

doi:10.3969/j.issn.1003-3246.2012.03/04.045

# 北京地震台地震走时表的研制

朱战斌 郑需要 田鑫

(中国北京 100095 北京国家地球观象台)

**摘要** 长期地震观测发现,北京地震台实际地震记录的震相走时与全球地震走时表 IASP91 之间存在走时偏差。结合北京地震台及周边地下 40 km 精细速度结构的研究成果和 AK135 模型,构建其地震走时表的计算模型。通过对该地震台 2003—2008 年 NCDSN 地震观测实际走时比对,对模型结构进行修正,最终建立北京地震台地震走时表。

**关键词** 走时残差;地球模型;走时表;IASP91;AK135;PK9

## 0 引言

台站走时残差是由于地球局部介质差异导致的横向不均匀性引起的。而全球地震走时表是建立在全球平均地下速度结构分布基础上的。对于远震和极远震,由于震源距离台站较远,地震射线在台站区域范围外的走时远大于射线在到达台站区域范围内的走时。因此,对于远震和极远震来说,全球平均地震走时表与台站的实际走时残差并不显著。但对于近震来说,走时残差则会因台站地下结构与全球平均结构的差异而显著的表现出来。为了提高台站地震观测水平和地震的定位精度,建立适合台站自身地下结构特点的台站走时表,是研究课题的一次有益尝试。采用 AK135 模型作为载体,向其植入北京地震台地下 40 km 的速度结构做为走时表计算的模型基础,通过实际地震记录对比,结合北京地震台周边 100 km 范围内地下 40 km 的三维速度结构,进行适当的模型修正,以期获得走时残差明显改善的北京地震台(以下简称北京地震台)走时表。

需要说明以下几点:①实际地震走时的计算,采用的是中国数字化台网发布的地震月报中的定位结果,做为计算理论震中距和实际走时的基础;②理论震中距利用四层地球模型下的震中距计算公式(K. E. 布伦, B. A 博尔特, 1988 年,地震学引论,学术期刊出版社)计算得出;③本文地震实例中的发震时刻均为国际协调时;④为方便叙述,文中 PK9 暂定为北京地震台地震走时表的简称。

## 1 北京白家疃地区地下 40 km 精细结构的计算

根据分布在北京地区的地震台站,流动地震观测台阵记录和人工地震观测数据,对北京地震台及周围地下 40 km 精细结构进行计算。以北京白家疃地震台为中心 100 km 范围内的地

作者简介:朱战斌(1970—),男,高级工程师,主要从事地震观测与研究工作  
基金项目:中央公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB08B22, DQJB10B31)  
本文收到日期:2011-10-20

壳和上地幔结构为研究重点,考虑地层的横向非均匀性,采用层析成像技术,构建北京白家疃台及周边范围内地下三维速度模型。获得北京白家疃地区地下 40 km 深度(主要是地壳和上地幔)范围内主要速度间断面比较准确的分布。图 1 为北京地震台地下 40 km 深度范围内 P 波和 S 波速度分布情况,图 2 为白家疃地震台及其周边地区不同方位角的平均速度分布情况。

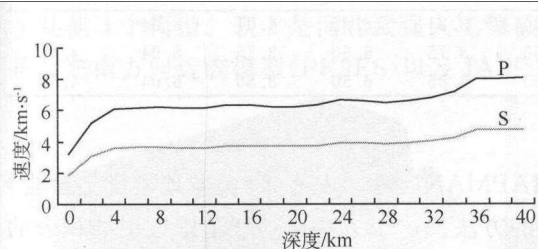


图 1 白家疃地下 40 km 深度范围内 P、S 波速度结构

Fig. 1 Variations of the velocity of P, S wave from surface to 40 km deep for Baijiatuan underground

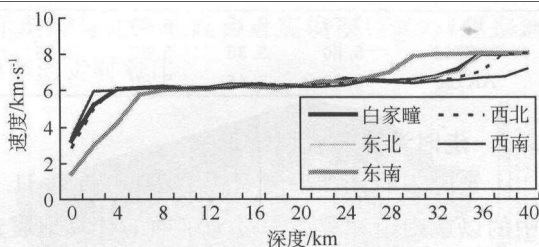


图 2 白家疃地震台及周边不同方位 P 波结构精细结构

Fig. 2 Variations of the velocity of P-wave from surface to 40 km deep for Baijiatuan and its surrounding

从图 1 可以看出,白家疃地下 40 km 主要存在 4 个间断面:最上层的沉积层,厚度是 0—4 km;12 km 深处存在一不明显的分界面,这个界面上下二层速度变化不大;22 km 深度处存在一速度明显变化的分界面,这个界面在 IASP91 和 AK135 模型上也存在,应该是上下地壳的分界面,也称康拉德面,在天然地震图上记录到的 Pb 震相与该面吻合;第四层大致位于 34 km 深处,即地壳和上地幔分界面,又称莫霍面。

从图 2 中可以明显看到,白家疃及周边不同方位地区的地下速度结构也大致呈现上述 4 个分界面。所不同的是,白家疃东南地区沉积层比其他地区厚,厚度大致为 6 km;其次,东南地区莫霍面位于 28 km 处,说明该地区地壳比其他地区薄。白家疃东南部地区上地壳呈现的低速表现,与金安蜀等(1980)利用 1972—1975 年分布在北京地区各方位上、震中距在 20°—100°范围内的 120 次远震在本区 15 个地震台上的 P 波到时,研究北京地区地壳和上地幔的三维速度结构所得出的:“存在东南的相对低速区”是一致的。总体看,白家疃东南方向地区的上地壳 P 波速度比其他地区低约 1%,但其下地壳波速则比白家疃地下高约 7%—18%。

## 2 北京白家疃地震台地球模型的构建及走时表计算

### 2.1 基础地球模型构建

根据白家疃地下 40 km 精细结构,40 km 下采用 AK135 模型,构建了白家疃地震台基础地球模型。考虑到白家疃地下 12 km 处上下层速度变化不明显,且实际观测中未发现该层的明显反射波,故未对该层做为间断面处理。范玉兰等(1990)在华南地区近震走时表的研制一文中也提到,“在 7—10 km 处有一界面,这个截面上下两层变化不大,可能是花岗岩层中的一个界面,称为第 2 截面或福尔茨面,在天然地震图上没有分析到这一界面产生的波”。白家疃地下 40 km 模型结构最终采用与 IASP91 和 AK135 相同的 3 层结构,其中第 1 层位于 22 km 处,而 IASP91 和 AK135 模型该层位于 20 km 处;第 2 层位于 34 km 处,IASP91 和 AK135 模型该层位于 35 km 处。具体速度差异见表 1。

表 1 北京地震台地下 40 km 模型与 AK135 和 IASP91 模型的速度对比  
(PK9, 为北京地震台基础模型的简称)

Table 1 Comparison of parameters of the velocity of P, S wave from the model of PK9, AK135 and IASP91 (PK9 is abbreviation of the BJT basis model)

地球模型	地表		上下地壳分界				壳幔分界面			
	$V_P / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_S / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{P1} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{S1} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{P2} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{S2} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{P1} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{S1} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{P2} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{S2} / \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
PK9	3.70	2.15	6.10	3.54	6.60	3.81	6.80	4.01	8.04	4.47
IASP91	5.80	3.36	5.80	3.36	6.50	3.75	6.50	3.75	8.04	4.47
AK135	5.80	3.46	5.80	3.46	6.50	3.85	6.50	3.85	8.04	4.48

2.2 走时计算及模型修正

走时表的计算采用 Ray Buland 和 C. H. CHAPMAN(1983)发表于《美国地震学会公告》中的以震中距和震源深度为函数的计算地震走时的方法。这个方法比射线追踪或射线积分的直接评估要快,而且比传统的走时表内插法要紧凑和全面。它摒弃了射线追踪方法中对每一个感兴趣的波至,在估算走时之前人们必须追踪射线好多次以决定合适的入射角的麻烦,同时射线追踪只对简单的地球模型适用,计算相当耗时。该方法是通过理论上更合理的时延和 tau 函数作为震源深度和射线参数函数的得到的。

使用该方法,我们基于北京地震台基础地球模型进行了走时的计算。同时,白家疃地震台 2007 年记录到的 405 个清晰地震( $\Delta=1.5^{\circ}-170^{\circ}$ )进行了震相的重新复核并就初至波实际走时进行了计算。通过初至波理论走时与实际走时的对比,发现基于北京地震台基础地球模型得到的走时,对于远震和极远震来说,走时残差明显优于 IASP91,初至波到时残差可提高近 40%。

对于近震而言,走时残差明显比 IASP91 大。经过反复的模型修改和思考,发现利用北京地震台基础地球模型得到的近震震相走时明显慢于 IASP91,这可能是由于白家疃地震台拾震器位于出露较好的基岩上。近震射线主要在地壳内传播,地表 0 km 的波速就不能用层析成像得到的沉积层的波速来构建近震的走时计算模型。但对于远震和极远震来说,拾震器坐落的这个基岩块体的广度相较千里之外的地震而言,肯定是微小的且不完整的。为此,采用白家疃地下 4 km 的岩石层波速代替模型中的深度 0 km 的波速,即 P 波和 S 波速度分别调整到  $V_P=6.1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $V_S=3.63 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 3 为北京地震台周边地下 4 km 处的 P 波波速立体分布图。从图 3 中可以看到,除东南方向和部分西南方向呈现出块状低速特征外,其他地区基本呈现出高速连贯区特征。这与朱培露等(1990)对京津唐张地区地壳和上地幔 P 波三维速度的反演结果“在区域下部 50 km 深度以内,速度结构的横向不均匀呈现出一种块状结构,并与地表的地质构造存在一定的对应关系,在燕山隆起区下部为高速异常区,而凹陷区下部则呈现低速异常区”是相符的。经过上述模型参数修改后计算得到的理论走时和实际近震记录的震相走时对比,发现近震的走时残差(除东南方向的近震外)明显减小,比 IASP91 提高 50% 以上。

对于发生在北京地震台东南方向的近震,发现计算得到的理论走时与东南方向的实际近震记录到的震相走时相比,理论走时有变快迹象。对比北京地震台东南方向层析成像的结果,已知北京地震台东南方向的沉积层厚达 6 km,且莫霍面位于地下 28 km 处。这与嘉世旭等(2005)对华北不同构造块体地壳结构及其对比研究中等到的“张渤地震带中段强震区地壳低速结构由下而上接近浅表层(仅约 6 km)构造特点”是一致的。通过反复的调整和对比,采

用北京地震台东南方向地下 5.8 km 处的波速代替地球模型中的 0 km 波速,即 P 波和 S 波速度分别调整到  $V_P=5.65\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $V_S=3.27\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 4 为为北京地震台周边地下 6 km 处的 P 波波速立体分布图。基于该地壳模型我们对东南方向的近震震相走时进行了重新计算,对比实际地震震相走时发现走时残差明显改善。以东南方向的河北武强人工爆破实例。基于东南方向的计算模型得到的 Pn、Pg、PnPn、Sg 震相走时已和实际走时非常接近,明显优于其他 3 个模型。表 2 是河北武强人工爆破实际走时与北京地震台近震模型(PK9),北京地震台东南方向近震模型(PK9ES)以及 IASP91 模型的走时对比。

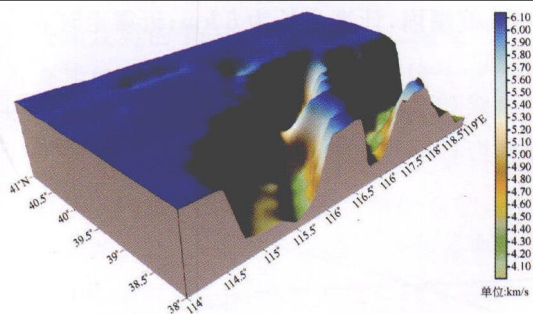


图 3 北京地震台周边地下 4 km 深度内 P 波速度立体分布  
Fig. 3 3D distribution of the P-wave velocity beneath 4 km of the BJT and its surrounding

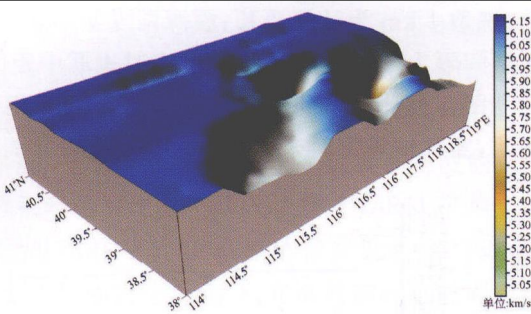


图 4 北京地震台周边地下 6 km 深度内 P 波速度立体分布  
Fig. 4 3D distribution of the P-wave velocity beneath 6 km of the BJT and its surrounding

表 2 河北武强人工爆破震相走时对比

Table 2 Omparison of the phases travel-times of Hebei Wuqiang artificial explosion

震相走时表名称	Pn 走时/s	Pg 走时/s	PnPn 走时/s	Sg 走时/s
BJT	33.3	35.4	39.4	61.1
PK9ES	32.2	35.4	39.6	61.1
PK9	31.5	32.8	38.3	55.1
IASP91	32.3	34.5	39.8	59.6

至此,用于构建北京白家疃地震台地震震相走时计算的地球模型得到实际地震和人工地震的检验,走时残差得到明显改善。这 3 个地球模型分别为,北京地震台远震和极远震模型、北京地震台近震模型和北京地震台东南方向近震模型。表 3 为这 3 个模型的地壳和上地幔波速对比。需要指出的是,对于近震,由于地壳的横向不均匀性以及康拉德面和莫霍面的纵向不均匀性,导致近震震相走时在不同地区,不同位置会有所变化,所以要想得到更加准确的近震走时表,则需要建立更加细致的三维地壳模型。

表 3 北京地震台基础地球模型的速度对比

Table 3 Comparison of parameters of the velocity of basic Earth

地球模型	地表		上下地壳分界				壳幔分界面			
	$V_P/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_S/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{P1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{S1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{P2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{S2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{P1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{S1}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{P2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{S2}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
PK9	3.70	2.15	6.10	3.54	6.60	3.81	6.80	4.01	8.04	4.47
PK9(local)	6.10	3.63	6.10	3.63	6.63	3.92	6.63	3.92	8.04	4.47
PK9(E-S)	5.65	3.27	5.65	3.27	6.50	3.75	6.50	3.75	8.04	4.47

注:(PK9,北京地震台远震基础模型;PK9(local)为近震模型;PK9(ES)为东南方向近震模型的简称)

本次研究只建立北京地震台两个近震模型,基本满足日常地震观测和震相研究的需要。

相比 IASP91 全球走时表而言,北京地震台的近震模型可分析出 sPg 等深度震相以及自由表面反射的 PnPn、PgPg、SnSn、SgSg 等反射波。这些震相是台站利用 IASP91 走时表所无法准确识别的。

2.3 北京地震台地震走时表构建

基于上述北京地震台的 3 个基础模型,对 IASP91 中的所有震相进行计算。理论上,走时表的计算程序可对任意深度和任意震中距进行理论走时的计算。为了满足日常观测和研究的需要,同时尽量减小走时表的所占用的磁盘容量,将走时表的计算设计为,震源深度在 100 km 内,选取 1 km 为计算步长;震源深度在 100—800 km 范围内,计算步长为 5 km;近震走时表震中距间隔为 0.2°,远震、极远震走时表震中距间隔为 1°。

图 5 为计算得到的北京地震台常见震相走时曲线和 2007 年实际地震走时的对比曲线。在此,实际地震走时未做深度的归一化处理。理论走时曲线是震源深度 15 km 的走时表现。

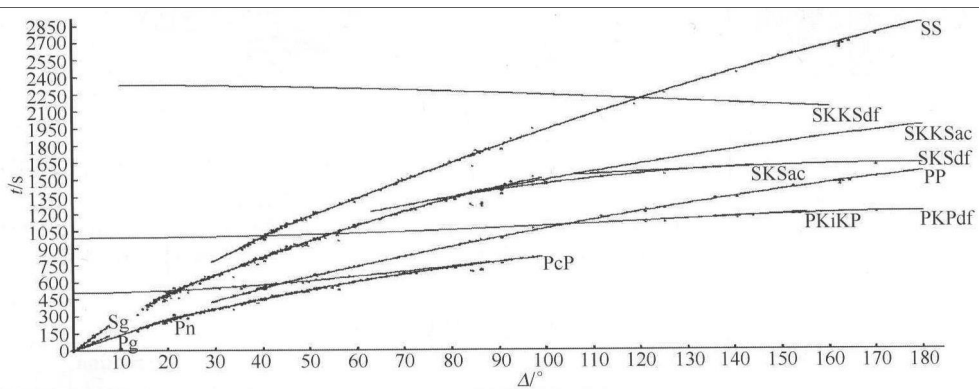


图 5 北京地震台震源深度 15 km 处的理论走时曲线与实际地震记录对比  
(曲线为理论走时,黑点为实际地震记录到的震相走时)

Fig. 5 Comparison of the computed travel times and the real recorded travel times  
(The curve is PK9 travel times beneath 15 km; the dot is recorded travel times of BJT)

3 讨论

基于北京白家疃地震台的 3 个基础模型,对北京地震台 2007 年记录的 405 个清晰地震( $\Delta=1.5^{\circ}\text{--}170^{\circ}$ )进行震相的重新复核,并就初至波实际走时进行计算。同时,进行基于 IASP91 模型的初至波理论走时计算,并对两个模型的走时残差进行对比。图 6(a)为远震和极远震初至波走时残差随震中距的分布图,图 6(c)为远震和极远震初至波走时残差随震中方位的分布图。从这两张残差对比图中可以看到,北京地震台走时表的走时残差明显小于 IASP91 的走时残差。从对比结果看,IASP91 平均走时标准残差为 2.03 s,北京地震台走时表平均走时标准残差为 1.38 s;IASPI91 走时残差算数平均为 1.86 s,即比实际走时整体快约 1.86 s;北京地震台走时表走时残差算数平均为 0.92 s,即整体比实际走时快约 0.92 s。

从前人统计情况看,J-B 表对远震、极远震主要震相的理论走时可达 1% 的精度;IASPI91 可达 0.5% 的精度。从 2007 年的 405 个地震统计结果看,IASPI91 每 100 s 精度为 0.57%;北京地震台走时表为 0.35%。北京地震台走时表的整体精度可较 IASPI91 提高 38% 以上。从图 6(c)中看到走时残差随震中方位并未表现出明显的趋势变化,说明北京

地震台基础地球模型可满足地震台日常地震震相分析与研究的需要,建立更加精细的三维地震走时表,即会增加走时表磁盘占用空间和走时表查询的麻烦,又因单个台站无法准确定位震中而起不到太大作用。

从 2003 年和 2007 年近震统计情况看,精度可比 IASPI91 提高 50% 以上。尤其需要指出的是,经过这次北京地震台走时表的研制工作,我们发现在此之前台站的近震分析较为粗浅。台站基本上只按 Pn、Pg、P11、Sn、Sg、S11 分析近震,但这仍无法避免将 Pb 识别为 Pg 或 Pn 识别为 Pg 以及把 Pg 识别为 P11 等问题。对于有深度的近震,sPg 等深度震相以及自由表面反射的 PnPn、PgPg、SnSn、SgSg 等反射波,更是台站以往所无法识别的。由于区域地下介质的不均匀性导致近震震相比较为复杂,全球平均走时表无法满足台站对近震震相的分析要求。因此,建立台站自己的走时表对台站的近震震相的识别和认识具有现实的意义。

图 6(b)和图 6(d)显示了北京地震台 2003 年和 2007 年记录到的 51 个近震初至波的标准走时残差随震中距和震中方位角的变化。从这两张残差对比图中可以看到,IASP91 平均走时标准残差为 2.98 s;北京地震台走时表平均走时标准残差为 1.39 s,整体精度提高 53% 以上。IASPI91 走时残差算数平均为 1.38 s,即比实际走时整体快约 1.38 s;北京地震台走时表走时残差算数平均为-0.01 s,即整体比实际走时慢约 0.01 s。从图 6(b)中看到,震中距 4°—6°,走时残差较 IASP91 有提高,但仍和实际走时存在一定偏差,将在今后做进一步研究。

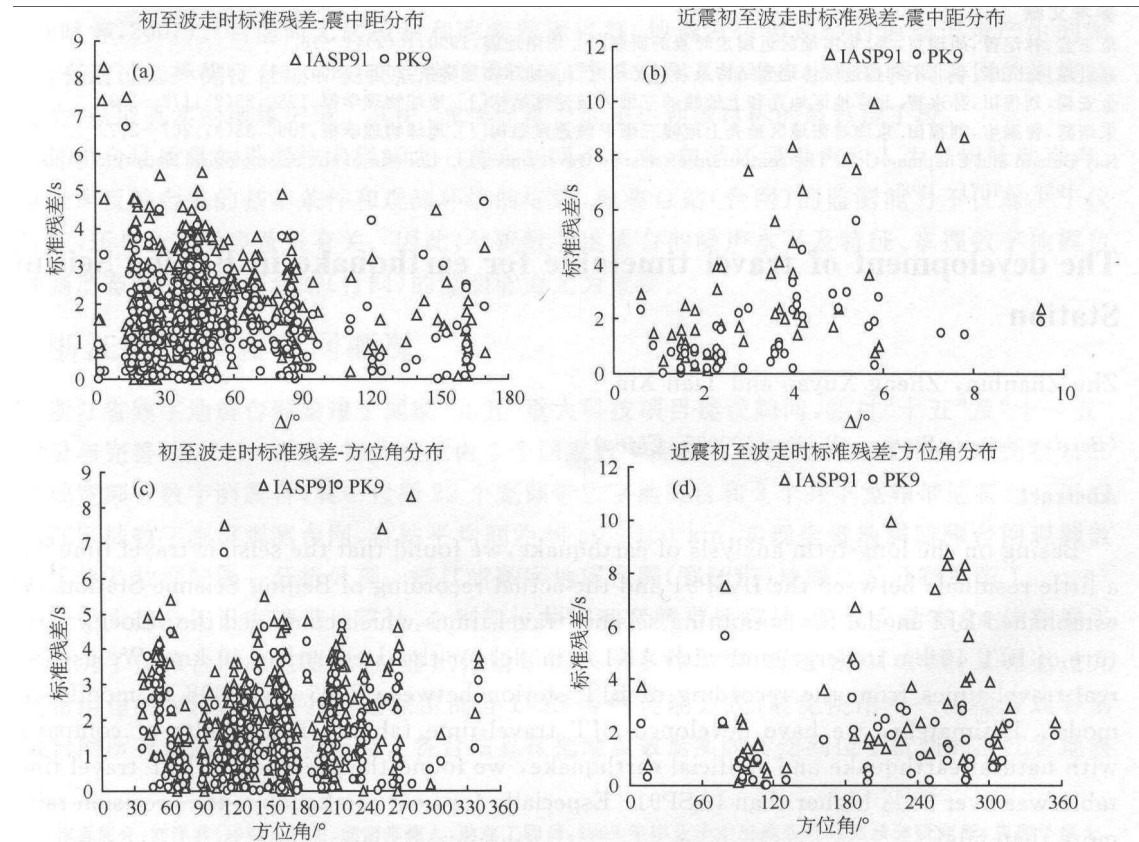


图 6 北京地震台 2007 年 405 个地震初至波实际走时与 IASP91 和 PK9 走时残差对比  
Fig. 6 Comparison of the primary wave standard residuals of 405 earthquakes that recorded from Beijing Seismic Station in 2007 with IASP91 and PK9

## 4 结束语

研制北京地震台地震走时表,是对建立适合台站自身区域结构特征的走时表的一次有益尝试。通过北京地震台走时表的研制工作,发现台站以往对近震震相的识别还是有错误的地方。另外,单台对近震深度无法估计,主要是没有比较准确的走时表提供与近震震源深度相对应的深度震相走时造成的;在远震和极远震方面,尽管只对地壳和上地幔的速度结构结合北京白家疃的及其周边的层析成像结果,进行地球模型的调整,但北京地震台走时表对远震和极远震的走时也比 IASP91 提高近 38% 的精度。虽然在远震和极远震的射线路径中,射线途经地壳和上地幔的过程只占很小的一部分,但其对走时精度的提高还能如此明显,这也说明了地球的地壳和上地幔的横向不均匀性是非常复杂的。但对于地球的深部而言,其结构相对要均匀的多。通过与北京地震台实际地震的比对,不但可以识别更多的远震和极远震震相,还发现一些以往地震分析中存在的问题。比如:误把 SKP<sub>df</sub> 识别为 PP; PDIFF 震相在震中距大于 96.5° 的震中距范围内均会以初至波的身份第一个到达。建立适合台站自身的地震走时表,不但可以通过震相的准确识别提高地震定位精度,而且可以识别更多地震震相,为开展相关地下结构研究提供重要数据来源。

### 参考文献

- 范玉蓝,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.  
嘉世旭,张先康.华北不同构造块体地壳结构及其对比研究[J].地球物理学报,2005,48(3):611-620.  
金安蜀,刘福田,孙永智.北京地区地壳和上地幔的三维 P 波速度结构[J].地球物理学报,1980,23(2):172-182.  
朱培露,曾融生,刘福田.京津唐张地区地壳上地幔三维 P 波速度结构[J].地球物理学报,1990,33(3):267-277.  
Ray Buland and Chapman C H. The computation of seismic travel times[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983,5:1271-1302.

## The development of travel timetable for earthquake in Beijing Seismic Station

Zhu Zhanbin, Zheng Xuyao and Tian Xin

(Beijing Seismic Station, Beijing 100095, China)

### Abstract

Basing on the long-term analysis of earthquake, we found that the seismic travel time have a little residuals between the IASP91 and the actual recording of Beijing Seismic Station. We established BJT model for computing seismic travel times which combined the velocity structure of BJT 40 km underground with AK135 model for the deeper than 40 km. We used the real travel times from the recording of BJT station between 2003 and 2008 to modify this model. Ultimately, we have developed BJT travel-time tables. The results of comparing with natural earthquake and artificial earthquake, we found the precision of BJT travel timetable was over 38% higher than IASP91. Especially for near earthquake, the precision raised more than 50%.

**Key words:** travel time residuals, earth-model, travel timetable, IASP91, AK135, PK9