

谢弘臻、王九洋,2018,辽阳灯塔 M_s 5.1 地震震源深度分析,中国地震,34(4),704~712.

辽阳灯塔 M_s 5.1 地震震源深度分析

谢弘臻¹⁾ 王九洋²⁾

1)北京市地震局,北京市海淀区苏州街 28 号 100080

2)大连地震台,辽宁大连 116012

摘要 对不同震中距台站的记录采用入射角法、sPL-Pg 等震相到时差,对辽宁地震台网记录采用单纯形法研究了辽阳灯塔 5.1 级地震的震源深度。结果表明,该地震震源深度应为 14km,略大于目录给出的 10km。利用四川松潘台、青海湟源台的远台记录也得到同样的结果。通过对辽宁 1970 年以来 5.0 级以上地震进行分析发现,辽宁地震的震源分布存在东西两侧偏深、中部偏浅、中部地区南浅北深的统计规律,灯塔地震震源深度符合该统计规律。

关键词: 震源深度 莫霍界面 康拉德界面 震源深度分布

[文章编号] 1001-4683(2018)04-0704-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2013 年 1 月 23 日辽阳灯塔 5.1 级地震是自 2000 年 1 月 12 日岫岩-海城间 5.1 级地震后,辽宁首次 5.0 级以上地震。精确测定该地震震源深度,对判断其发震构造、推测后续震情具有一定意义。营口-海城-岫岩及周边地区是辽宁地震最为活跃的地区。该区曾发生 1975 年 2 月 4 日海城 M_s 7.3、1999 年 11 月 29 日岫岩 M_s 5.9 地震。相比其它省份,辽宁地震活动相对较弱。前人对地震活动较弱地区的中强地震作过大量研究,如张爱萍等(2008)使用波形反演方法确定了 2004 年 3 月 24 日内蒙古东乌珠穆沁旗 M_w 5.3 地震震源参数;陈学忠等(2008)研究了 2005 年 11 月 26 日九江 M_s 5.7 地震序列的破裂过程;吕坚等(2007、2008)探讨了 2005 年 11 月 26 日九江 M_s 5.7、 M_s 4.8 地震的震源机制解与发震构造;郑钊等(2009)研究了 2006 年文安 M_w 4.9 地震的破裂扩展方式;张小涛等(2006)分析了九江地震序列的波速比特征;黄建平等(2009)利用远震与近震波形联合反演了 2006 年文安地震的震源机制解。由于震源深度是地震各参数中误差最大的,因此,很多学者着重探讨了地震活动较弱地区中强地震的震源深度,如崇加军等(2010)利用 sPL 震相分析了九江地震的震源深度;王伟涛等(2009)对文安地震震源深度进行了精定位,并探讨其与华北低速层间的关系;王新岭等(2004)使用 PTD 方法测定了巴林左旗 5.9 级地震震源深度;任克新等(2004)、刘芳(2010)探讨用 sPn 震相分析震源深度。郑勇等(2017)分析了各种常见的计算震源深度的方法,并

[收稿日期] 2018-03-19; [修定日期] 2018-06-28

[项目类别] 辽宁省地震局 2014 年硕士基金项目(LNDZ2014002)资助

[作者简介] 谢弘臻,女,1988 年生,助理工程师,主要从事强震台、地震应急工作。E-mail:hongzhenxie@gmail.com
王九洋,通讯作者,男,1979 年生,高级工程师,主要从事地震监测工作。E-mail:65902246@qq.com

讨论了其优缺点。

从国家测震台网数据备份中心^①(郑秀芬等,2009)获取波形数据后,本文对不同震中距台站记录采用视入射角法、sPL-Pg法、sPn-Pn法、sPb-Pb法分别计算震源深度,并采用单纯形法对辽宁地震台网记录进行深度定位。结果表明,灯塔地震震源深度应为14km左右,略大于目录给出的10km。同时,四川松潘台、青海湟源台的远台记录也支持这一结论。通过分析1970年以来辽宁 $M_L \geq 5.0$ 地震震源深度分布,我们发现其存在一定的统计规律,且灯塔地震震源深度符合该统计规律。这对于判断辽宁中强地震发震构造具有较重要的意义,也对判断灾情和开展应急工作具有指导意义。本文所用台站与辽阳灯塔5.1级地震震中见图1。

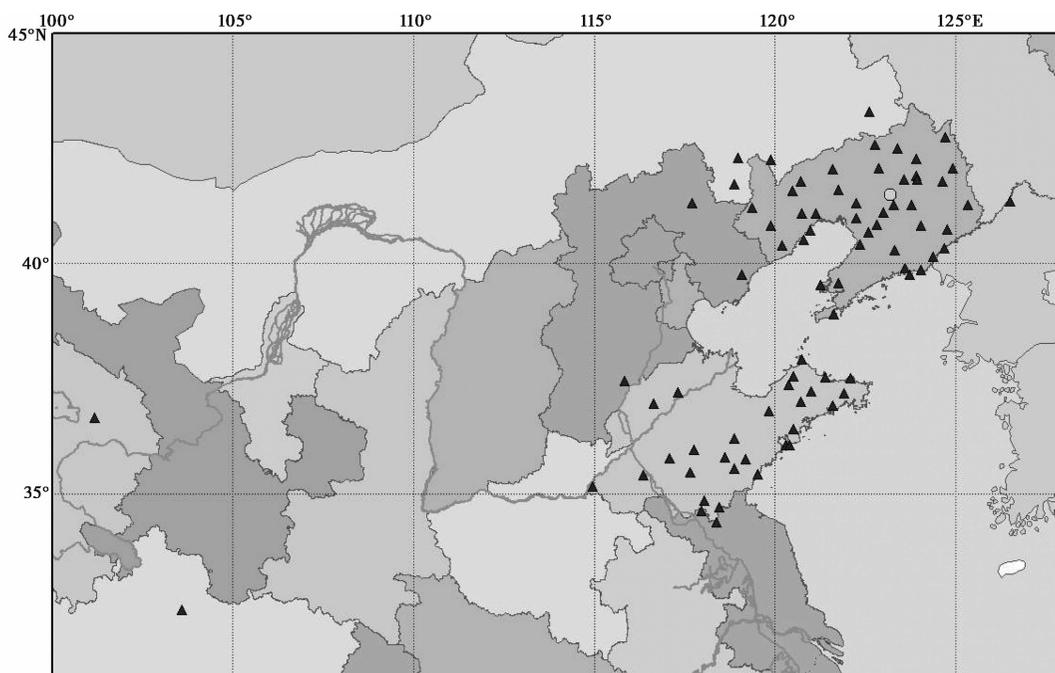


图1 台站分布与灯塔地震震中
三角形为台站;圆圈为灯塔地震震中

1 震源深度计算

1.1 视入射角法

由于视入射角法计算精度高度敏感于震中距,因此仅对震中距最小的辽阳台采用视入射角法计算震源深度,具体原理如图2所示,辽阳台实测波形见图3。辽阳台震中距为 0.29° ,对该台波形记录在原始速度、仿真伍德-安德森、仿真 WWSSN-SP 三种情况下分别采取直接读数和量取相对数值变化的方法,读取三分向数据进行计算,可得视入射角 θ ,由真入射角与视入射角间的关系可得真入射角 i

^① 中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心,2007,国家测震台网地震波形数据。<http://www.seisdmc.ac.cn>

$$i = \arcsin\left(\frac{\alpha}{\beta} \sin \frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

其中, α 、 β 分别为地壳上层中纵波、横波的速度, 按辽阳及邻区 velest 模型分别取为 5.72、3.30km/s。再由下式的震源深度 H 、震中距 Δ 间的三角函数关系

$$H = \Delta / \tan i \quad (2)$$

即可得震源深度 H 。由该方法计算得到的震源深度 H 为 15.5 ± 0.5 km。

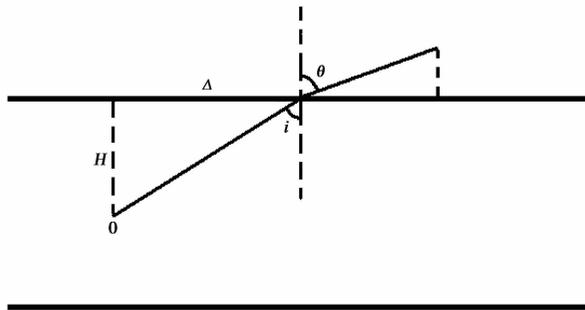


图 2 入射角法计算震源深度原理示意图

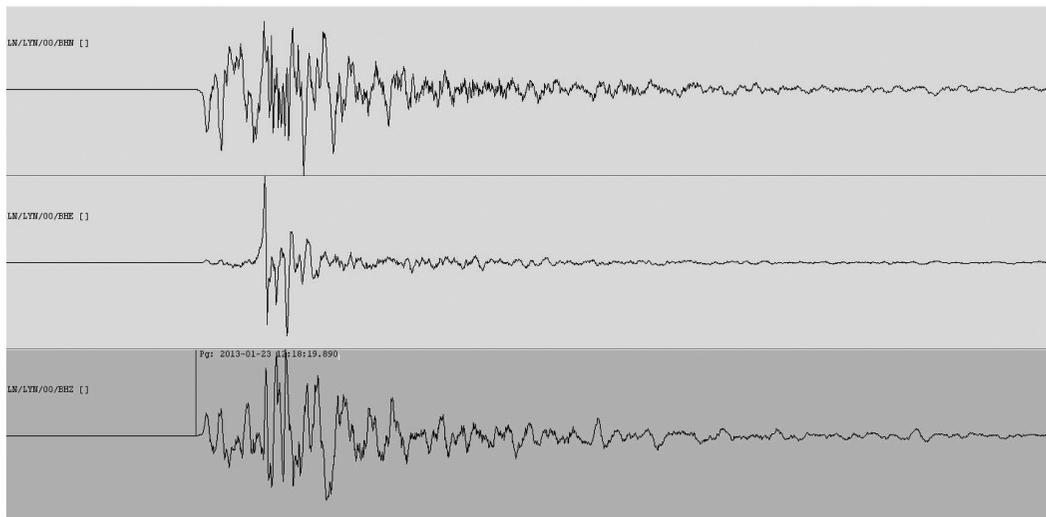


图 3 辽阳台实测波形
扫描时间 120s

1.2 sPL-Pg 法

sPL 震相由崇加军等(2010)提出。该震相由震源发出,以 S 波传播到自由界面,形成沿水平传播的 P 波。sPL 震相在形成机制、优势震中距、波形特征等方面与 sPg 震相有本质不同,其相对直达 P 波的到时差对震中距不敏感,却几乎随震源深度的增大呈线性增加,可较好约束震源深度。当震中距小于 50km 时,单台即可计算出可靠度较高的震源深度。

根据震区 velest 一维速度模型提供的地壳上层 P、S 波速度即可计算出震源深度,原理如图 4 所示,以辽阳台为例,sPL 震相实测波形见图 5。

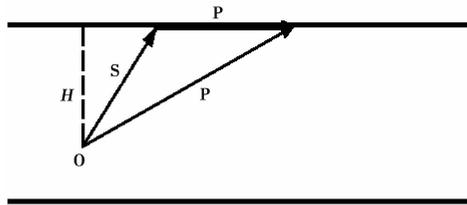


图 4 sPL-Pg 法计算震源深度原理示意图

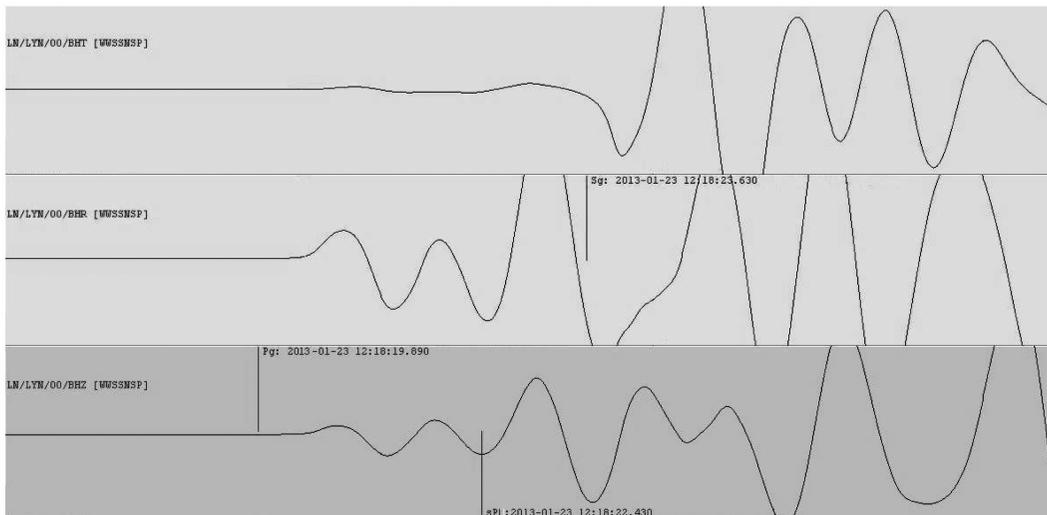


图 5 辽阳台实测 sPL 震相
扫描时间 12s

我们选取了震中距在 0.5° 以内的辽阳台、鞍山台、沈阳台、本溪台, 分别按照 sPL-Pg 法计算震源深度, 得到的震源深度 H 为 $11.4 \pm 1.4 \text{ km}$ 。

1.3 sPn-Pn、sPb-Pb 法

前人多次探讨过利用 sPn 与 Pn 到时差计算震源深度的问题, 如任克新等 (2004)、刘芳 (2010) 探讨了用 sPn 震相分析震源深度。观测事实表明, 辽宁及周边地区地壳明显分层, 存在康拉德界面。IASPEI91 模型给出的全球康拉德界面平均深度为 20km, 而辽宁地区震源深度普遍小于该深度, 因此我们按照震源位于上层地壳进行讨论, 实测波形也支持这一判断, 故根据该地区的 velest 一维速度模型计算震源深度 (图 6)。

sPn 与 Pn 的走时差为: (S 波在 OA 段的走时 + P 波在 AB 段的走时) - P 波在 L_3 上的走时。

由图 6 可知 $L_1 = L_2 = L_3$, 因此, 可由 IASPEI91 模型给出的地壳上下层以及地幔顶部 P、S 波速度推导出震源深度 H 与 sPn-Pn 的到时差 ΔT 间的关系为

$$H = \Delta T / 0.3863 \quad (3)$$

与之相似, 当震中距满足出现 Pb、sPb 等康拉德界面震相时, 可推导出震源深度 H 与 sPb-Pb 的到时差 ΔT 间的关系为

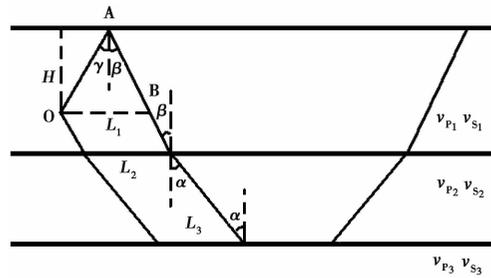


图 6 sPn-Pn、sPb-Pb 法计算震源深度原理示意图

$$H = \Delta T / 0.3190 \tag{4}$$

我们选取建昌台等 29 个有清晰可靠 Pn、sPn 震相的台站,由式(3)计算得到震源深度 H 为 $13.1 \pm 2.6 \text{ km}$;选取枣强台等 23 个有清晰可靠 Pb、sPb 震相的台站,由式(4)计算得到震源深度 H 为 $14.0 \pm 3.2 \text{ km}$ 。建昌台、枣强台实测波形见图 7、8。

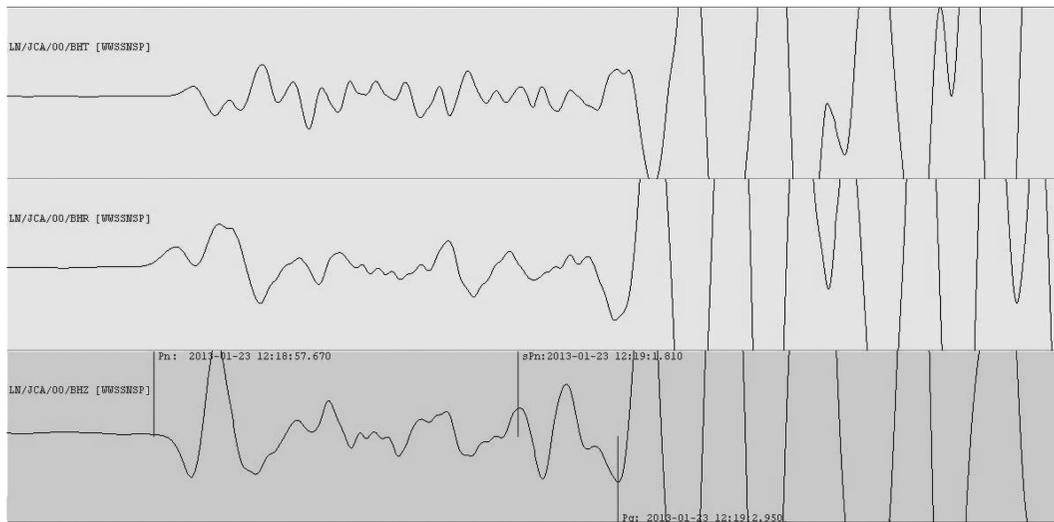


图 7 建昌台实测 sPn 震相
扫描时间 12s

1.4 单纯形法

我们围绕灯塔地震震中选取了 50 个台站,识别出全部清晰可靠的 Pn、Pg、Sn、Sg 震相,以单纯形法进行定位,得出震源深度 H 为 14.7km。

1.5 远台记录求深度

对于辽阳灯塔 $M_s 5.1$ 地震,国内相当一部分台站的实测波形属于近震波形。随着震中距的增大,影区效应又使得相当一部分远震传播区域的台站无法观测到清晰可靠的 P 波初动;沿海台站普遍背景噪声较大,不易观测到清晰可靠的 P 波初动;当震中距远至新疆、西藏、云南、广西等省份时,又因震级较小,衰减较为明显而不易观测到清晰可靠的 P 波初动,且西部地区台站密度明显低于东部地区,这进一步增大了选择理想台站记录的难度。经多

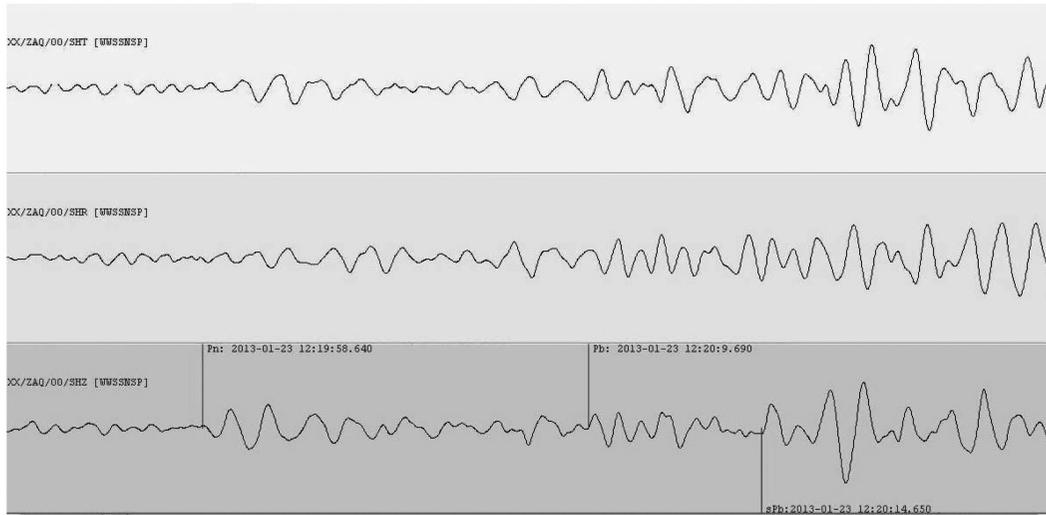


图 8 枣强台实测 sPb 震相
扫描时间 12s

方收集、筛选和比对,我们选取了四川松潘台、青海湟源台的远震记录,利用其分析辽阳灯塔 $M_s 5.1$ 地震的震源深度。湟源台震中距 17.8° ,松潘台震中距 18.3° ,由于震级较小,因此它们受三重震相影响不显著。根据振幅、相位、周期变化,松潘台可识别出 pP 震相,利用 pP-P 的到时差计算得出的震源深度 H 为 15km;湟源台可识别出 sP 震相,利用 sP-P 的到时差计算得出的震源深度 H 为 15km。松潘台、湟源台的波形见图 9。由几种方法计算得到的灯塔 $M_s 5.1$ 地震震源深度见表 1。

视入射角法	sPL-Pg 法	sPn-Pn 法	sPb-Pb 法	单纯形法	pP-P 法	sP-P 法
15.5±0.5	11.4±1.4	13.1±2.6	14.0±3.2	14.7	15	15

由表 1 可见,由几种方法计算得到的灯塔 $M_s 5.1$ 地震震源深度收敛性很好,约为 14km。几种方法标准差的计算也显示出较好的收敛性。但 sPL-Pg 法得出的深度要明显小于其它方法。由于灯塔地区地处辽河平原,属于沉积地区,灯塔地震的 sPL 震相由多个震相组合而成,且 sPL、Pg 的波包均变宽,影响了震相到时的精确判断(郑勇等,2017),这可能是导致该方法结果偏低的原因。表 1 的结果明显大于辽宁区域台网给出的 6km 和中国地震台网中心给出的 10km。这可能是由于发布的震源深度往往是矩心深度,而本文采用波形方法得到的为初始深度所致。

2 辽宁及周边地区 $M_L \geq 5.0$ 地震震源深度分布

我们查询了 1970~2012 年辽宁 $M_L \geq 5.0$ 地震目录,并将重新计算的灯塔地震参数附在其中,目录(国际时)取自国家地震科学数据共享中心网站和辽宁地震目录(辽宁省地震局,1995)(表 2)。

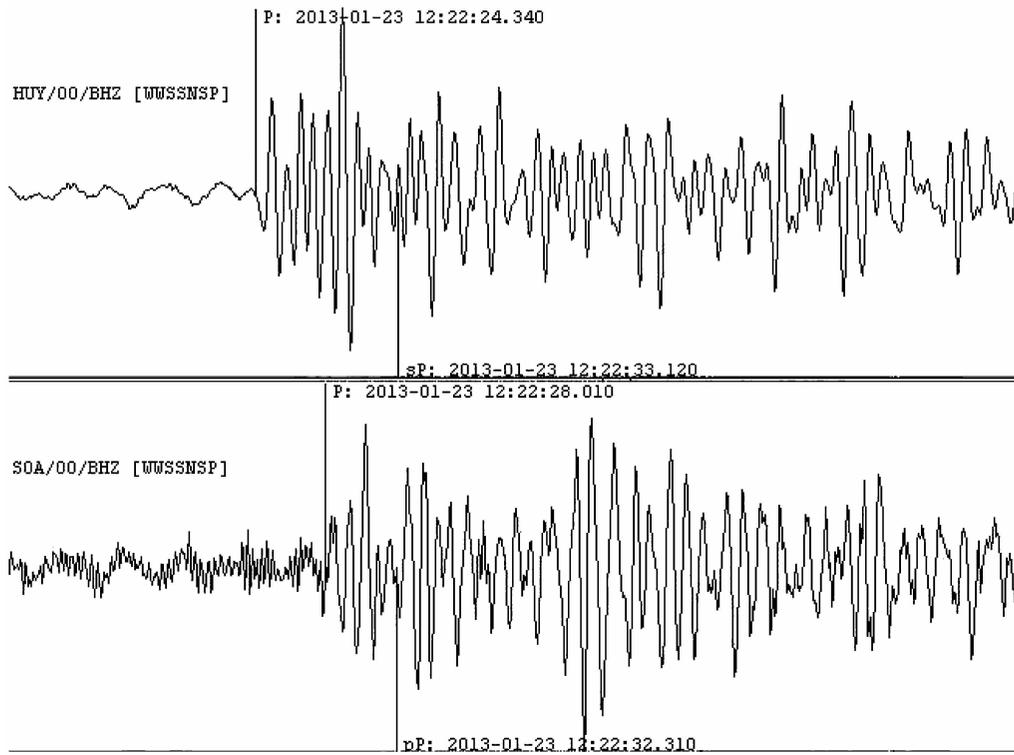


图9 松潘台、湟源台 UD 向仿 WNSP 记录

表 2 1970 年以来辽宁 $M_L \geq 5.0$ 地震目录

日期 (年-月-日)	时刻 (时:分:秒)	北纬/(°)	东经/(°)	深度/km	M_L	参考地点
1970-01-25	16:55:42	39.47	123.07	—	5.0	大王家岛
1974-12-22	04:36:18	41.27	123.60	6	5.2	本溪蓁窝水库
1975-02-04	11:36:04	40.70	122.70	16	7.4	海城
1975-02-04	11:37:00	40.67	122.65	—	5.6	营口-海城地区
1975-02-04	11:42:00	40.67	122.65	—	5.4	营口-海城地区
1975-02-04	13:32:34	40.70	122.50	20	5.8	海城
1975-02-05	21:43:40	40.60	122.90	20	5.6	海城
1975-02-06	04:24:53	40.80	122.80	20	5.7	海城
1975-02-15	13:08:03	40.70	122.70	12	5.7	海城
1975-02-16	14:01:21	40.70	122.50	11	5.7	海城
1975-04-09	19:55:37	40.70	122.50	10	5.0	海城
1977-06-05	04:37:57	41.95	121.30	18	5.1	阜新
1978-05-18	12:33:34	40.60	122.60	13	6.2	海城
1978-05-20	06:01:47	40.70	122.50	15	5.6	海城
1980-01-07	23:44:25	40.26	125.11	18	5.7	中朝边境
1981-08-12	03:43:11	40.68	122.67	9	5.1	海城
1988-02-25	05:59:27	42.40	122.51	26	5.0	彰武
1999-11-29	04:10:39	40.53	123.15	7	5.3	岫岩
2000-01-11	23:43:57	40.58	123.00	9	5.4	岫岩-海城间
2013-01-23	04:18:15	41.50	123.20	14	5.3	灯塔

由表 2 可见, 3 次地震无法在目录中查询到深度; 1975 年 2 月 4 日海城 $M_L 7.4$ 地震后最初的几次余震受主震的影响, 目录中给出的参数普遍精度很低, 其 20km 的震源深度应为粗略值。其余的地震震源深度则表现出较好的统计规律, 主要表现为:

(1) 辽宁西部、东部地区震源较深, 均大于 18km;

(2) 辽宁中部地区震源相对较浅, 均小于 16km;

(3) 辽宁中部地区, 偏南的岫岩地区震源较浅, 均小于 10km; 而偏北的海城地区震源相对偏深, 为 10~16km。灯塔地震震源深度与海城地区的相当。

3 讨论与结论

我们分别采用视入射角法、sPL-Pg 法、sPn-Pn 法、sPb-Pb 法、单纯形法、pP-P 法、sP-P 法计算了灯塔地震震源深度, 结果约为 14km, 略大于中国地震台网中心目录给出的 10km。1970 年以来辽宁 $M_L \geq 5.0$ 地震震源深度分布存在统计规律, 具体表现为西部与东部地区偏深, 中部偏浅; 而中部地区震源深度则存在南浅北深的分布态势, 灯塔地震震源深度也符合该统计规律。

辽宁地区 $M_L \geq 5.0$ 地震震源深度分布统计规律与辽宁地区地质结构间存在对应关系。前人的研究指出, 辽宁地区地壳在辽河平原地区较薄, 为 31~32km, 而在东西两侧的山地和隆起地带的地壳较厚, 为 32~36km, 平均约为 33km (贾丽华等, 2010)。震源深度是直接影响灾情的重要因素之一。因此, 基于上述统计规律, 在辽宁地区可基于震中位置迅速初步判断震源深度, 从而在最短时间内为开展地震应急工作提供参考。

由于本文的讨论是基于 IASPEI91 模型提供的波速以及康拉德界面、莫霍界面无起伏等理想状态, 因此计算结果可能与实际情况有偏差。利用 sPn、sPb 到时计算得到的震源深度有差异, 且利用 sPb 到时计算的标准差也是几种方法中最大的, 这说明辽宁地区康拉德界面上下波速变化与 IASPEI91 模型间存在微小差异, 因此, 可在未来工作中利用更多中强地震修正辽宁地区康拉德界面上下波速模型。由于受台网建设规模、模拟记录的局限性等因素的影响, 目录中早期地震的震源深度也可能与实际不符, 因此, 应进一步确定目录中各个地震的震源深度, 以确认前述讨论中辽宁地区 $M_L \geq 5.0$ 地震震源深度分布规律的可靠性。

致谢: 中国地震局地球物理研究所国家测震台网数据备份中心 (doi: 10.11998/SeisDmc/SN)、北京数字遥测地震台网、中国地震台网中心和安徽、河南、河北、黑龙江、吉林、江苏、辽宁、内蒙古、青海、四川、山东地震台网为本研究提供地震波形数据。

参考文献

- 陈学忠、吕坚、王慧敏, 2008, 2005 年 11 月 26 日江西九江-瑞昌 $M_s 5.7$ 地震序列的破裂过程研究, 地震, **28**(1), 100~106.
- 崇加军、倪四道、曾祥方, 2010, sPL, 一个近距离确定震源深度的震相, 地球物理学报, **53**(11), 2620~2630.
- 黄建平、倪四道、傅容珊等, 2009, 综合近震及远震波形反演 2006 文安地震 ($M_w 5.1$) 的震源机制解, 地球物理学报, **52**(1), 120~130.
- 贾丽华、崇加军、刘渊源等, 2010, 利用远震接收函数研究辽宁地区的地壳厚度及泊松比, 地震地质, **32**(2), 260~268.
- 辽宁省地震局, 1995, 辽宁省地震目录, 沈阳: 辽宁大学出版社.
- 刘芳, 2010, 用 sPn 震相计算内蒙古地震震源深度, 大地测量与地球动力学, **30**(增刊 II), 14~17.
- 吕坚、倪四道、沈小七等, 2007, 九江-瑞昌地震的精确定位及其发震构造初探, 中国地震, **23**(2), 166~174.

- 吕坚、郑勇、倪四道等,2008,2005年11月26日九江-瑞昌 $M_S5.7$ 、 $M_S4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究,地球物理学报, **51**(1),158~164.
- 任克新、邹立晔、刘瑞丰等,2004,用 sPn 计算内蒙地震的震源深度,地震地磁观测与研究, **25**(3),24~31.
- 王伟涛、倪四道、罗艳等,2009,文安地震深度的精确测定及其同华北地壳低速层的关系,见:中国地球物理学会,中国地球物理·2009,合肥:中国科学技术大学出版社.
- 王新岭、张国民、马宏生等,2004,用 PTD 方法测定巴林左旗 5.9 级地震震源深度,地震, **24**(4),51~56.
- 张爱萍、倪四道、杨晓勇,2008,2004 年东乌珠穆沁旗地震震源参数研究,地震, **28**(3),61~68.
- 张小涛、吕坚、马广庆等,2006,九江-瑞昌地震序列的波速比特征研究,华北地震科学, **24**(4),36~40.
- 郑秀芬、欧阳飏、张东宁等,2009,“国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑,地球物理学报, **52**(5),1412~1417.
- 郑勇、谢祖军,2017,地震震源深度定位研究的现状与展望,地震研究, **40**(2),167~175.
- 郑钊、赵里、陈棋福等,2009,2006 年文安 $M_w4.9$ 地震的有限震源波形模拟研究,地球物理学报, **52**(4),976~982.

Focal Depth Analysis about the Dengta $M_S5.1$ Earthquake in Liaoning

Xie Hongzhen¹⁾ Wang Jiuyang²⁾

1) Beijing Earthquake Agency, Beijing 100080, China

2) Dalian Seismic Station, Dalian 116012, Liaoning, China

Abstract In this paper, the focal depth is calculated by the incident angle, sPL-Pg (etc), respectively in different epicentral distances, and by the simplex algorithm with the waves which are recorded by Liaoning Digital Seismic Network. The result shows that the focal depth should be about 14km, slightly deeper than 10km which is provided by the catalogue. The result is also suggested by SC/SOA and QH/HUY's waves, both being the distance seismic stations for the Dengta earthquake. The focal depths of earthquakes larger than $M_L5.0$ in Liaoning Province since 1970 follow a statistical pattern in distribution; deeper in eastern and western sides, shallower in middle zone, the southern of middle zone are shallower and the northern are deeper. The focal depth of the Dengta earthquake is consistent with this statistical pattern. This statistical pattern is of guiding significance to judge the disaster and to carry out emergency work.

Key words: Focal depth; Moho interface; Conrad interface; Focal depth distribution