

王莉婵, 朱元清, 李雪英, 等. 河北地区地壳一维速度模型研究[J]. 华北地震科学, 2016, 34(4): 1-10.

河北地区地壳一维速度模型的新近研究

王莉婵¹, 朱元清², 李雪英¹, 王 铎³, 蔡玲玲¹, 李冬圣¹, 杨 锐¹

(1. 河北省地震局, 石家庄 050021; 2. 上海市地震局, 上海 200062; 3. 唐山市地震局, 河北 唐山 063000)

摘要:为建立更适合河北地区地震速报及编目的地壳一维速度模型, 收集河北数字地震台网 2009 年 1 月至 2014 年 10 月定位台站数 $N \geq 10$, 震级 $M \geq 1.0$ 的 1 113 条地震以及精选的 48 条地震; 利用滑动窗拟合、折合走时等方法及结合前人研究成果确定一维速度模型中各参数的范围, 并利用 Hyposat 批处理程序, 对精选的 48 条地震进行了 58 902 次组合计算, 对残差最小的 10 组数据利用与编目结果震中位置偏差大小为原则进行筛选, 由此建立了适应河北地区地震速报及编目的地壳一维速度新模型; 然后利用批处理残差大小比较、PTD 深度定位、爆破检验、典型地震检验等方法对其验证。结果表明, 相较于华南模型, 新模型更适用于河北地区。

关键词:速度模型; 滑动窗拟合; 折合走时; Hyposat 批处理

中图分类号: P315.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-1375(2016)04-0001-10

doi: 10.3969/j.issn.1003-1375.2016.04.001

0 引言

河北地区位于华北地震带北部, 地质构造复杂, 东侧为太行山脉, 北部为阴山—燕山隆起, 中部是冀中平原新生代沉降带, 阴山—燕山隆起与冀中平原新生代沉降带之间是中、新生带燕山沉降带。受地质构造影响, 河北地区断裂带十分发育, 北部有张家口—渤海地震活动带, 西部为山西地震带^[1], 中南部地区地震带主要分为 NNE-NE 和 NW 向 2 组, 其中又以 NNE-NE 向为主^[2], 特定的地质构造决定了河北省为地震多发地区。根据近年河北省地震台网的数字观测资料可知, 河北省大震多发, 中小地震更是相当频繁, 密集度高。因此, 加强河北地区地震活动观测研究具有十分重要意义。

地震活动观测依赖于测震台网精确的基础数据, 而精准的地震定位不仅与定位台站的数量、分布以及定位软件、方法等有关, 而且也受到地壳速度模型的制约。目前, 河北数字地震台网处理地震时在用速度模型有 2 个——华南速度模型及华北速度模型, 前者用于日常编目工作, 后者用于地震速报工作。其中华南模型是范玉兰等^[3]利用华南地区大量的天然地震和人工爆破资料研究得到的双层平均

地壳模型, 与河北地质情况不符; 后者是中国地震局地球物理研究所利用唐山和邢台老震区的地震资料计算所得, 不符合河北整体区域地质情况。2 种模型的不统一性给河北数字地震台网进行地震精准定位带来了困难。虽然前人针对河北地区地下介质速度结构也开展过很多工作, 但是由于河北地质情况复杂, 北部山区与南部平原地区地壳厚度差异很大。大部分学者是针对不同的区域开展不同的研究: 如于利民等^[4]、张学民等^[5]均基于深源远震体波资料并利用 Haskell 矩阵传递方法计算理论地震图, 与实际测资料拟合对比, 前者得到河北北部部分台站下方的速度结构, 后者得到陡河、滦县等台站下方的速度模型; 张成科等^[6]利用地震测深剖面资料, 进行射线追踪走时拟合计算, 得到了文安、蔚县等地的一维速度模型; 李强等^[7]、于湘伟等^[8]、王志铄等^[9]通过层析成像反演方法, 利用 P 波到时数据, 得到了华北区域地壳三维速度结构; 王帅军等^[10]利用张家口—渤海构造带的测震剖面资料, 得到盐山—大兴—延庆、北京—怀来—丰镇等不同测震剖面的地下速度结构; 田晓峰等人^[11]利用广义反演理论, 对沧县及唐山地区的人工地震测深勘探资料进行反演, 得到该区域的速度结构和莫霍面深度; 田宝峰等

收稿日期: 2016-08-12

基金项目: 2014 年河北省地震科技星火计划项目(DZ20150424088)

作者简介: 王莉婵(1988—), 女, 河北石家庄人, 助理工程师, 主要从事地震监测工作。E-mail: wlc84872583@163.com

人^[12]利用接收函数方位变化研究方法,进行地壳各向异性反演计算出 4 个流动台站的地下结构;赵博等人^[1]利用双差定位方法分析华北地区的地震活动过程中,针对华北东、西部分别给出了 2 个不同的速度模型。通过分析可以看出,以上速度模型结果或是区域性的、或是三维速度结构,难以直接应用于河北台网的实际工作中。所以为提高河北台网地震定位精度,建立一个符合河北实际地质情况,且可直接应用于河北地震台网编目和速报工作的速度模型十分重要,具有很强的现实意义。

1 研究思路及方法

本文通过对大量地震震相资料进行处理分析,建立适用于河北地区地震速报及编目的新地壳速度模型。首先,收集河北地震台网“十五”数字化工程项目以来至本文研究期间的地震目录及震相资料,利用不同的处理方法判定速度模型中各参数的变化范围;其次,基于上述研究成果设定模型参数范围及各个参数的变化步长,利用 Hyposat 批处理程序,对选取的地震数据进行批处理,根据结果残差大小及震中偏差大小的合理性分析,建立新的速度模型;最后,利用批量定位残差比较、PTD 深度定位、人工爆破数据、典型地震事件对新建立模型进行验证,分析新模型的合理性。

1) 线性拟合方法

由地震波走时方程可知, P_g 、 P_b 、 P_n 3 种震相走时分别为双曲线和直线,其渐近线斜率或直线斜率即为各震相的拟合速度。所以通过提取各震相的震中距及走时数据,利用近似走时方程计算得到各种震相的拟合速度:

$$T = \Delta/V + b. \quad (1)$$

式中: T 为震相走时, V 为拟合速度, Δ 为震中距, b 为常数。

2) 折合走时方法

P_b 、 P_n 的理论走时方程为

$$t_{P_b} = \frac{\Delta}{V_{P_b}} + (2H_{con} - h) \cdot \frac{\cos i_0}{V_{P_g}}, \quad (2)$$

$$t_{P_n} = \frac{\Delta}{V_{P_n}} + (2H_{con} - h) \sqrt{\frac{1}{V_{P_g}^2} - \frac{1}{V_{P_n}^2}} + 2H_{moho}$$

$$\sqrt{\frac{1}{V_{P_b}^2} - \frac{1}{V_{P_n}^2}}. \quad (3)$$

结合 P_n 、 P_b 走时路径(图 1),对公式(1)、(2)、(3)进行探讨可知:震相走时可分为 2 部分,一部分与震中距及波速相关(与地震波横向传输距离相

关—— Δ/V);一部分与震中距无关(与介质厚度、波速、震源深度有关—— b)。所以震相走时=横向走时+竖向走时(折合走时),对公式(1)进行变换,得到公式

$$T_z = T - \Delta/V. \quad (4)$$

式中: T_z 为折合走时; T 为理论/观测震相走时; Δ 为震中距; V 为波速。

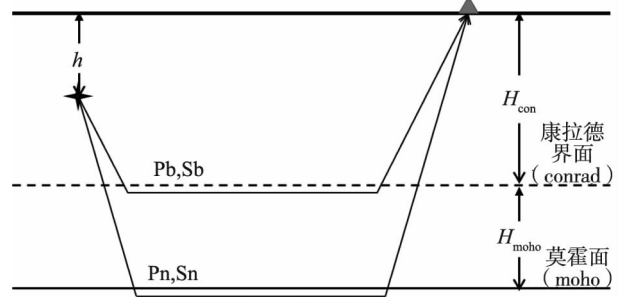


图 1 P_n 、 P_b 走时路径

因为折合走时只与介质厚度(康拉德界面或莫霍面深度)、震源深度和波速相关,所以同一震源深度的情况下,理论折合走时应为常数值 b 。本文中利用设置不同的波速和康拉德界面及莫霍面深度,通过观察理论折合走时与观测折合走时的分布对速度模型进行调整。

3) Hyposat 批处理方法

Hyposat 定位方法是基于传统盖格基本原理进行地震定位的方法^[13],Hyposat 批处理软件通过调用 MSDP 中的 Hyposat 定位程序,针对一维速度模型中每个参数,设置各自的参数范围以及不同的变化步长,不断更改速度模型,对大量地震数据同时进行 Hyposat 定位处理,并对不同模型结果中的残差进行比较,选择较为合理的速度模型。

4) PTD 方法

PTD 方法是朱元清等人^[14]提出来的,是将不同台站的初至震相到时(包括 P_g 、 P_n 2 种震相)做变换后,根据 P_g 与 P_n 的到时差组对计算地震的震源深度。该方法对速度模型要求较高,当速度模型越接近实际情况,PTD 程序计算结果中的有效震相数量也就越多,且图形结果越符合高斯分布。

2 模型中各参数范围确定

河北台网目前使用的速度模型主要分为上地壳、下地壳以及上地幔顶层等 3 层结构,包括以下 8 个参数:上地壳 P_g 波、 S_g 波速度及康拉德界面(conrad)深度 H_{con} ,下地壳 P_b 波、 S_b 波速度及莫霍

面(moho)深度 H_{moho} , 莫霍面顶层 Pn 波、Sn 波速度。由于 S 波是后续震相, 在河北台网日常编目中 Sn 震相数量很少、Sb 震相无识别, 无法直接利用 Sb、Sn 震相进行速度求取。本文首先利用 P 波震相求取一维 P 波速度模型, 在后续批处理过程中, 利用波速比求得 S 波速度, 并确定最终速度模型。

2.1 数据资料选取

统计了 2009 年 1 月 1 日至 2014 年 10 月 31 日期间, 河北省数字地震台网记录到的台站数 $N \geq 10$ (包括邻省台站), 且 $M \geq 1.0$ 的河北省内地震(不包括北京、天津), 共计 1 113 条。按震级分类, $M_{1.0} \sim 2.0$ 的地震有 1 001 条, $M_{2.1} \sim 3.0$ 的地震有 96 条, $M_{3.1} \sim 4.0$ 的地震有 13 条, $M_{4.1} \sim 5.0$ 的地震有 3 条。按震相统计, 1 113 条地震记录到 32 911 个 Pg 震相, 6 198 个 Pn 震相, 44 279 个 Sg 震相, 632 个 Sn 震相。

表 1 $V_{\text{Pg}}、V_{\text{Pn}}$ 随震中距增大时的变化

震中距/km	50~150	50~200	50~250	50~300	50~350	50~400	50~450	50~500	50~550	50~650
$V_{\text{Pg}}/(\text{km/s})$	6.04	6.10	6.16	6.19	6.19	6.20	6.20	6.21	6.21	6.21
样本数	18 903	24 207	26 724	27 642	27 958	28 162	28 237	28 257	28 262	28 266
震中距/km	150~300	150~350	150~400	150~450	150~500	150~550	150~600	150~650	150~700	
$V_{\text{Pn}}/(\text{km/s})$	7.96	7.97	7.98	8.02	8.03	8.05	8.05	8.05	8.05	
样本数	4 871	5 176	5 374	5 498	5 539	5 541	5 546	5 546	5 547	

2) 滑动窗拟合

表 2 为 Pg、Pn 震相分别以 150 km、200 km 为窗口, 50 km 为步长的震中距变化范围内的变化特征。由表 2 看出, Pg、Pn 震相分别在震中距 50~400 km、150~500 km 范围内变化较为稳定, 即近距离范围内较稳定, 之后由于震相数量减少, 波动较大。针对不同滑动窗的拟合结果, 舍弃数据量使用率低于 10% 的数据结果后进行统计; 第 1 种滑动窗结果中 V_{Pg} 的变化范围为: 6.10~6.38 km/s, 平均值为 6.26 km/s, V_{Pn} 的变化范围为: 7.96~8.16 km/s, 平均值为 8.05 km/s; 第 2 种滑动窗结果中 V_{Pg} 的变化范围为: 6.16~6.35 km/s, 平均值为 6.26 km/s, V_{Pn} 的变化范围为: 7.96~8.21 km/s,

2.2 $V_{\text{Pg}}、V_{\text{Pn}}$ 范围的确定

将收集到的 1 113 条地震资料, 提取每个地震的 Pg、Pn 震相资料的震中距及走时, 求取不同震相在不同震中距范围内的拟合速度和稳定性。针对 Pg、Pn 出现震中距不同, 分别自 50 km、150 km 开始, 根据以下 2 种情况进行滑动拟合, 分析不同震中距范围内 2 种震相的速度变化特征。

1) 线性拟合

表 1 $V_{\text{Pg}}、V_{\text{Pn}}$ 随震中距增大时的变化为 $V_{\text{Pg}}、V_{\text{Pn}}$ 以 50 km 为步长, 不断扩大震中距的拟合结果: ①当震中距在 50~150 km 范围内, Pg 速度最小为 6.04 km/s, 随着震中距范围不断增大, 速度也不断增大, 最大达到 6.21 km/s, 平均速度为 6.17 km/s。②当震中距在 150~300 km 范围内, Pn 速度最小为 7.96 km/s, 随着震中距增大, Pn 速度也在不断增大, 最大达到 8.05 km/s, 平均速度为 8.02 km/s。

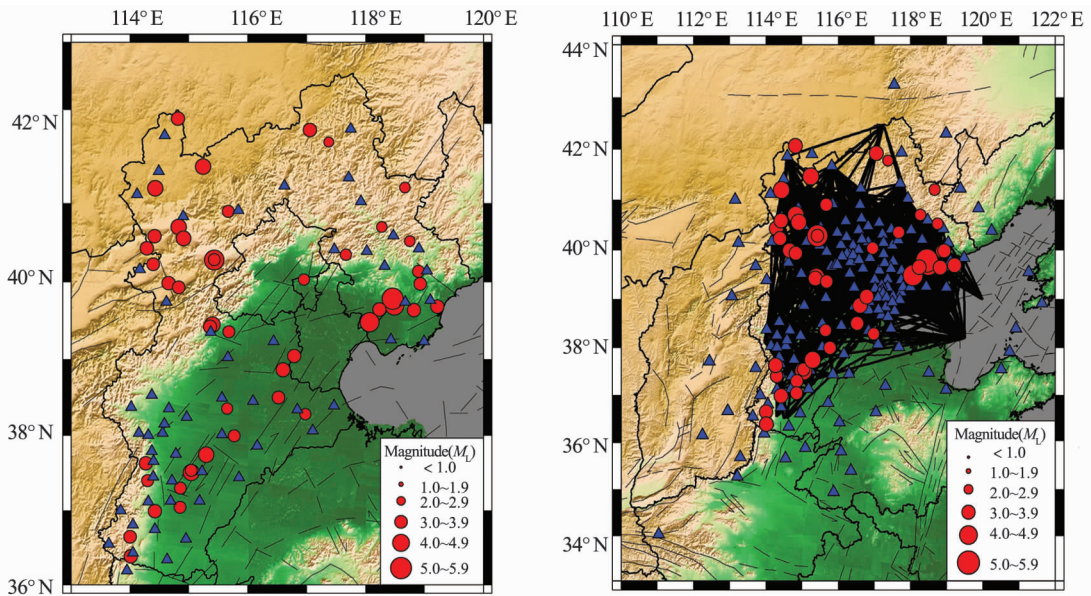
平均值为 8.08 km/s。结合线性拟合及滑动窗拟合结果, 确定 $V_{\text{Pg}}、V_{\text{Pn}}$ 的变化范围分别为: 6.0~6.4 km/s, 7.9~8.3 km/s。

2.3 V_{Pb} 范围的确定

选取河北省内 $M \geq 2.0$, 定位过程中本省所属台站使用率在 40% 以上, 且震中分布能覆盖全省大部分地区的地震, 共计 48 条(图 2a)。其中河北北部的承德地区选用的地震为震级 $M \geq 1.7$, 本省台站使用率在 17% 以上(图 2b)。根据张惠^[15]的方法, 明确本区域 Pb 震相特征(图 3a), 对选定的 48 条地震重新进行震相标定, 共标定出 96 个 Pb 震相。对此 96 个震相做线性拟合, 拟合结果 $V_{\text{Pb}} = 6.56 \text{ km/s}$ (图 3b)。

表2 V_{Pg} 、 V_{Pn} 在不同震中距内的变化

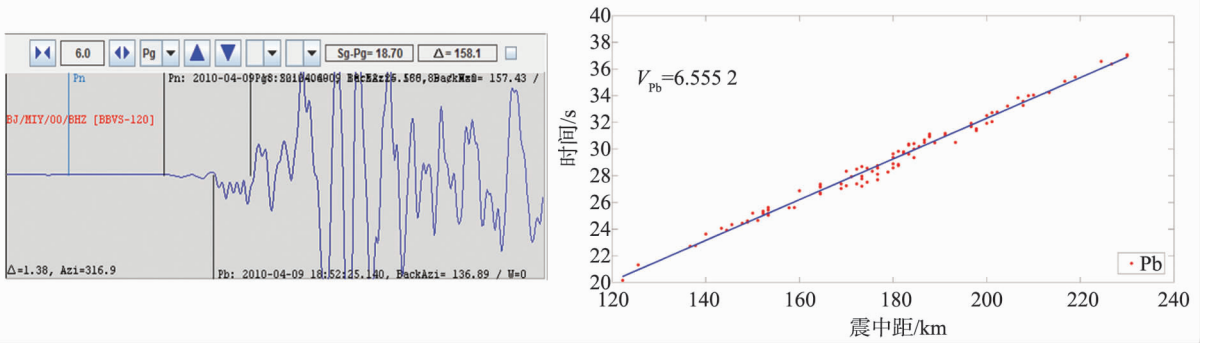
震中距/km	50~200	100~250	150~300	200~350	250~400	300~450	350~500	400~550	450~600	500~650
$V_{Pg}/(km/s)$	6.10	6.25	6.38	6.30	6.21	6.26	6.38	6.50	6.16	5.72
样本数	24 207	15 769	8 852	3 833	1 465	606	304	106	29	9
数据使用率	85.64%	55.79%	31.32%	13.56%	5.18%	2.14%	1.08%	0.38%	0.10%	0.03%
震中距/km	150~300	200~350	250~400	300~450	350~500	400~550	450~600	500~650	550~700	
$V_{Pn}/(km/s)$	7.96	8.07	8.00	8.16	8.50	8.38	8.36	8.64	7.82	
样本数	4 871	2 480	1 203	637	367	190	69	28	6	
数据使用率	87.81%	44.71%	21.69%	11.48%	6.62%	3.43%	1.24%	0.50%	0.11%	
震中距/km	50~250	100~300	150~350	200~400	250~450	300~500	350~550	400~600	450~650	
$V_{Pg}/(km/s)$	6.16	6.28	6.35	6.26	6.24	6.28	6.39	6.37	6.16	
样本数	26 724	16 687	9 168	4 037	1 540	626	309	110	29	
数据使用率	94.54%	59.04%	32.43%	14.28%	5.45%	2.21%	1.09%	0.39%	0.10%	
震中距/km	150~350	200~400	250~450	300~500	350~550	400~600	450~650	500~700		
$V_{Pn}/(km/s)$	7.96	8.05	8.10	8.21	8.42	8.41	8.36	8.22		
样本数	4 871	2 678	1 327	678	390	195	69	29		
数据使用率	87.81%	48.28%	23.92%	12.22%	7.03%	3.52%	1.24%	0.52%		



a 研究选用的地震震中分布

b 研究选用的地震射线分布

图2 河北省选用的48条地震震中分布及选用的地震射线分布



a 密云台 Pb 震相
b 96 个 Pb 震相的线性拟合
图 3 本区域典型 Pb 震相图与 Pb 震相拟合结果

根据折合走时理论,即当速度参数合适时,同一震源深度下,实际震相应均匀分布在理论折合走时两侧。统计历年地震定位结果可知,河北地区的地震震源深度大部分位于 5~20 km 之间,所以本文将折合走时中的震源深度设置为 5 km、10 km、15 km、20 km 4 个深度值。基于华南模型、华北模型与拟合结果中

V_{Pb} 值,利用识别的 96 个 Pb 震相做折合走时,不断调整 V_{Pb} 大小,当 $V_{Pb}=6.68$ km/s 时,实际震相均匀对称的分布在理论折合走时两侧,说明 V_{Pb} 应在 6.68 km/s 左右(图 4c)。结合华南模型、华北模型以及 Pb 震相拟合速度结果和折合走时调整结果,认为 V_{Pb} 的变化范围为:6.5~6.9 km/s。

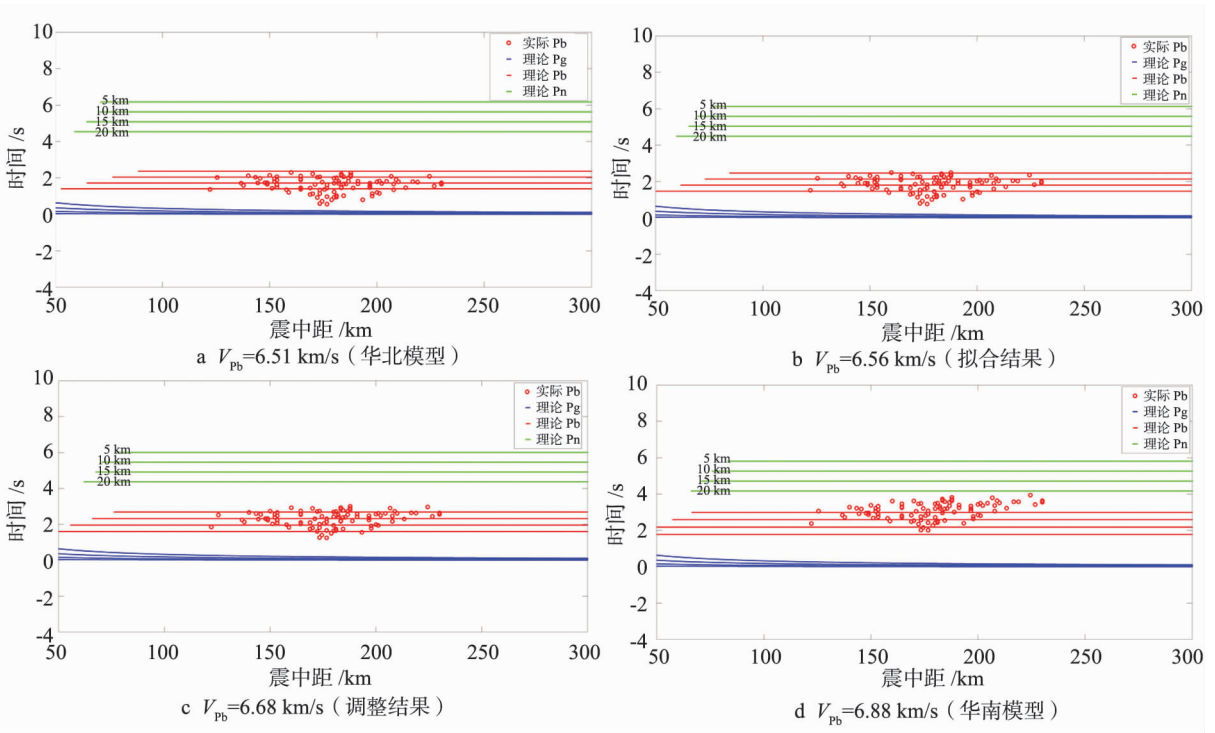


图 4 V_{Pb} 调整前后折合走时

2.4 H_{con} 、 H_{moho} 范围的确定

康氏界面深度与莫霍面深度可以利用爆破资料的折合走时进行调整。

是以华南模型为基础,结合上文中 V_{Pb} 的调整结果,对 H_{con} 、 H_{moho} 进行调整前后的折合走时。图

4a、4b 分别是以爆破震相资料基础,对华南模型中 H_{con} 、 H_{moho} 进行调整前后所做的折合走时;图 4c、4d 分别是以 48 条地震震相资料为基础,对华南模型中 H_{con} 、 H_{moho} 进行调整前后所做的折合走时。通过对比可以看出,4 幅图中实际震相的折合走时与理论

的基本平行,但华南模型的结果没有均匀的分布在理论折合走时的两侧,对 H_{con} 、 H_{moho} 进行调整, H_{con} 由 21 km 增加为 22 km, H_{moho} 由 33 km 增加为 35

km,调整后理论与实际震相的折合走时分布较为均匀,所以 H_{con} 、 H_{moho} 的范围分别应该在 22、35 km 左右。

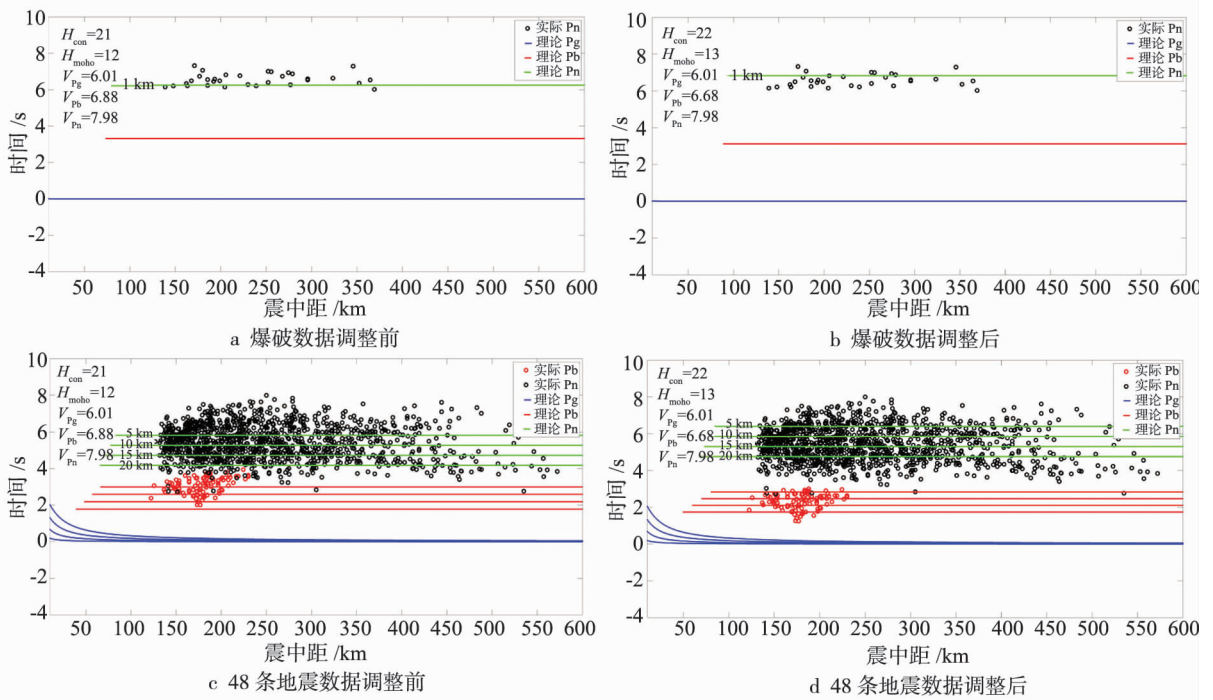


图 5 华南模型 H_{con} 、 H_{moho} 调整前后折合走时

根据查阅文献可知,由于康拉德界面存在不连续性,前人针对其研究较少,所以利用爆破折合走时及华南模型、华北模型等结果,将 H_{con} 的参数变化范围定为 18~23 km。

前人针对莫霍面深度研究较多,其中罗艳等^[16]利用接收函数得到了河北地区 67 个台站下方的莫霍面深度,其分布位于 30~42 km 之间,与大多数研究成果相符,且上文爆破折合走时结果正好位于该范围内,故确定河北地区的 H_{moho} 参数变化范围为 30~42 km。

3 河北区域一维速度模型建立

根据一维速度模型中各参数变化范围,对选定的地震数据进行 Hyposat 批处理,根据 Hyposat 定位结果残差大小,以及与编目结果震中偏差的大小等来确立河北区域最终的速度模型。本次批处理过程分为 2 步:首先利用固定的波速比进行定位,寻找残差较小且较为合理的 P 波速度模型为最优;其次,在此模型基础上,通过调整波速比的方法,确定最终速度模型。

3.1 P 波速度模型确立

本次批处理过程使用的是上文的 48 条地震,震相数量分别为:3 206 个 Pg 震相,1 258 个 Pn 震相,3 380 个 Sg 震相,155 个 Sn 震相,计算过程中将波速比固定为理论波速比 1.73。

Hyposat 批处理过程分为 2 步:

第 1 步,将上文得到的 V_{Pg} 、 V_{Pb} 、 V_{Pn} 、 H_{con} 、 H_{moho} 的变化范围设置为批处理各参数的变化范围,并对速度参数和厚度参数分别取步长 0.1 km/s、1 km 进行网格搜索运算,寻找残差最小的速度模型。以下为第一步的取值范围及步长:

V_{Pg} 取 6.00~6.40 km/s,步长为 0.1 km/s;

V_{Pb} 取 6.50~6.90 km/s,步长为 0.1 km/s;

V_{Pn} 取 7.90~8.30 km/s,步长为 0.1 km/s;

H_{con} 取 18~23 km,步长为 1 km;

H_{moho} 取 30~42 km,步长为 1 km。

第 1 步残差最小的结果为 $V_{\text{Pg}} = 6.20$ km/s、 $V_{\text{Pb}} = 6.50$ km/s、 $V_{\text{Pn}} = 7.90$ km/s、 $H_{\text{con}} = 23$ km、 $H_{\text{moho}} = 35$ km,残差为 0.417。

第 2 步:以第 1 步结果为基础,将速度参数步长

调整为 0.01 km/s, 厚度参数步长 0.5 km, 各参数取不同的变化范围, 进行进一步的批处理:

V_{Pg} 取 6.10~6.25 km/s, 步长为 0.01 km/s;

V_{Pb} 取 6.45~6.60 km/s, 步长为 0.01 km/s;

V_{Pn} 取 7.85~8.00 km/s, 步长为 0.01 km/s;

H_{con} 取 21~24 km, 步长为 0.5 km;

H_{moho} 取 34~36 km, 步长为 0.5 km。

表 3 为残差较小的前 10 组模型和华南模型、华

北模型的 Hyposat 定位结果以及每组结果与编目结果的震中偏差分布。经过比较, 可以看出第 4 组模型虽然残差略大, 但是其震中偏差小于 2 km 的地震条数最多, 为 84.8%, 平均震中偏差为最小值 1.9 km, 故最终认为第 4 组为最优 P 波速度模型: $V_{Pg}=6.11$ km/s, $V_{Pb}=6.60$ km/s, $V_{Pn}=7.96$ km/s, $H_{con}=22$ km, $H_{moho}=35$ km。

表 3 Hyposat 批处理残差最小的前 10 组模型

模型编号 /名称	$V_{Pg}/(km/s)$	$V_{Pb}/(km/s)$	$V_{Pn}/(km/s)$	H_{con}/km	H_{moho}/km	残差	震中偏差 ≤ 2 km 百分比	平均震中 偏差/km
1	6.20	6.50	7.90	23.0	35	0.417	67.4%	1.9
2	6.10	6.50	7.90	22.0	35	0.418	63.0%	2.0
3	6.20	6.60	7.80	22.0	35	0.419	63.0%	1.9
4	6.11	6.60	7.96	22.0	35	0.421	84.8%	1.9
5	6.10	6.50	7.90	21.5	35	0.425	58.7%	2.1
6	6.10	6.55	7.90	22.0	35	0.427	60.9%	2.0
7	6.11	6.50	7.90	22.0	35	0.429	65.2%	1.9
8	6.11	6.60	7.96	21.5	35	0.429	63.0%	1.9
9	6.10	6.60	7.96	22.0	35	0.432	63.0%	1.9
10	6.11	6.60	7.97	21.5	35	0.433	63.0%	1.9
华南模型	6.01	6.88	7.98	21.0	33	0.644	56.5%	3.1
华北模型	6.01	6.51	8.01	15.0	33	0.648	37.0%	3.0

3.2 新模型确立

一般情况下而言, 随着深度的增加, 压力和温度增大, 导致纵波速度增加会快于横波速度^[17], 因而纵、横波波速比会随深度增加而增大。根据这一原则, 在 P 波最优模型基础上, 以 0.01 步长调整波速比进行批处理计算, 利用 S_g、S_n 震相确立河北新模型, 得到残差最小的 3 层波速比分别为 1.72、1.73、1.76。经计算, 本次结果与编目结果的震中偏差为 1.9 km, 与 P 波最优模型结果的震中偏差基本一致, 所以最终认为表 4 为河北新模型参数。

表 4 河北 2 层地壳新模型参数

地层	P 波速度/ (km/s)	S 波速度/ (km/s)	波速比	深度/km
上地壳	6.11	3.552	1.72	22
下地壳	6.60	3.815	1.73	35
上地幔顶层	7.96	4.523	1.76	

4 新模型检验

4.1 批量定位残差检验

批量定位检验是利用河北新模型对河北区域 2009 年 1 月至 2014 年 10 月 $M \geq 2.0$ 的地震进行 Hyposat 批处理定位, 并与华南模型、华北模型的 Hyposat 定位结果作对比, 以此验证新模型的合理性。

2009 年 1 月至 2014 年 10 月河北地区发生 $M \geq 2.0$ 事件共 132 次, 去除边界地震以及单台记录地震和爆破、可疑地震事件, 本次 Hyposat 批处理共使用地震条数为 125 条。基于 3 种模型对 125 条地震分别进行 Hyposat 批处理定位, 并对 3 个结果进行定位残差对比。新模型的残差范围在 0.195~0.846 之间, 平均残差为 0.420; 华南模型的残差范围在 0.22~1.462, 平均残差为 0.589; 华北模型的误差范围在 0.240~1.922 之间, 平均残差为 0.603。故认为新模型优于华南模型与华北模型。

4.2 PTD 深度定位检验

为检验新模型在河北整个地区的适用性,在河北西部、东部、南部、中部 4 个地区分别选取了发生在张家口、唐山、赞皇、廊坊等地的 4 个地震进行 PTD 深度定位检验(表 5,图 6)。由表 5 看出,新模

型的深度略微加大,但较为合理,且新模型的有效震相使用率较华南模型分别提高了 36.6%、20.85%、29.57%、35.07%,另外,图 6 中符合高斯分布的图形结果也证明了新模型定位结果的可靠,由此证明了新模型在河北地区的合理性。

表 5 4 个地震的 PTD 处理结果

	河北张家口		河北唐山		河北赞皇		河北廊坊	
	有效震相使用率	震源深度/km	有效震相使用率	震源深度/km	有效震相使用率	震源深度/km	有效震相使用率	震源深度/km
新模型	74.96%	11.2	81.43%	12.7	83.40%	11.3	88.95%	11.3
华南模型	38.36%	5.6	60.58%	6.6	53.83%	5.5	53.88%	10.0

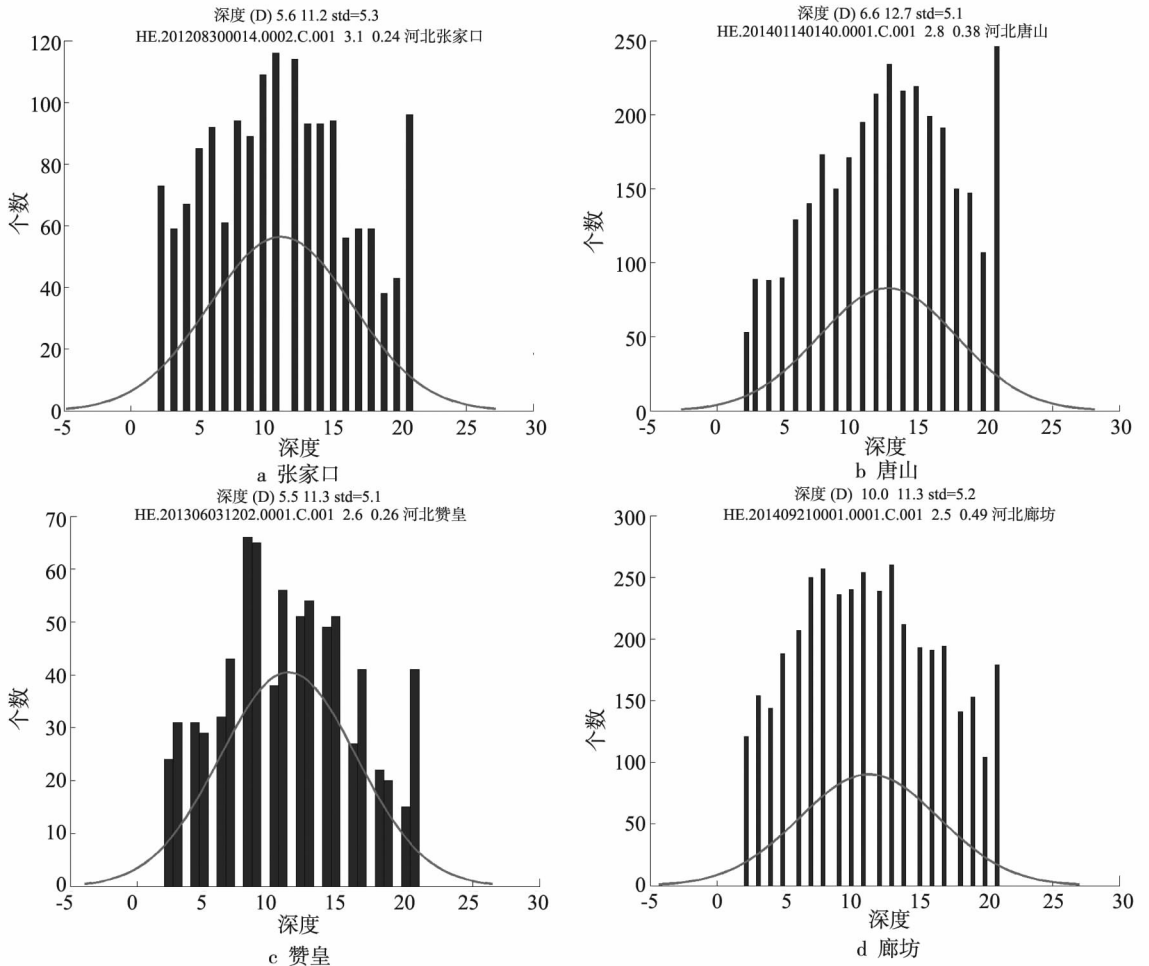


图 6 PTD 处理的图形结果

4.3 人工爆破检验

中国地震局地球物理研究所于 2007 年 12 月 12 日 03 点 00 分在河北怀来地区进行科学探测爆破,河北省测震台网完整地记录了此次爆破波形。运用 MSDP 软件中 Hyposat 定位方法,针对河北新

模型与原华南模型分别对此次爆破进行定位,通过定位残差比较以及 2 种结果与实测结果对比,分析新模型的有效性。2 种模型对比结果(表 6)显示,新模型与华南模型的定位结果与实测结果震中差分别为 1.02 km 与 3.13 km,定位精度提高了 2 km,并

且新模型的定位残差略小于华南模型的残差。由此 证明新模型优于华南模型。

表 6 怀来爆破实测结果与华南模型及河北新模型定位结果比较

发震时刻	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	与实测震中差/km	定位残差	说明
2007-12-12 03:00	40°15.59'	115°41.47'	0			实测
2007-12-12 03:00:20.72	40°15.66'	115°42.00'	0	1.02	0.132	新模型
2007-12-12 03:00:20.73	40°16.02'	115°43.08'	0	3.13	0.188	华南模型

4.4 典型地震事件

利用典型地震事件进行模型验证过程中,采用了 2 种对比方法:不同模型(河北新模型、华南模型)、同一定位方法对同一地震进行定位;同一模型(河北新模型)、不同定位方法对同一地震进行定位。本文中选择的典型地震为 2009 年以来,河北地区发生的最大的 2 次地震以及天津发生在下地壳的一次地震:2012 年 5 月 28 日河北唐山 M4.8 地震、2014 年 9 月 6 日河北涿鹿 M4.3 地震以及 2016 年 5 月 1 日天津北辰区 M2.8 地震。

1) 不同模型、同一定位方法结果比较

表 7 为 2012 年唐山地震与 2014 年涿鹿地震基于不同模型(河北新模型、华南模型),运用 Hyposat 定位方法分别进行定位的结果。从中可以看出,河北新模型较华南模型的定位结果中,发震时刻与震中位置相差不大,但河北新模型的残差更小。其中,唐山地震与涿鹿地震的新模型定位结果的震源深度分别为 14.3 km、15.9 km,而李冬圣等^[18]针对这 2 个地震的矩张量反演结果中震源深度分别为 11 km、14 km,二者相近。

表 7 唐山、涿鹿地震在河北新模型与华南模型结果中的比较

2012-05-28 河北唐山地震						
发震时刻	纬度	经度	深度/km	震级(M)	定位残差	说明
2012-05-28 10:22:52.40	39°46.68'	118°26.64'	14.3	4.8	0.506	新模型
2012-05-28 10:22:52.44	39°46.92'	118°26.76'	10.5	4.8	0.536	华南模型
2014-09-06 河北涿鹿地震						
2014-09-06 18:37:40.88	40°16.80'	115°25.38'	15.9	4.3	0.244	新模型
2014-09-06 18:37:40.88	40°16.68'	115°25.74'	21.3	4.3	0.261	华南模型

2) 同一模型、不同定位方法结果比较

本次对比选择的是 2013 年唐山 M4.8 地震及 2016 年天津北辰 M2.8 地震,根据上文定位结果以及地震目录可知,二者震源分别位于上、下地壳中。根据波形传播规律可知,发生在下地壳的地震缺少 Pb 震相,据此检查 2 次地震波形,发现唐山地震具有明显的 Pb 震相,而天津北辰地震则无,所以也证明 2 次地震分别发生在上、下地壳中。基于河北新模型,应用 Hyposat 定位方法及 PTD 定位方法对 2 次地震分别进行定位。其中,前者 2 种方法的定位结果中,震源深度分别为 14.3 km、15.0 km;后者的 2 种震源深度结果分别为 26.5 km、26.8 km。2 种定位方法震源深度结果相近且符合地震波形特征。由此可见,河北新模型定位结果稳定、准确。

综合上述结果,认为河北新模型相较于原华南模型在地震定位过程中残差更小,精度更高,与河北实际地质情况更为相符。

5 结论与讨论

本文在利用数字化震相资料建立河北区域一维速度模型过程中,主要得到以下几点认识:

1) 通过滑动窗拟合、折合走时、Hyposat 批处理等程序和方法建立河北地区新的一维速度模型,并利用新旧模型批处理残差比较、PTD 震源深度定位、人工爆破、典型地震等数据和方法对新模型进行验证。结果表明,相较于河北台网现用的华南速度模型,新的速度模型定位精度更高,残差更小。

2) 在标定 Pb 震相过程中,发现北部山区地震

的Pb震相较于清晰,东南部平原地区Pb震相较于难识别,且整体Pb震相并不发育,由此说明河北地区康拉德界面并不连续,尤其是东南部地区,地壳结构更为复杂。

3)在建立河北地区新模型的过程中,发现河北南部平原与北部山区地质构造有所差异,其速度模型也应不同;且在课题研究过程中,基于新模型对唐山

山地区部分地震重新做了PTD定位,发现新模型定位结果的震源深度较原华南模型结果偏深,后续可针对以上2点做进一步研究。

致谢 感谢河北省地震局、上海市地震局以及一维速度模型相关工作人员提供的支持和帮助;感谢审稿老师提出的宝贵意见及建议。

参考文献:

- [1] 赵博,高原,李玉涛.用双差定位结果分析华北地区的地震活动[J].地震,2013,33(1):12-21.
- [2] 胡幸平,崔效锋.华北地区中部地震精定位与构造应力场研究[J].震灾防御技术,2013,8(4):351-360.
- [3] 范玉兰,林纪曾,胡瑞贺,等.华南地区近震走时表的研制[J].华南地震,1990,10(2):1-16.
- [4] 于利民,刁桂苓,李钦祖,等.由深源远震体波记录反演华北北部地壳上地幔速度结构[J].华北地震科学,1995,13(3):11-20.
- [5] 张学民,束沛镒,刁桂苓,等.利用数字地震记录研究唐山震区台下的P、S波速度结构[J].华北地震科学,2001,19(1):10-17.
- [6] 张成科,张先康,盖玉杰,等.文安—蔚县—察右中旗剖面地壳上地幔速度结构与构造研究[J].华北地震科学,1997,15(3):18-28.
- [7] 李强,王椿镛,刘瑞丰,等.应用层析成像技术研究华北地壳速度结构[J].地震地磁观测与研究,1999,20(5):88-97.
- [8] 于湘伟,陈运泰,王培德.京津唐地区中上地壳三维P波速度结构[J].地震学报,2003,25(1):1-14.
- [9] 王志铄,王椿镛,曾融生,等.华北及邻区地壳上地幔三维速度结构的地震走时层析成像[J].CT理论与研究应用,2008,17(2):15-27.
- [10] 王帅军,张先康,刘宝峰,等.张渤地震构造带中西段及邻区深部构造探测[J].大地测量与地球动力学,2005,25(3):110-115.
- [11] 田晓峰,张先康,嘉世旭,等.华北北部不同构造单元地壳速度模型——均匀分层介质反射波走时反演的结果[J].华北地震科学,2006,24(3):1-5.
- [12] 田宝峰,李娟,姚振兴.利用接收函数方位变化研究太行山区地壳各向异性[J].地震学报,2008,30(4):355-366.
- [13] 陈贵美,杨选,刘锦.广东数字地震台网“十五”系统的几种地震定位方法的定位效果分析[J].华南地震,2009,29(1):69-78.
- [14] 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):21-29.
- [15] 张蕙.浅析太原盆地地震波形特征[J].山西地震,2012(2):1-4.
- [16] 罗艳,崇加军,倪四道,等.首都圈地区莫霍面起伏及沉积层厚度[J].地球物理学报,2008,51(4):1135-1145.
- [17] 卢琳,闫桂京,陈建文.地层温度和压力对地震波速的影响[J].海洋地质动态,2015,21(9):13-16,21.
- [18] 李冬圣,李文军,王艳荣,等.2014年河北涿鹿M4.3地震矩张量反演[J].华北地震科学,2016,34(1):36-40.

Study on One-dimensional Crustal Velocity Model in Hebei Area

WANG Li-chan¹, ZHU Yuan-qing², LI Xue-ying¹, WANG Duo³,
CAI Ling-ling¹, LI Dong-sheng¹, YANG Rui¹

(1. Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China;

2. Earthquake Administration of Shanghai, Shanghai 200062, China;

3. Earthquake Administration of Tangshan, Tangshan 063000, China)

Abstract: In order to establish a more appropriate one-dimensional velocity model for the earthquake quick reporting and compiling catalogue in Hebei Seismometry Network, 1113 earthquakes with the positioning station number over 10 and the M magnitude over 1 were collected and 48 earthquakes were selected from January 2009 to October 2014. Firstly, the range of parameters in one-dimensional velocity model was got by the methods of the sliding window fitting, the travel time reducing and referring to some previous researches. Secondly, to establish the new model of Hebei by the program of Hyposat Batching with the 48 selected earthquakes for 58902 calculations. The new velocity model was established according to the criterion, that the residual of the calculation was minor and the deviation of epicenter between the calculation and the compiling catalogue was minimum. Thirdly, the new velocity model was examined by the comparison of residual results, the depth positioning by the PTD, the blast events and the typical earthquakes and so on. It was shown that comparing to the South-China mode the new velocity model is more in conformity with the geological feature in Hebei area.

Key words: velocity model; sliding window fitting; travel time reducing; Hyposat batching