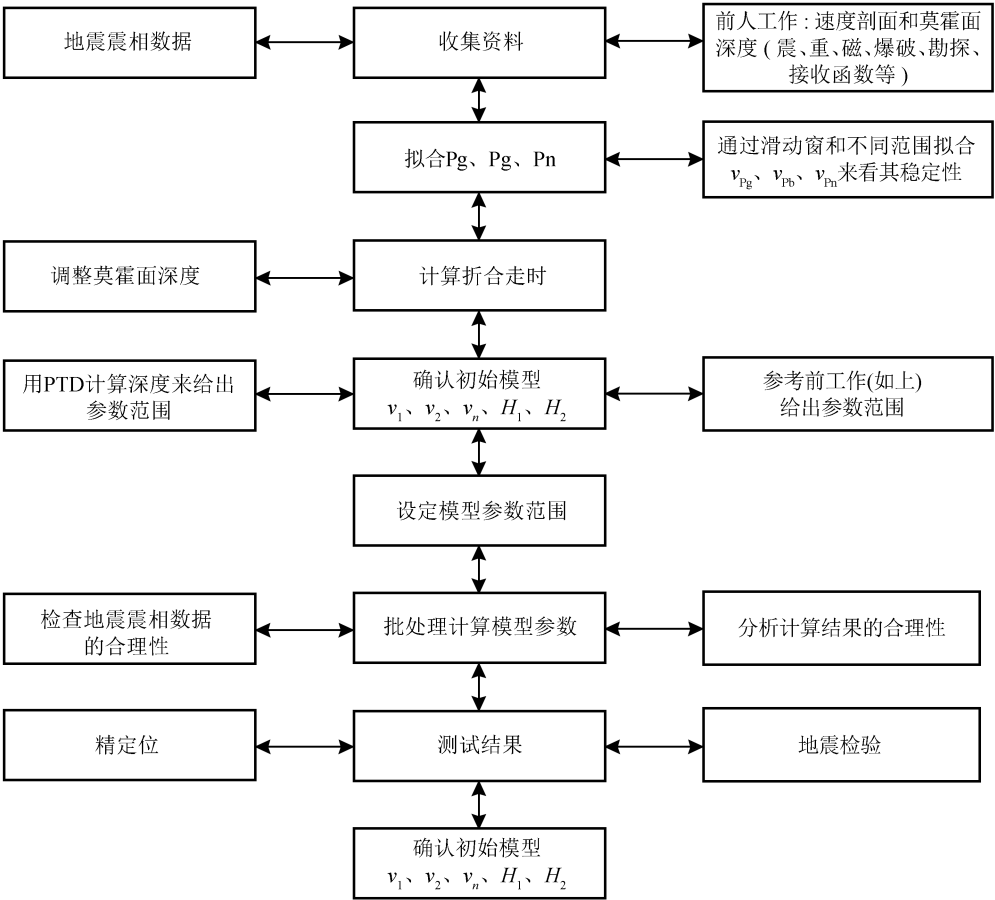


图 4 工作流程示意图

Fig.4 Workflow chart

对 Pn、Pb 而言,理论走时方程为 $t = \Delta/v + b$, 是一条倾斜直线。该公式可分为两项:一项与震中距相关,另一项与介质厚度和波速有关。于是理论走时 t = 横向走时 + 竖向走时。竖向走时就是折合走时 b , 它等效于地震波在垂直方向下行和上行的旅行时间。竖向(折合)走时 $b:b = t - \Delta/v$ 。故 Pn、Pb 折合走时是一条水平直线。利用同时计算震相的理论折合走时与实际折合走时,并通过二者的分布确定震相的实际速度以及速度模型的合理性。PTD 方法是一种针对区域台网内的地震,利用变换后的各台初至到时差数据进行震源深度测定的方法^[12-14]。HypoSAT 定位程序利用了走时数据、反方位角值和射线参数值^①,是当前中国国内省级测震台网日常速报和编目工作使用较多的一种绝对定位方法。

2 数据资料选取和预处理

2.1 地震资料及速度模型拟合

新疆地区“十五数字化”地震台网建成以来,从 2009 年 1 月 1 日—2014 年 7 月 31 日共记录新疆地区及其周边地震事件 83894 条。按数据记录台站

统计:单台 20 150 条,多台 63 744 条,5 台以上 42 211 条,10 台以上 10 681 条,20 台以上 1 547 条,30 台以上 572 条;按震级统计: $M_s 0 \sim 0.9$ 共 36 133 条, $M_s 1.0 \sim 1.9$ 共 20 307 条, $M_s 2.0 \sim 2.9$ 共 4 419 条, $M_s 3.0 \sim 3.9$ 共 916 条, $M_s 4.0 \sim 4.9$ 共 206 条, $M_s \geq 5.0$ 共 63 条;按震相统计:Pn 震相 90 486 条,Pg 震相 398 918 条,Pb 震相 0 条,Sn 震相 74 301 条,Sg 震相 401 772 条。

根据 Pg、Sg、Pn、Sn 震相数据,使用分段滑动拟合数据的方法分析 v_{Pg} 、 v_{Sg} 、 v_{Pn} 、 v_{Sn} 的变化特征以及数值范围。由于 Pg、Pn 的数量不同(Pg 和 Sg 震相数据量大,Pn 和 Sn 震相数据量相对较少),分别采用 50 km、100 km 滑动拟合。最终获得 v_{Pg} 值为 5.86 ~ 6.10 km/s,平均为 6.08 km/s; v_{Sg} 值为 3.57 ~ 3.64 km/s,平均为 3.63 km/s; v_{Pn} 值为 8.07 ~ 8.51 km/s,平均为 8.37 km/s; v_{Sn} 值为 4.77 ~ 5.30 km/s,平均为 4.89 km/s(表 2)。 v_{Pg} 、 v_{Sg} 在震中距 200 km 范围内受小区域速度异常和震源深度的影响比较明显,在震中距 200 ~ 900 km 数值相对比较稳定。 v_{Pn} 、 v_{Sn} 在震中距 350 km 范围内数值不稳定,在震中距 350 ~ 1 000 km 数值相对较为稳定。

表 2 新疆地区 v_{Pg} 、 v_{Pn} 数值变化特征表

Table 2 Change characteristics of the values of v_{Pn} 、 v_{Pg} in Xinjiang											
震中距/km	50~150	50~200	50~250	50~300	50~350	50~400	50~450	50~500	50~600	50~700	50~900
样本数/个	154 930	229 974	264 248	265 298	265 668	265 889	266 011	266 082	266 163	266 187	266 200
Pg 速度/(km·s ⁻¹)	5.96	6.04	6.09	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.10	6.09	6.10
样本数/个	148 727	216 444	248 236	249 750	250 380	250 601	250 692	250 748	250 774	250 813	250 820
Sg 速度/(km·s ⁻¹)	3.57	3.61	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64	3.64
震中距/km	140~250	140~300	140~350	140~400	140~450	140~500	140~600	140~700	140~800	140~900	140~1 000
样本数/个	18 797	47 260	61 761	69 488	74 490	78 320	83 684	87 377	89 556	91 007	89 556
Pn 速度/(km·s ⁻¹)	8.19	8.07	8.36	8.48	8.51	8.50	8.44	8.40	8.38	8.38	8.38
样本数/个	14 488	36 787	47 020	52 220	55 252	57 397	60 536	62 471	63 461	64 036	64 394
Sn 速度/(km·s ⁻¹)	5.30	4.77	4.86	4.92	4.92	4.90	4.87	4.84	4.82	4.81	4.81

2.2 地震波走时数据线性拟合

新疆地区长期稳定使用的台站共 87 个,本文选择 2009 年 1 月—2014 年 7 月 80% 以上地震台站记录的数据进行计算,其中从全国地震统一编目数据库筛选出 2 292 条 Pn、371 条 Pg、1 036 条 Sn、446 条 Sg 数据。通过时距曲线拟合的方法得到 $v_{Pg} = 6.070$ km/s, $v_{Pn} = 8.211$ km/s, $v_{Sn} = 4.688$ km/s, $v_{Sg} = 3.571$ km/s(图 5)。在建立新模型过程中,本文所用的 Pn、Pg 震相数据(80% 以上台站记录地震事件数据、2009—2014 年多台定位全部事件数据、10 个以上台站记录地震事件数据以及建立新模型中使用的批处理事件数据)较好地覆盖了新疆地区(图 6),尤其是

涵盖了中天山、喀什以及于田等多震区,其拟合速度结果对新疆地区的平均速度具有较好的代表性。

2.3 莫霍面深度

依据刘文学等^[15]和本文的结果分别使用接收函数来估计新疆地区台站下的地壳厚度。通过单一样本 T 检验分析,在 95% 的置信水平下,刘文学等^[15]的莫霍面深度置信区间为(50.6 km, 54.1 km),均值为 52.4 km。本文的莫霍面深度置信区间为(45.8 km, 52.4 km),均值为 49.1 km。在置信水平相同的

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

条件下,前者的置信区间间隔为3.5 km,而后者为6.6 km,两者莫霍面深度的平均值均为50 km。此外,结合曾融生等^[7]、滕吉文等^[16]及任纪舜等^[17]的研究成果,认为新疆地区莫霍面平均深度范围为50~52 km。

2.4 v_{Pb} 拟合和初始地壳速度模型

在新疆地区识别 Pb 震相存在很大难度,如果不借助理论分析方法,很难从地震波形中将其识别出^[18]。作者借助 3400 模型,使用 PTD 程序计算相应震源深度,结合理论走时得到不同台站的 Pb 震相到时,并依据波形特征进行确认。选取震源深度在13~17 km 的地震事件、震中距在100~220 km 范围内的台站,以 Pb 震相理论作为初至重新对地震事件分析标注 Pb 震相。对识别的 Pb 样本数据进行拟合,对比前人研究成果(新疆地区地壳三层速

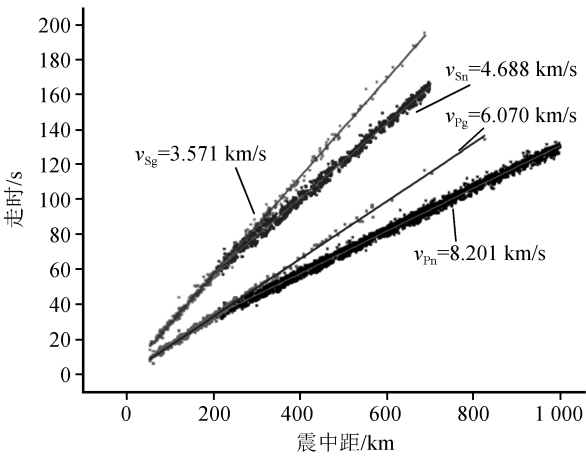


图 5 新疆 80% 以上台站记录事件拟合的 v_{Pg} 、 v_{Pn} 、 v_{Sg} 、 v_{Sn}
Fig.5 v_{Pg} 、 v_{Pn} 、 v_{Sg} 、 v_{Sn} fitted by records of 80% stations in Xinjiang

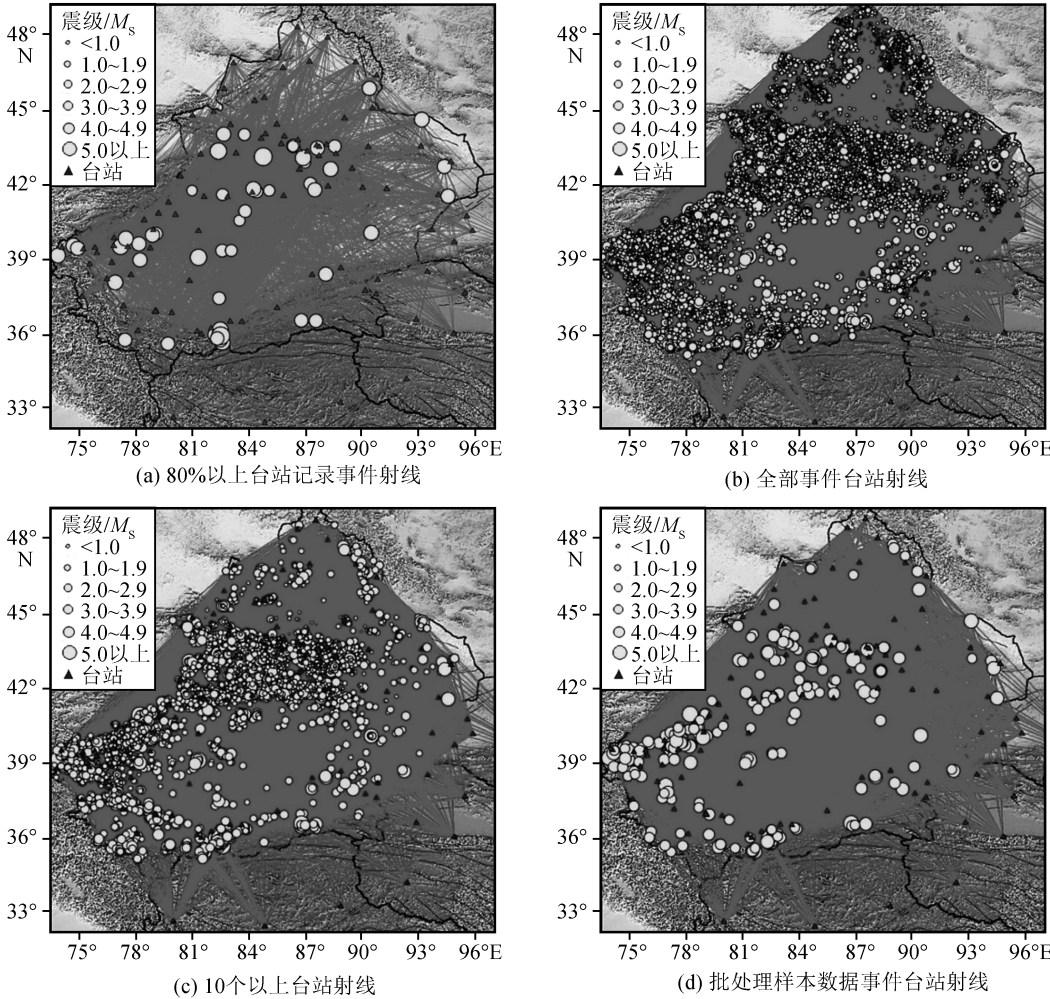


图 6 地震事件与定位台站射线图

Fig.6 Rays map of seismic events and location stations

度模型),剔除异常数据,最终得到30个样本数据。通过线性拟合确定的 v_{Pb} 为6.77 km/s(图7)。依据

折合走时理论,以3400模型为基础,绘出5、10、15、20 km 震源深度的理论折合走时曲线,分别计算

91 007 条 Pn 数据、266 187 条 Pg 数据、30 条 Pb 数据的折合走时。然后对比理论折合走时曲线与 Pn、Pg、Pb 震相数据的折合走时,通过依次调整 v_{Pb} 、 H_{conr} 、 H_{moho} 数值使 Pn、Pb、Pg 震相数据落于 5、10、15 及 20 km 震源深度的理论折合走时曲线中间位置(图 8)。最后得到 v_{Pb} 值介于[6.4 km/s,6.9 km/s], H_{conr} 值介于[15 km,21 km], H_{moho} 值介于[50 km,55 km]。

综合以上分析,参考前人有关新疆地区地壳分层、莫霍面深度以及各层速度的研究成果,在 3400 模型的基础上,结合本文拟合的 v_{Pn} 、 v_{Pg} 、 v_{Pb} ,以及借助折合走时理论得到的 v_{Pb} 、 H_{conr} 、 H_{moho} 数值范围,建立二层地壳速度结构的新模型,其初始速度模

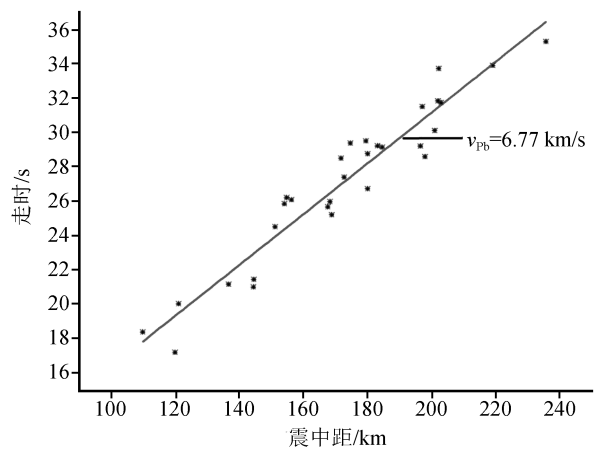


图 7 v_{Pb} 拟合
Fig.7 v_{Pb} linear fitting

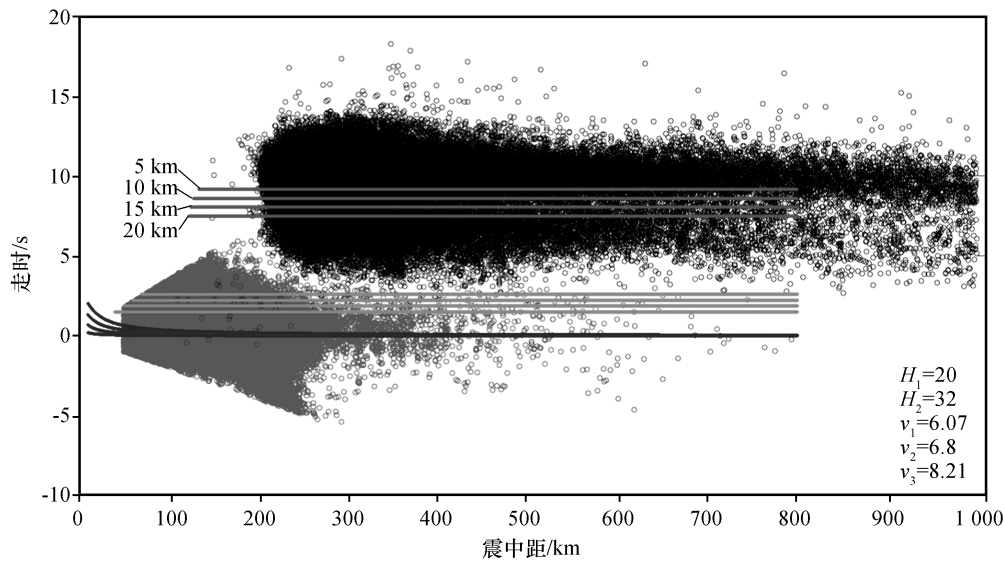


图 8 理论折合走时曲线及震相折合走时
Fig.8 Theoretical reduced traveltime curve and reduced traveltime of real phase

型数值范围如表 3 所列。

表 3 新疆地区初始地壳速度模型范围
Table 3 Numerical range of initial crustal velocity model in Xinjiang area

地壳分层	速度/(km · s ⁻¹)	深度/km
第 1 层	5.9~6.1	15~30
第 2 层	6.4~6.9	50~57
莫霍面	8.1~8.5	

3 区域速度模型

根据如下条件建立新疆地区的地壳速度模型:
(1)如果由多种方法求得的结果和现在使用的结果一致,或者差别很小,则继续使用原结果,反之则采用新的计算结果;(2)如果没有更好的方法、资料 and 结果证明原来使用的结果不正确,则继续使用原结

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的分层速度和厚度。

用地震批处理测定方法重新迭代地壳速度模型,依据 HypoSAT 程序的定位原理,在新疆地区地震目录中筛选得到 $M_s \geq 3.6$ 的地震事件 300 条(2009 年 1 月 1 日至 2015 年 3 月 10 日)。事件筛选标准如下:(1)删除震源深度大于 50 km 的地震事件;(2)删除地震定位时 Pg 震相或 Pn 震相个数为 0 的事件;(3)删除地震定位中 Pg 权重为 0、台站数 ≥ 5 个的事件;(4)删除地震事件定位中 Pn 权重为 0、台站数 ≥ 15 个的事件;(5)删除地震定位台站数 ≤ 10 个的事件;(6)删除地震定位时 Pg 震相 ≤ 4 个、

Pn 震相 ≤ 5 个的事件。最终确定样本事件数为 177 个,其震中分布较好地覆盖了新疆地区(图 9)。

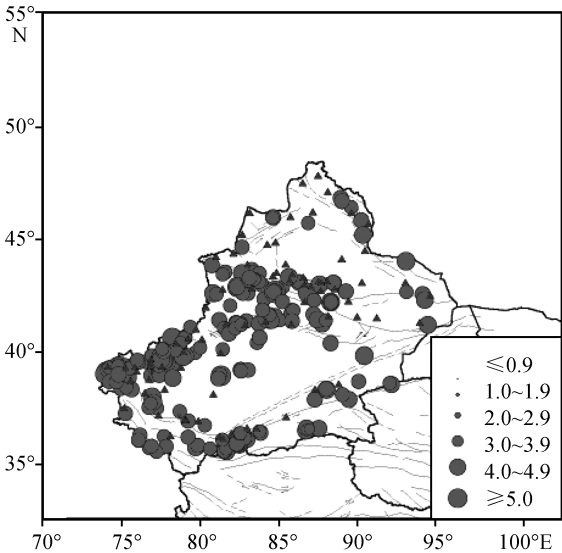


图 9 震中分布
Fig.9 Epicenter distribution

结合新疆地区地壳初始速度模型,采用 Hypo-SAT 批处理方法,根据新疆地区 v_{Pg} 、 v_{Pb} 、 v_{Pn} 、 H_{conr} 、 H_{moho} 数值变化范围,以速度和深度步长分别为 0.1 km/s、1 km 精度迭代计算 177 个地震样本数据。通过对比 RMS 均值,初步确定新模型中的 v_{Pg} 为 6.10 km/s, v_{Pb} 为 6.70 km/s, v_{Pn} 为 8.20 km/s, H_{conr} 为 26 km, H_{moho} 为 54 km。

依据前述使用 HypoSAT 批处理方法初步确定的新模型,通过其结果的震中偏差和 RMS 进行三项结果(编目结果、3400 模型结果、新结果)两两对比,以进行误差分析。其中对根据 HypoSAT 迭代产生的 10 个相近模型(表 4)进行一一计算对比。具体方法是通过对每一个模型使用 HypoSAT 批量处理重新定位 177 个样本事件,对比编目结果、3400 模型结果和新模型结果,最终确定 RMS 0.638 9 模型(表 4)为新模型。具体为:原始目录与 3400 模型结果对比,震中平均偏差 4.2 km, RMS 分别为 1.041、0.717;原始目录与新模型结果对比,震中平均偏差 3.8 km, RMS 分别为 1.041、0.645;3400 模型与新模型结果对比,震中平均偏差 3.3 km, RMS 分别为 0.717、0.645。其中 177 个事件中,震中偏差 > 5 km 为 39 个,占 22.0%;震中偏差 > 10 km 为 6 个,占 3.4%;震中偏差 ≤ 5 km 为 138 个,占 78.0%。原始目录与新模型震中偏差、RMS 值较为合理,进而确定所筛选的新模型结果较好。

表 4 177 个地震重新迭代地壳速度模型
(H_1 为康纳德面深度; H_2 为莫霍面深度)

Table 4 Crustal velocity models after iteration of 177 events
(H_1 is Conrad surface depth ; H_2 is Moho depth)

序号	v_{Pg}	v_{Pb}	v_{Pn}	H_1	H_2	RMS
1	6.10	6.70	8.20	26	54	0.638 9
2	6.00	6.70	8.20	30	54	0.647 1
3	6.05	6.70	8.20	22	54	0.652 4
4	6.00	6.70	8.20	29	54	0.653 5
5	6.00	6.70	8.20	24	54	0.654 4
6	6.00	6.70	8.20	26	54	0.655 3
7	6.00	6.70	8.20	27	54	0.655 4
8	6.00	6.70	8.20	28	54	0.655 6
9	6.00	6.70	8.20	23	54	0.657 6
10	6.00	6.70	8.20	25	54	0.659 1

4 区域速度模型检验

为了确定本文所建新模型的合理性,我们采用人工爆破、地震数据批处理、典型地震、新模型下 PTD 深度测定 4 种方法检验新模型的合理性和适用性。

(1) 人工爆破

选取 2014 年 8 月 6 日新疆乌鲁木齐南部山区矿石开采定点爆破。新疆地震台网完整地记录了相应波形,经过将新模型转化为走时表,使用与地震目录相同的定位方法(单纯型法)和震相数据,发现新模型的震中偏差为 5.0 km,3400 走时表震中偏差为 7.0 km,相比精度提高了 2 km。此外,新模型的 RMS 0.683 也比 3400 走时表 RMS 0.758 提高了 0.075。对比可见,新模型要优于 3400 模型。

(2) 地震数据批处理检验

选取 2009 年 1 月 1 日—2015 年 6 月 10 日、 $3.0 \leq M_L \leq 3.3$ 的地震事件 394 个(不包含建立新模型中使用的 177 个地震事件)。使用 HypoSAT 程序批处理地震事件,分别采用 3400 模型和新模型,通过编目结果、3400 模型结果和新模型结果三者之间两两对比,结果为:①3400 模型与编目结果对比:震中平均偏差为 7 km, RMS 分别为 0.660 8、0.915;②新模型与编目结果对比:震中平均偏差为 5 km, RMS 分别为 0.640 2、0.915;③3400 模型与新模型对比:震中平均偏差为 4 km, RMS 分别为 0.640 2、0.660 8。以上结果证明,新模型要优于 3400 模型。

(3) PTD 方法震源深度测定结果检验,同时结合深度震相^[19]

2009 年“十五数字化地震台网”建成以来,新疆地区地震震源深度计算一直是日常业务工作的最大

难题,震源深度主要分布在 5~15 km 范围内。本文选取新疆地区 2009 年 1 月 1 日—2014 年 7 月 31 日、 $M_s\geq 3.0$ 的地震事件,剔除震源深度 >50 km 的事件,共使用 252 个地震事件。在新模型下使用 PTD 方法,并保障集中度最大值和高斯布极值耦合最好的条件下重新测定深度。252 个地震事件的平

均震源深度从 8 km 提高到 17 km,震源深度空间分布也与前人研究结果大致相似[图 10(a)]。虽然每个地震事件定位时使用的 Pg 和 Pn 震相数量有差异,但震源深度均有不同程度的改善[图 10(b)]。此外,与 3400 走时表编目目录的震源深度相比,新模型 PTD 方法给出的震源深度分布更为合理(图 11)。

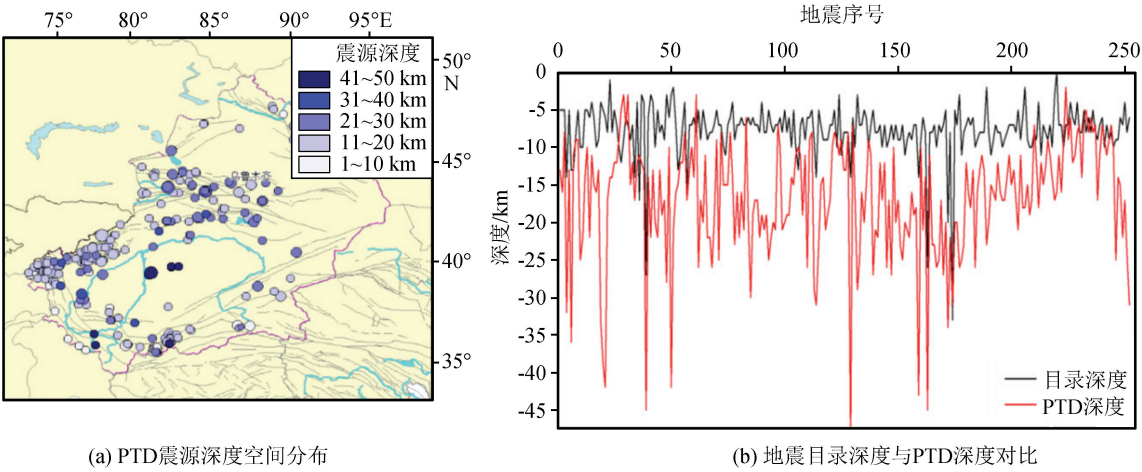


图 10 2009.01—2014.07 新疆 $M_s3.0$ 以上地震新模型 PTD 深度

Fig.10 Depth of $M_s>3.0$ earthquakes in Xinjiang from Jan.2009 to Jul.2014 using the new model and PTD method

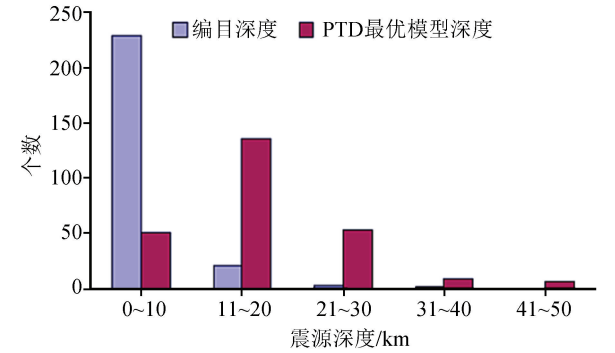


图 11 新疆编目与新模型 PTD 震源深度分段对比

Fig.11 Comparison between depths of Xinjiang catalogue and the new model by PTD method

(4) 典型地震事件检验

①相同定位方法(HypoSAT)不同模型定位结果对比(2012 年 6 月 30 日新疆新源、和静交界 $M_s6.6$ 地震、2013 年 8 月 30 日新疆乌鲁木齐 $M_s5.1$ 地震、2015 年 7 月 3 日新疆皮山 $M_s6.5$ 地震)。表 5 显示新模型的 RMS 均较小,优于 3400 模型。②相同模型不同定位方法(HypoSAT,PTD)对比。选择 2012 年 6 月 15 日新疆轮台 $M_s5.4$ 地震,基于新模型,HypoSAT 给出的震源深度为 22.3 km,PTD 方法为 25.9 km。选择 2015 年 7 月 3 日新疆皮山 $M_s6.5$ 地震,基于新模型,HypoSAT 给出的震源深

表 5 相同定位方法(HypoSAT)不同模型定位结果对比							
Table 5 Comparison between location results using different models and same location method (HypoSAT)							
	发震时间	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	M 震级	定位残差	说明
2012 年 6 月 30 日 $M_s6.6$ 级新疆新源、 和静交界地震	2012-06-30T05:07:34.14	43°25.51'	84°44.46'	7.0	6.6	1.200	编目结果
	2012-06-30T05:07:31.98	43°25.44'	84°45.00'	14.3	6.6	0.513	3400 模型
	2012-06-30T05:07:32.40	43°26.40'	84°45.90'	11.0	6.6	0.439	新模型
2013 年 8 月 30 日 $M_s5.1$ 级新疆乌鲁木 齐地震	2013-08-30T13:27:30.81	43°46.19'	87°36.36'	6.0	5.1	1.100	编目结果
	2013-08-30T13:27:29.95	43°47.22'	87°37.26'	19.1	5.1	0.590	3400 模型
	2013-08-30T13:27:29.95	43°46.68'	87°37.32'	19.2	5.1	0.505	新模型
2015 年 7 月 03 日 $M_s6.5$ 级新疆皮山地 震	2015-07-03T09:07:45.42	37°31.34'	78°10.08'	10.0	6.4	1.500	编目结果
	2015-07-03T09:07:45.42	37°31.38'	78°6.42'	23.0	6.4	0.882	3400 模型
	2015-07-03T09:07:45.92	37°29.58'	78°6.60'	25.2	6.4	0.672	新模型

度为 25.2 km,PTD 方法为 23.0 km。相同模型下,不同定位方法测定的震源深度相近,稳定性较好。

③使用中强地震检验新模型。2012 年 6 月 30 日新疆新源、和静交界发生 $M_s6.6$ 地震,房立华等^[20]使用双差定位方法对主震及其余震的震源位置参数进行精定位,其主震震中位置为 $43.436\ 0^{\circ}\text{N},84.782\ 0^{\circ}\text{E}$ 。我们利用新模型的走时表方法,通过单纯型法定位震源位置为 $43.426\ 0^{\circ}\text{N},84.765\ 8^{\circ}\text{E}$;主震的地震目录(3400 走时表单纯型法定位结果)震源位置为 $43.416\ 5^{\circ}\text{N},84.763\ 2^{\circ}\text{E}$ 。新模型结果和 3400 走时表结果与房立华的主震精定位结果对比,震中偏差分别为 1.9 km、2.8 km。新模型与 3400 走时表主震定位 RMS 分别为 0.905、1.045,可认为新模型要优于 3400 模型。2014 年 2 月 12 日新疆于田发生 $M_s7.3$ 地震,王俊等^[21]采用区域地震台网和地震台阵联合定位的方法精确测定了主震的震源位置,其

主震震中位置为 $36.197^{\circ}\text{N},82.467^{\circ}\text{E}$ 。我们利用新模型的走时表方法,通过单纯型法定位震源位置为 $36.173\ 3^{\circ}\text{N},82.537\ 7^{\circ}\text{E}$ 。主震的地震目录(3400 走时表单纯型法定位结果)震源位置为 $36.122\ 2^{\circ}\text{N},82.496\ 7^{\circ}\text{E}$ 。新模型结果和 3400 走时表结果与王俊的主震精定位结果对比,震中偏差分别为 2.7 km、8.3 km。新模型与 3400 走时表主震定位 RMS 分别为 0.644、0.727,可认为新模型要优于 3400 模型。

5 讨论与结论

通过选取 2009 年 1 月—2014 年 7 月(Pn、Pg、Pb)样本数据,分别对 3400 模型、新模型进行折合走时计算,分析表明新模型要优于 3400 模型(图 12)。3400 模型与新模型存在差异,新模型的康拉德面变深,莫霍面变浅, v_{Pg} 及 v_{Pb} 增大, v_{Pn} 减小(图 13)。

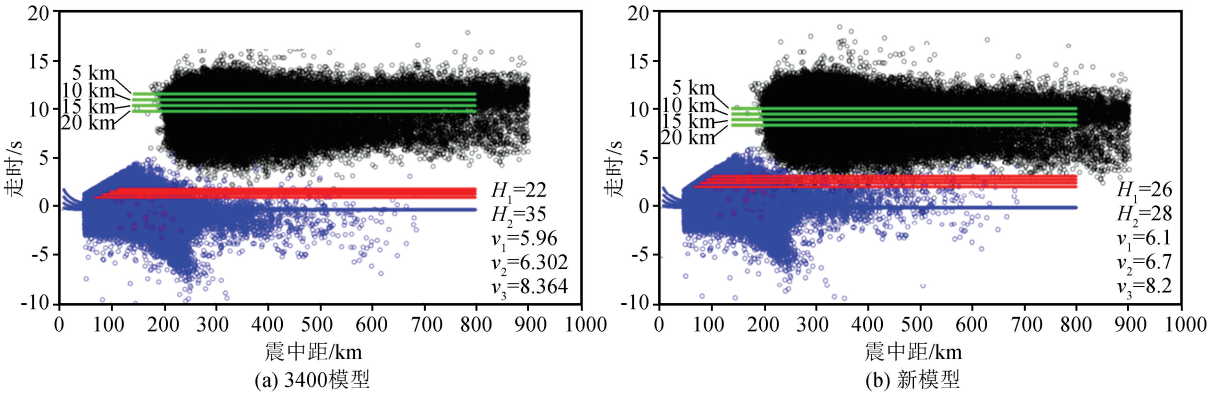


图 12 3400 模型与新模型折合走时对比

Fig.12 Comparison between reduced travel time of 3400 model and the new model

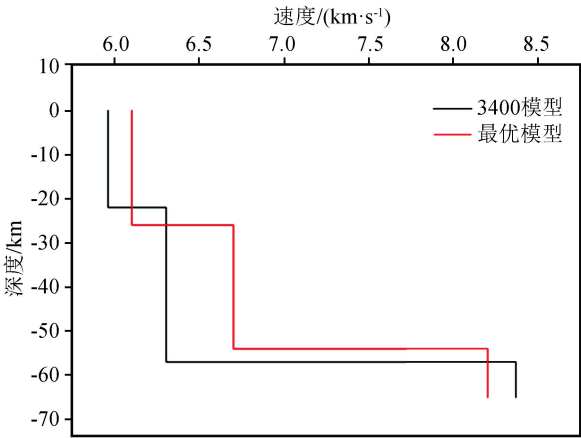


图 13 3400 模型与新模型对比

Fig.13 Comparison between 3400 model and new model

通过新疆地区一维地壳速度模型的研究工作,得到了以下认识:

(1) 从新疆地区 2009 年 1 月 01 日—2014 年 7 月 31 日地震目录库中提取新疆地区 80% 以上台站记录地震事件的 Pn、Sn、Pg 和 Sg 震相数据,采用线性拟合得到全区的平均速度参考值: $v_{Pg}=6.07\ \text{km/s}$ 、 $v_{Pn}=8.21\ \text{km/s}$ 、 $v_{Sn}=4.688\ \text{km/s}$ 、 $v_{Sg}=3.571\ \text{km/s}$ 。此外,提取该时段内观测到的全部事件的 Pn、Sn、Pg 和 Sg 震相数据,采用分段线性拟合,得到了全区速度值的变化范围: v_{Pg} 值为 $5.86\sim6.10\ \text{km/s}$,平均为 $6.08\ \text{km/s}$; v_{Sg} 值为 $3.57\sim3.64\ \text{km/s}$,平均为 $3.63\ \text{km/s}$; v_{Pn} 值为 $8.07\sim8.51\ \text{km/s}$,平均为 $8.37\ \text{km/s}$; v_{Sn} 值为 $4.77\sim5.30\ \text{km/s}$,平均为 $4.89\ \text{km/s}$ 。结合前人在新疆地区地壳速度模型的研究成果,得到地壳三层速度结构范围:第一层速度 $5.9\sim6.1\ \text{km/s}$,深度 $10\sim20\ \text{km}$;第二层速度 $6.3\ \text{km/s}$,深度 $30\sim40\ \text{km}$;第三层速度 $6.4\sim7.0$

km/s,深度 51 km;莫霍面速度 8.1~8.3 km/s。

(2) 依据前人有关新疆地区莫霍面深度的研究成果,认为新疆地区中天山和东天山莫霍面深度在 50~56 km,准噶尔盆地的莫霍面深度为 45~54 km,塔里木盆地中部莫霍面深度只有 40~42 km,往盆地边缘加深到 50~56 km,平均深度约为 50 km。

(3) 基于 3400 模型,结合地震事件震源深度及 Pb 震相在部分台站作为初至的波形特点,分析并标注了 Pb 震相的到时,利用线性拟合得到 v_{Pb} 为 6.77 km/s。利用大量的 Pn、Pg、Pb 震相数据,使用折合走时方法,变换 H_{conr} 、 H_{moho} 、 v_{Pb} ,最终得到新疆地区一维平均等效速度模型的数值范围:第一层速度 5.9~6.1 km/s,深度 15~30 km;第二层速度 6.4~6.9 km/s,深度 50~57 km;莫霍面速度 8.1~8.5 km/s。

(4) 使用 HypoSAT 批处理方法,根据新疆地区 v_{Pg} 、 v_{Pb} 、 v_{Pn} 、 H_{conr} 、 H_{moho} 数值的变化范围以速度和深度步长分别为 0.1 km/s、1 km 精度迭代计算样本数据,对比三项结果(编目结果、3400 模型结果、新模型结果)后,筛选出 RMS 值相近的 10 组模型,结合 PTD 方法测定的震源深度结果,确定了新模型的速度和节面参数: v_{Pg} 为 6.10 km/s, v_{Pb} 为 6.70 km/s, v_{Pn} 为 8.20 km/s, H_{conr} 为 26 km, H_{moho} 为 54 km。

(5) 通过新疆地区的人工爆破、地震数据批处理、典型地震、新模型下 PTD 深度测定,分析表明新模型要优于 3400 模型。

(6) 本文获得的新疆地区一维地壳平均速度等效模型总体优于 3400 模型,虽然还存在个别地震定位精度不高的问题,但这并不影响其在新疆地区的应用。为了更好地解决新疆地震定位的精度问题,我们需要进一步开展分区速度模型的研究工作。

致谢:广东省地震局吕作勇工程师、江苏省地震局缪发军高级工程师和上海市地震局孙东军工程师提供了 Hyposat 扰动模型批量定位程序、PTD 方法计算深度软件和折合走时分析程序,同时中国地震台网中心孙丽和江苏省地震局王俊菲提供了全国莫霍面深度数据及新疆维吾尔自治区地震局监测中心主任魏斌对本项工作大力支持,作者在此一并表示感谢!

参考文献(References)

[1] ABDRAKHMATOV K Y, 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[J]. Nature, 1996, 384(6608): 450-453.
- [2] 孙安辉, 陈棋福, 陈颢, 等. 天山东北部地震的重新定位和一维地壳速度模型的改善[J]. 中国地震, 2011, 27(3): 235-246.
- SUN Anhui, CHEN Qifu, CHEN Yong, et al. Relocation of Earthquakes in the Northeastern Tianshan Mountains Area and Improvement of Local 1-Dimensional Crustal Velocity Model[J]. Earthquake Research in China, 2011, 27(3): 235-246.
- [3] 曾融生, 滕吉文, 阚荣举, 等. 我国西北区地壳中的高速夹层[J]. 地球物理学报, 1965, 14(2): 94-106.
- ZENG Rongsheng, TENG Jiwen, KAN Rongju, et al. High-speed Interlayers of Crust in the Northwest in China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1965, 14(2): 94-106.
- [4] 张诚, 张伶, 邓齐赞, 等. 甘肃及邻近地区的地壳厚度[J]. 西北地震学报, 1977, 1(2): 22-26.
- ZHANG Cheng, ZHANG Ling, DENG Qizan, et al. The Crustal Structure of Gansu and Its Adjacent Area[J]. Northwestern Seismological Journal, 1977, 1(2): 22-26.
- [5] 新疆地震局分析预报室测震组. “3 400 公里走时表”及其应用、新疆走时表工作的设想[J]. 地震地磁观测与研究, 1982, 3(4): 25-30.
- Analysis and Prediction Room of Xinjiang Seismological Bureau. 3400 km Travel Time Table and Its Application, Working Assumption of Xinjiang Travel Time Table[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1982, 3(4): 25-30.
- [6] 陈向军, 上官文明, 宋秀青, 等. 新疆全区和分区地壳速度模型的分析[J]. 中国地震, 2014, 30(2): 178-187.
- CHEN Xiangjun, SHANGGUAN Wenming, SONG Xiuqing, et al. Study on Crustal Velocity Model in Xinjiang and Its Subareas[J]. Earthquake Research in China, 2014, 30(2): 178-187.
- [7] 曾融生, 孙为国, 毛桐恩, 等. 中国大陆莫霍界面深度图[J]. 地震学报, 1995, 17(3): 322-327.
- ZENG Rongsheng, SUN Weiguo, MAO Tong'en, et al. Chinese Moho Depth Map[J]. Acta Seismologica Sinica, 1995, 17(3): 322-327.
- [8] 李秋生, 卢德源, 高锐, 等. 新疆地学断面(泉水沟—独山子)深地震测深成果综合研究[J]. 地球学报, 2001, 22(6): 534-540.
- LI Qiusheng, LU Deyuan, GAO Rui, et al. An Integrated Study of Deep Seismic Sounding Profiling Along Xinjiang Global Geosciences Transect (Quanshuigou—Dushanzi)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2001, 22(6): 534-540.
- [9] ZHAO J M, LIU G D, LU Z X, et al. Lithospheric Structure and Dynamic Processes of the Tianshan Orogenic Belt and the Junggar Basin[J]. Tectonophysics, 2003, 376(3): 199-239.
- [10] 王有学, 韩果花, 姜枚, 等. 阿尔泰-阿尔金地学断面地壳结构[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 240-249.
- WANG Youxue, HAN Guohua, JIANG Mei, et al. Crustal Structure Along the Geosciences Transect from Altay to Altun Tagh[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2):

- 240-249.
- [11] 张先康,曲国胜,赵金仁.准噶尔盆地深部构造人工地震探测[J].新疆石油地质,2008,29(6):675-679.
ZHANG Xiankang, QU Guosheng, ZHAO Jinren. Seismic Detection of Deep Structures in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(6): 675-679.
- [12] 朱元清,石耀霖,李平.一种确定地震深度的新方法[J].地震地磁观测与研究,1990,11(2):4-12.
ZHU Yuanqing, SHI Yaolin, LI Ping. A New Method to Determine the Depth of Earthquake[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1990, 11(2): 4-12.
- [13] 朱元清,夏从俊,李平.确定震源深度的 PTD 方法及其应用[J].地震地磁观测与研究,1997,18(3):21-28.
ZHU Yuanqing, XIA Congjun, LI Ping. A PTD Method a New Method for Determinating Focal Depth and Its Application[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1997, 18(3): 21-28.
- [14] 朱元清,赵仲和.提高地震定位精度新方法的研究[J].地震地磁观测与研究,1997,18(5):59-67.
ZHU Yuanqing, ZHAO Zhonghe. Research on the New Method to Raise Earthquake Location Accuracy[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1997, 18(5): 59-67.
- [15] 刘文学,刘贵忠,周刚,等.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[J].地球物理学报,2011,54(8):2034-2041.
LIU Wenxue, LIU Guizhong, ZHOU Gang, et al. Crustal Thickness and v_P/v_S Ratio Variations of Xinjiang and Surrounding Regions Constrained by Receiver Function Stacking[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(8): 2034-2041.
- [16] 滕吉文,曾融生,闫雅芬,等.东亚大陆及周边海域 Moho 界面深度分布和基本构造格局[J].中国科学(D 辑),2002,32(2):89-100.
TENG Jiwen, ZENG Rongsheng, YAN Yafen, et al. Depth Distribution of Moho and Tectonic Framework in Eastern Asian Continent and Its Adjacent Ocean Areas[J]. Science in China (Series D), 2002, 46(5): 428-446.
- [17] 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等.新一代中国大地构造图[J].中国区域地质,1997,16(3):2-7.
REN Jishun, WANG Zuoxun, CHEN Bingwei, et al. A New Generation of China Earth Tectonic Map[J]. Regional Geology of China, 1997, 16(3): 2-7.
- [18] 尹欣欣,杨立明,陈继锋,等.甘肃地区一维速度模型计算研究[J].地震工程学报,2017,39(1):154-159.
YIN Xinxin, YANG Liming, CHEN Jifeng, et al. Study on the One Dimensional Velocity Model in Gansu Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 154-159.
- [19] 魏娅玲,蔡一川,苏金蓉.采用 sPn 震相确定甘肃岷县 $M>4.0$ 地震震源深度[J].地震工程学报,2013,35(3):438-442
WEI Yaling, CAI Yichuan, SU Jinrong. Calculation of the Focal Depth of $M>4.0$ Earthquakes in Minxian, Gansu, Based on sPn Seismic Phases[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 438-442.
- [20] 房立华,吴建平,王长在,等.2012 年新疆新源 $M_S6.6$ 地震余震序列精定位研究[J].中国科学(地球科学),2013,43(12):1929-1933.
FANG Lihua, WU Jianping, WANG Changzai, et al. Relocation of the 2012 $M_S6.6$ Xinjiang Xinyuan Earthquake Sequence[J]. Science China (Earth Sciences), 2013, 43(12): 1929-1933.
- [21] 王俊,宋秀青,陈向军,等.新疆于田 $M7.3$ 级主震精定位研究[J].中国地震,2014,30(2):188-197.
WANG Jun, SONG Xiuqing, CHEN Xiangjun, et al. Study on Precision Positioning the Yutian, Xinjiang $M_S7.3$ Earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2014, 30(2): 188-197.