

利用重测定的震源深度特征探讨 2013 年吉林前郭 5.8 级震群发震因素^{*}

刘双庆¹, 薛艳², 蔡宏雷³, 谢静¹

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045; 3. 吉林省地震局, 吉林 长春 130117)

摘要: 利用 Pn-Pg 震相组合的局部搜索法, 采用 5 种地壳速度模型对 2013 年吉林前郭 5.8 级地震震群进行震源深度测定。计算结果显示, 5 种结果的震源深度的主要分布特征相似。对选取的 32 个地震震源深度进行重新测定, 结果最小为 6 km, 最大 14 km, 主要集中在 10 km 左右, 系统深度偏差约 1.74 km, 震源深度分辨率约 1.58 km, 重定位后地震震中优势分布呈北西向。与当地的沉积层厚度分布对比, 这些地震最有可能发生在盆地基底的基岩顶层, 而不在油气圈闭的沉积盖层内, 并且地震震群分布走向与通榆—长春断裂走向相一致。结合该地区的历史地震活动与构造关系, 最后推测这些地震与北西向的通榆—长春断裂构造运动密切相关, 而不是油田作业的直接产物。

关键词: 震源深度; Pn-Pg 算法; 定位精度; 油田作业; 构造运动; 前郭震群

中图分类号: P315.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)02-0211-10

0 引言

据《大金国志》记载, 公元 1119 年 2 月 19 日~3 月 19 日, 在吉林省前郭卡拉木地区曾发生过一次强烈地震, 经计算分析和综合考证, 其震级为 6 $\frac{3}{4}$, 烈度长轴为北西向 (唐雅芝, 1990)。另据周本刚和高名修 (1992) 不完全统计, 在松辽盆地距离前郭县 250 km 范围内, 历史上至少发生过 5 次 $M \geq 6$ 的地震, 分别是 1119 年前郭 $M6\frac{3}{4}$ 地震、1940 年通辽 $M6.0$ 地震、1941 年绥化 $M6.0$ 地震、1942 年通辽 $M6.0$ 地震和 1942 年绥化 $M6.0$ 地震。2006 年 3 月 31 日吉林乾安—前郭还发生了一次 $M5.0$ 地震, 是 1967~2006 年吉林省发生的最大地震, 通过 75 个现场宏观烈度考察点的结果, 显示该次地震的烈度长轴方向也是北西向 (盘晓东等, 2007)。2013 年 10 月 31 日吉林前郭发生了 $M5.5$ 和 $M5.0$ 地震后, 于 11 月 22、23 日又发生了 $M5.3$ 、 $M5.8$ 和 $M5.0$ 地震, 期间还有不少小震事件。地震发生后, 一些科研院所所在应急工作阶段给出了部分中强震的震源深度, 初步结果为 5 km 左右, 通过这个深度特征认为这些地震可能

与该地区的采油作业有关。由于前郭地区位于松辽盆地中部, 在第二松花江断裂 (图 1) 北侧就是大庆油田采油区。而一些地震勘探资料显示, 乾安地区的采油井深度多在 3 800 m 左右 (高金哲等, 2013)。这些地震是否归因于采油作业的影响, 其深度定位的绝对值与精度对结论有决定性作用。由于松辽盆地第四纪沉积比较薄, 厚约 75~200 m (裘善文等, 2012), 而作为我国中生代陆相大型沉积盆地, 沉积面积居第三位, 其中白垩系沉积厚度大于 7 000 m (杨令宾, 1995), 部分测线显示最大沉积平均厚度 6 093 m, 考虑地表剥蚀效应后求得沉积物最大平均总厚度及基底总沉积量为 7 928.58 m (胡望水等, 2005), 因此过浅的地震震源深度是值得怀疑的。

本文将利用地壳内的直达波震相 Pg 和沿 Moho 面滑移的首波 Pn 进行震相组合, 重新测定 2013 年前郭震群进行初始破裂点深度。这种 Pn-Pg 组合方法发挥了这两个震相的离源射线上下反向而对震源深度变化更为敏感, 以及初至震相到时提取精度高的双重优点。本文进一步利用初始定位的震中位置, 在震中附近采用局部搜索法, 以获取 Pn-Pg 最小走时残差的震源深度和震中位置, 并

^{*} 收稿日期: 2014-04-27.

基金项目: 中国地震局星火计划项目 (XH14002Y)、测震骨干青年专项 (20130202)、震情跟踪专项 (2014010504) 和天津市国土局项目 (1212011220232-5) 联合资助。

对不同速度模型的结果进行讨论, 以此给出前郭震群比较合理的震源深度分布特征。

1 区域构造特征及 Pn - Pg 局部搜索法

1.1 前郭地区局部地质构造

前郭地区位于松辽盆地中部, 松辽盆地产生于燕山运动时期, 从晚侏罗世到新生代, 盆地经历了裂谷型断陷、大型拗陷和萎缩上升阶段, 它是一个大型中新代陆相沉积盆地 (胡望水等, 2005)。喜山运动的三次运动幕在松辽盆地都有表现。第一、三幕运动主要受印度板块影响, 产生的区域主压应力为 NE—SW 向, 第二幕运动主要受太平洋板块影响, 产生的区域主压应力方向为 NW-SE 或近东西向。在卫星遥感图像上可以地看到, 盆地在喜山第二运动幕中产生了系列轻微的 NW 向构造形迹线。而全新世以来, 盆地内的江河流向与湖沼分布都受到了 NW 向构造线性体的控制, 如大庆油田及邻区地表的湖泡展布, 这些线性体时隐时现地切过了大庆长垣表层第四系。在扶余幅卫星图像上, 不仅可以看到乾安周缘大大小小星罗棋布的湖泡呈 NW 向串珠状排列, 还可以看到靠近农安附近呈 NW 向展布的波罗泡群及其一带的全新统 Q₄ 沉积, 切割并覆盖了盆地东南隆起区中的 NE 向构造群。在通榆幅卫片上, 还可以解译出 NW 向的构造线性体, 斜穿了 NE 向弧形构造带, 可见其形成时间最晚 (祁林等, 1992)。

对现今或喜山三幕区域应力场表现最为敏感和直观的就是近代地震。垂直于 NE—SW 区域主压应力作用方向发育的 NW 向构造线和断裂面, 是地应力不断积累的地带。刘天革和隋红 (1985) 统计东北地区历史地震活动的研究结果得出, 整个东北地区共记载有 60 多次 $M \geq 4$ 地震, 其中 32 次是沿着 NW 方向迁移发震或成对出现。其余 20 多次则发生在 NW 向断裂与 NE 向断裂的交切点上。这些强震的特点是余震分布往往呈 NW 向展布, 等震线形状往往呈 NE、NW 双轴型。显然, 东北地区发震机制是由于 NW 向断裂应力积累而活动, 或者是由此诱发了 NE 向断裂共同参与活动而发震。而位于松辽盆地南部地区的乾安油田, 油田周围所有的泡子都逐渐干涸或消亡, 说明该 NW 向新构造圈闭仍处于隆起状态中 (祁林等, 1992)。

在本次地震震群地区, 分布着通榆—长春断

裂、双山—前郭断裂、大安—都德断裂、第二松花江断裂以及其他邻近断裂体系 (图 1)。图 1 中虚线框里的断裂分布抽取自盘晓东等 (2007)。其中通榆—长春断裂为一条隐伏断裂, 断裂切过 Moho 面, 是控制中央凹陷带南部长岭凹陷的两个次级凹陷 (即乾安次凹陷和黑帝庙次凹陷) 的分界断裂。由于第四纪以来的多次活动, 导致沿通榆—长岭—怀德一线出现了一个活动构造地貌单元, 即松辽分水岭, 形成了北部区的松花江水系与南部区的辽河水系。而大安—都德断裂沿 NNE 向从吉林省的大安一带向北到黑龙江省的都德一带, 主要活动时期为中侏罗世到白垩纪及晚更新世末期, 全新世以来也表现出较强的活动性。2005 年 7 月 25 日发生于黑龙江省林甸 5.1 级地震就与该断裂的活动有关。2006 年 3 月 31 日乾安—前郭 5.0 级地震则发生在这两条断裂的交汇部位 (盘晓东等, 2007)。

1.2 Pn - Pg 局部搜索法

Pn - Pg 深度定位方法由朱元清和石耀霖 (1990) 提出。本文从走时方程的角度, 解析地给出 Pn、Pg 震相组合相对 Pg、Sg 震相组合, 其提高震源深度变化对走时差异影响的效果。为简化理论推导, 考虑一层地壳模型, 假定震中距为 Δ , 震源深度为 h , T_0 、 T_{Pg} 、 T_{Pn} 分别是直达波、P 波和首波的到时, 则走时方程有

$$t_{Pg} = T_{Pg} - T_0 = \sqrt{\Delta^2 + h^2} / V_{Pg}, \quad (1)$$

$$t_{Pn} = T_{Pn} - T_0 = \frac{\Delta}{V_{Pn}} + \frac{2H - h}{V'}. \quad (2)$$

式中: H 为 Moho 面深度, $V' = V_{Pg} V_{Pn} / \sqrt{V_{Pn}^2 - V_{Pg}^2}$, 将 (1) 式的 Pg 换为 Sg 即为直达 S 波走时方程。对三个震相的走时方程分别求关于 h 的偏导数, 并将求导结果相减, 可得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_{Pn} / \partial h - \partial t_{Pg} / \partial h}{\partial t_{Sg} / \partial h - \partial t_{Pg} / \partial h} &= \frac{\partial t_{Pn} - \partial t_{Pg}}{\partial t_{Sg} - \partial t_{Pg}} \\ &= \frac{W / V_{Pg} + 1 / V'}{W (V_{Pg} - V_{Sg}) / (V_{Pg} V_{Sg})}. \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $W = h / \sqrt{\Delta^2 + h^2}$, 式 (3) 反映了在震中距 Δ , 震源深度 h 处, 震源深度出现微小变化 Δh 时, 首波与直达 P 波, 直达 P 波与直达 S 波的到时差的

变化比值，此处称之为灵敏度 κ ，其值与震中距 Δ ，震源深度 h 有关。

参考华南走时表，假定 $V_{Pg} = 1.73V_{Sg} = 6.01 \text{ km/s}$ ， $V_{Pn} = 7.98 \text{ km/s}$ ，则典型 κ 值见表 1。从表 1 中可以看出，用 Pn、Pg 震相组合相对 Pg、Sg 震相组

合，深度变化对两者走时差的影响在 2 倍以上，对于 Pn 处于盲区的情形，可以通过沿 Moho 面滑移来处理（朱元清，石耀霖，1990）。震源深度越浅震中距越大，本文的震相组合方法对深度变化的敏感性更大。

表 1 不同震中距不同深度时的灵敏度 κ 分布
Tab. 1 Distribution of sensitivity κ in different epicenter distance and focal depth

h/km	Δ/km									
	0.1	10	20	30	40	50	80	100	150	200
0.1	2.644	91.49	181.6	271.7	361.8	451.9	722.3	902.5	1353.1	1803.7
5	2.271	3.384	5.085	6.851	8.635	10.42	15.81	19.41	28.42	37.42
10	2.271	2.644	3.384	4.219	5.085	5.965	8.635	10.42	14.91	19.41
15	2.271	2.452	2.871	3.384	3.936	4.506	6.259	7.445	10.42	13.41
20	2.271	2.377	2.644	2.994	3.384	3.796	5.085	5.965	8.188	10.42
25	2.271	2.340	2.523	2.777	3.070	3.384	4.391	5.085	6.851	8.635
30	2.271	2.319	2.452	2.644	2.871	3.121	3.936	4.506	5.965	7.445

而 Pn - Pg 震相组合方法的深度误差估计，推导如下：

当 $\Delta \gg h$ 时，式（2）与式（1）相减，得

$$h = 2H - \frac{V'}{V''}\Delta + V'(T_{Pg} - T_{Pn})$$
$$\sigma_h^2 = 4\sigma_H^2 + \left(\frac{V'}{V''}\right)^2 \sigma_\Delta^2 + (V')^2 (\sigma_{T_{Pg}}^2 + \sigma_{T_{Pn}}^2) \quad (4)$$
$$= 4\sigma_H^2 + \left(\frac{V'}{V''}\right)^2 \sigma_\Delta^2 + (V')^2 (\sigma_{T_{Pg}}^2 + \sigma_{T_{Pn}}^2)$$

其中 $V'' = V_{Pg} V_{Pn} / (V_{Pn} - V_{Pg})$ 。对于本文假定 Moho 面深度误差 0.8 km，Pn、Pg 震相到时识别误差 0.1 s，震中误差 1 km，则震源深度计算误差：

$$\sigma_h = \sqrt{2.56 + \left(\frac{V'}{V''}\right)^2 + 0.02 \times (V')^2} = 2.091 \text{ km.} \quad (5)$$

如果震中距较小，可以直接采用直达 P 波计算深度的误差估计（傅淑芳，刘宝诚，1980）：

$$\sigma_h^2 = 1 + 2 \left(\frac{\Delta}{h}\right)^2. \quad (6)$$

本文利用该方法进行深度定位。考虑吉林省地震局人员在应急编目过程中，因时间仓促等因素可能影响震相拾取精度，以及地震震中定位的误差影响，本文对初至信噪比较高的附录表中的地震逐一进行了 Pg、Pn 震相重新识别，并结合 100 km

以内的直达剪切波 Sg 震相，利用中国地震局推广使用的 MSDP 软件中的单纯形法进行重新定位（速度模型为华南走时表），并将该定位震中结果作为搜索参考点。搜索过程取参考点水平面 $\pm 0.2^\circ$ 范围，步长 0.01° ，深度取 0 ~ 30 km，步长 1 km，即 52 111 个三维网格点。计算每个网格点到每个台站的 Pg、Pn 理论走时，并与台站人工提取的 Pg、Pn 走时进行差值比较，单个网格点的走时残差定义如下：

$$T_{\text{residual}} = \frac{1}{MN} \sum_i^M \sum_j^N |(Pn_j^* - Pg_i^*) - (Pn_j^{\wedge} - Pg_i^{\wedge})|. \quad (7)$$

式（7）中上标带“*”为理论计算走时，带“^”为人工提取的到时所对应的儒略数时间。对于同台同时提取了 Pn、Pg 震相时，只取 Pn 震相。 N 为震中距 500 km 内 Pn 震相数， M 为扣除了同台 Pn 重复条件后的 Pg 震相数。

将每个网格点的走时进行对比，可以获取到最小走时残差的网格点的走时、经纬度和深度值。虽然经纬度精度只有 2 位小数点，深度值只精确到整数，但已是本方法的精度限，而这个精度已能为本文的后续分析给予足够好的支持。对于 2013 年 12 月 8 日前郭 $M_s 3.1$ 地震，其分析所用到的流动台站和遥测台网台站分布如图 1 所示。沿图 1 中震中位置两侧及垂向方向进行局部网格化，计算

出各节点的走时残差,其切片如图 2a 所示。可见其走时残差分布呈近似椭球状,椭球中心点残差

最小。但受速度模型分层(本例采用模型 d)的影响,椭球是分层连续的。

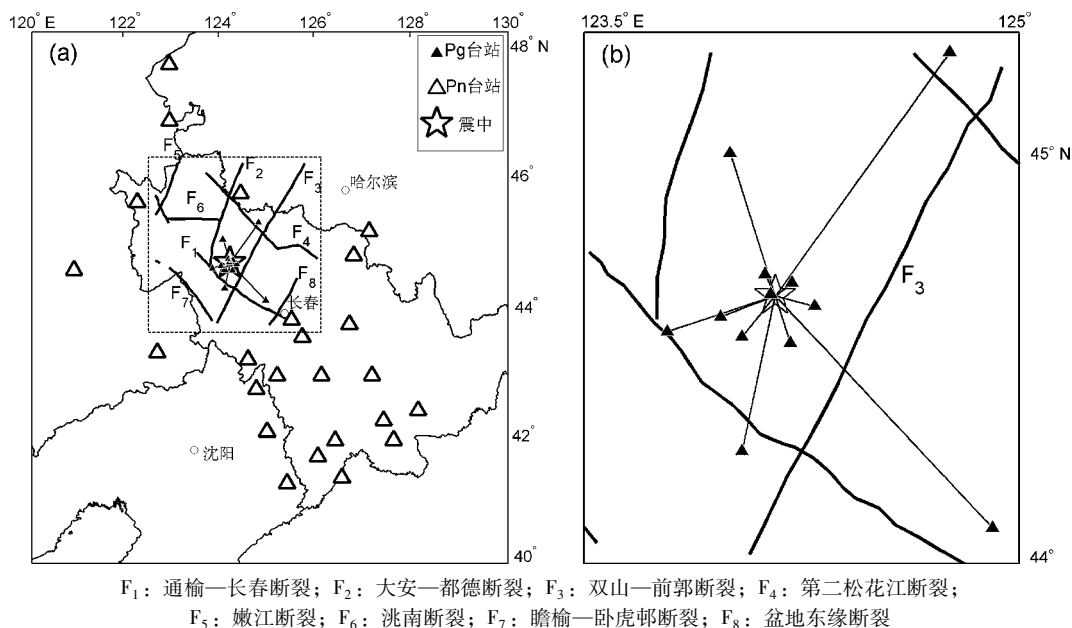


图 1 2013 年 12 月 8 日前郭 $M_{5.1}$ 地震震中分布 (a) 及局部放大图 (b)

Fig. 1 Epicenter distribution of Qianguo $M_{5.1}$ earthquake on Dec. 8, 2013 (a) and the partial enlarged drawing of dotted rectangle in Fig. 1a (b)

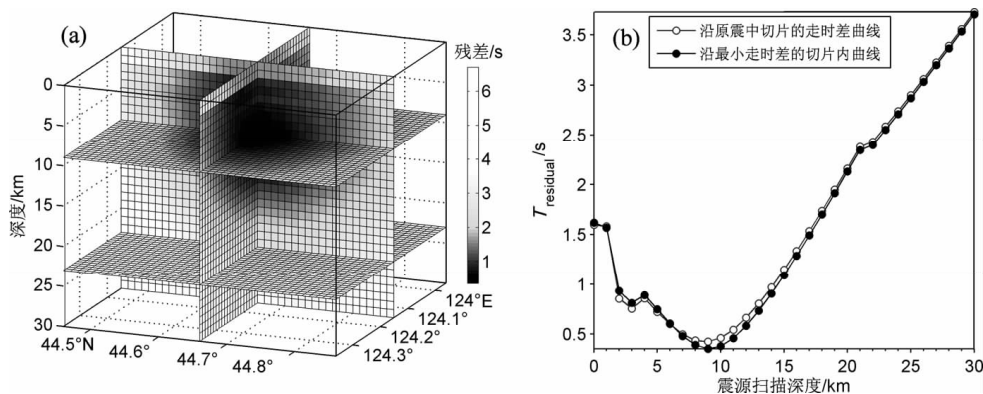


图 2 2013 年 12 月 8 日前郭 $M_{5.1}$ 地震走时残差空间切片图

(a) 震中区局部网格的走时残差三维切片; (b) 沿原震中位置和沿最小值点处的不同深度残差曲线

Fig. 2 Slice of travel time residuals of Qianguo $M_{5.1}$ earthquake on Dec. 8, 2013

(a) 3D slice of travel time residual in local calculation nodes in the epicenter area; (b) residual changes in different depth at the positions of initialized epicenter and with minimum travel-time residual

2 前郭震群的地震深度测定及其精度分析

2.1 前郭震群的地震深度测定

本文处理了 2013 年 10 月 31 ~ 12 月 27 日前郭地震序列波形资料,由于方法的限制,只拾取至少有一个 Pn 震相清楚的地震地震事件,

总共获取了 32 个满足条件的地震事件(表 2)。极少量台站(如 SYZT 台)存在 GPS 时钟对时不准的问题。对 32 个满足条件的地震沿震中距作 Pg、Pn 震相时距散点图(图 3),显示绝大多数没有显著的 GPS 时钟差异问题,所以只剔除了个别有问题台站的震相,走时点状图不完全符合和达理论走时曲线,其原因可能与地壳各向异性有关。

表 2 本文采用的地壳 P 波速度模型
Tab. 2 P-wave crustal velocity model used in this paper

模型 a (华南模型)		模型 b		模型 c		模型 d		模型 e		模型 f	
层厚/km	波速/km·s ⁻¹	层厚/km	波速/km·s ⁻¹	层厚/km	波速/km·s ⁻¹	层厚/km	波速/km·s ⁻¹	层厚/km	波速/km·s ⁻¹	层厚/km	波速/km·s ⁻¹
21.4	6.01	1	4.2	21	6.01	1	4.2	1	5.5	21	6.01
11	6.88	2	5.3	15	6.88	2	5.3	20	6.12	13	6.88
+ ∞	7.98	18	6.06	+ ∞	7.98	18	6.06	13	6.70	+ ∞	7.98
		15	6.94			13	6.94	+ ∞	7.98		
		+ ∞	7.98			+ ∞	7.98				

表 3 3 种定位的结果对比
Tab. 3 Comparison of three location results

ID	时间		模型 a(MSDP)				模型 d				模型 f			
	年-月-日	时:分:秒	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	M_S	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	残差	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	深度/km	残差
1	2013-10-31	11:3:35.1	44.641	124.081	7.5	5.5	44.65	124.11	10	0.444	44.65	124.11	11	0.459
2	2013-10-31	11:10:7.1	44.646	124.09	6.7	5.0	44.67	124.1	8	0.513	44.67	124.1	10	0.551
3	2013-10-31	14:13:45.8	44.636	124.15	7.3	3.6	44.64	124.17	10	0.254	44.64	124.17	11	0.26
4	2013-10-31	18:16:22.2	44.649	124.15	8.4	3.2	44.66	124.15	11	0.220	44.66	124.15	12	0.227
5	2013-10-31	19:34:49.7	44.659	124.08	10.7	3.4	44.67	124.13	10	0.301	44.67	124.13	11	0.311
6	2013-11-01	10:24:41.2	44.647	124.15	8.9	3.0	44.65	124.17	10	0.309	44.65	124.17	12	0.313
7	2013-11-03	12:26:53.1	44.64	124.103	5.4	4.5	44.65	124.12	8	0.257	44.65	124.12	9	0.263
(8)	2013-11-03	23:43:50.6	44.679	124.118	7.8	3.0	44.68	124.11	9	0.383	44.68	124.11	10	0.419
9	2013-11-04	3:17:25.1	44.635	124.107	3.9	4.2	44.65	124.12	8	0.468	44.65	124.12	10	0.488
(10)	2013-11-05	13:38:10.8	44.683	124.146	6.7	2.3	44.68	124.13	6	0.476	44.69	124.14	6	0.489
(11)	2013-11-06	8:46:36.5	44.652	124.126	6.6	3.1	44.67	124.12	9	0.378	44.67	124.12	10	0.405
(12)	2013-11-08	19:37:19.5	44.645	124.138	8.7	4.4	44.66	124.14	9	0.364	44.66	124.14	10	0.401
(13)	2013-11-19	13:32:46.6	44.659	124.12	8	3.4	44.67	124.14	9	0.373	44.67	124.14	10	0.406
14	2013-11-22	16:18:50.0	44.65	124.129	9.2	5.3	44.66	124.14	10	0.322	44.66	124.13	11	0.327
(15)	2013-11-22	16:43:34.4	44.643	124.13	6.3	3.0	44.65	124.16	10	0.341	44.65	124.16	10	0.385
(16)	2013-11-22	16:48:6.1	44.674	124.165	8	2.0	44.66	124.13	10	0.292	44.66	124.13	11	0.336
(17)	2013-11-22	21:22:20.9	43.991	125.65	6.9	2.1	43.98	125.63	9	0.626	43.98	125.63	10	0.622
18	2013-11-23	6:4:25.5	44.631	124.122	8.4	5.8	44.63	124.14	11	0.410	44.63	124.14	12	0.411
19	2013-11-23	6:32:32.4	44.623	124.142	7.8	5.0	44.64	124.17	10	0.320	44.64	124.17	11	0.327
(20)	2013-11-23	10:11:2.8	44.632	124.153	6.6	3.0	44.65	124.15	9	0.295	44.65	124.15	10	0.333
(21)	2013-11-23	18:38:35.9	44.665	124.117	8.3	3.3	44.67	124.13	10	0.426	44.67	124.13	10	0.455
22	2013-11-25	22:9:42.0	44.673	124.113	9.2	4.0	44.67	124.14	9	0.588	44.67	124.14	10	0.610
(23)	2013-11-28	7:40:9.2	44.681	124.143	8.2	3.1	44.67	124.14	9	0.383	44.67	124.14	10	0.404
(24)	2013-11-29	15:55:32.6	44.676	124.156	6.3	1.8	44.65	124.16	9	0.188	44.66	124.17	9	0.237
(25)	2013-12-04	10:29:4.1	44.678	124.131	5.2	2.0	44.65	124.14	9	0.374	44.65	124.14	10	0.411
(26)	2013-12-08	0:5:32.2	44.659	124.159	8.8	3.1	44.66	124.15	9	0.352	44.66	124.15	10	0.389
(27)	2013-12-08	13:1:11.5	44.663	124.17	8.9	4.3	44.67	124.16	10	0.378	44.67	124.17	10	0.392
(28)	2013-12-09	19:56:36.3	44.655	124.177	8.3	2.1	44.65	124.15	9	0.301	44.65	124.16	9	0.327
(29)	2013-12-10	0:9:2.5	44.659	124.201	5.1	2.0	44.67	124.18	6	0.502	44.67	124.18	7	0.512
(30)	2013-12-13	8:59:33.6	44.687	124.145	6.4	1.9	44.67	124.14	8	0.239	44.67	124.14	9	0.251
(31)	2013-12-23	16:45:59.9	44.669	124.184	7.9	2.0	44.67	124.17	8	0.359	44.67	124.18	8	0.342
(32)	2013-12-27	19:28:42.2	44.642	124.191	8.3	1.7	44.64	124.18	10	0.259	44.64	124.18	10	0.309

注：本表经纬度由作者逐一拾取震相重定位的结果，可能与国家台网中心公布的结果略有差异。对外以国家台网公布结果为准。

在地震定位结果中,地壳速度模型会对结果有较大的影响。由于大庆地区石油物探剖面较多,可以为本文提供参考。刘洋等(2008)给出的大庆地区上地壳 P 波速度显示,在地表 3 km 以下,速度剖面大多数超过 4.5 km/s。松辽盆地及其南北延展地区是一个 Moho 面拱起带,它由 3 个上地幔隆起组成,走向北东 20° 左右,地壳厚 29 ~ 33 km,其东西两面的地壳厚度在 35 km 以上(程学儒,1982)。松辽盆地东北隆起区 Moho 界面双程反射旅行时变化范围为 9.6 ~ 11.0 s,深度范围为 30 ~ 34 km(杨宝俊等,2003)。在松辽平原形成过程中,白垩系沉积物起着重要作用。如果以各地质时代地层厚度占中生代地层总厚度的百分

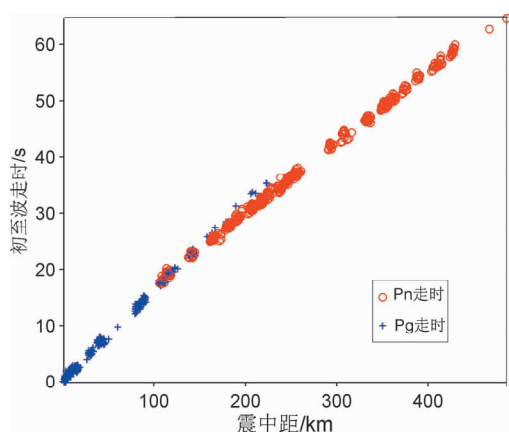


图3 震相走时—震中距散点分布

Fig. 3 Scatter distribution diagram of phase travel time varied with distance

比作为沉积物在平原形成过程中的贡献率,则白垩系沉积物贡献率达 86.37%,第三系为 7.85%,第四系为 5.78%(杨令宾,1995),这种成分上的比例也为速度模型提供约束。东部张广才岭段的地壳厚于盆地,为 34 ~ 37 km,上地壳厚 14 ~ 15 km,以中酸性酸性岩石为主, V_p 为 6.02 km/s;中地壳较薄 5.5 ~ 7 km,以中酸性成分的变质岩为主, V_p 为 6.5 km/s;下地壳 11 ~ 15 km,以基性成分的变质岩为主, V_p 为 6.85 km/s。盆地内盖层结构较简单,速度随深度递增, 4.75 ~ 5.25 km/s, Moho 面速度 8.00 km/s(傅维洲等,1998)。对比华南广东地区与松辽盆地的 Moho 面深度分布(滕吉文,曾融生,2002),发现二者相差较小,松辽盆地略深约 1 km。因此,在参考华南走时表模型的基础上,给出了另外 5 种地壳速度分层模型(表 2、图 4),其中模型 b、d、e 含有地表低速层。

通过 6 种速度模型(表 3 中计算 32 个地震震源深度),模型 a、模型 d、模型 f 的结果见表 3。其他 3 种情况的结果,考虑篇幅的限制,仅将结果绘于图 5、6。图 5、6 显示:① MSDP 的单纯形法给出的结果相对偏浅;② 模型加入地表低速层后,深度值系统性偏浅约 1 km;③ Moho 面加深后,深度值系统性偏深约 1 km;④ 增加了地表低速层后,大多数情况可降低走时残差,特别是 7 个流动台震相加入定位的情况更为明显(表 3 中加圆括号的 ID 号事件)。但如果进一步增加盖层厚度并降低盖层的 P 波速度,则残差变大。

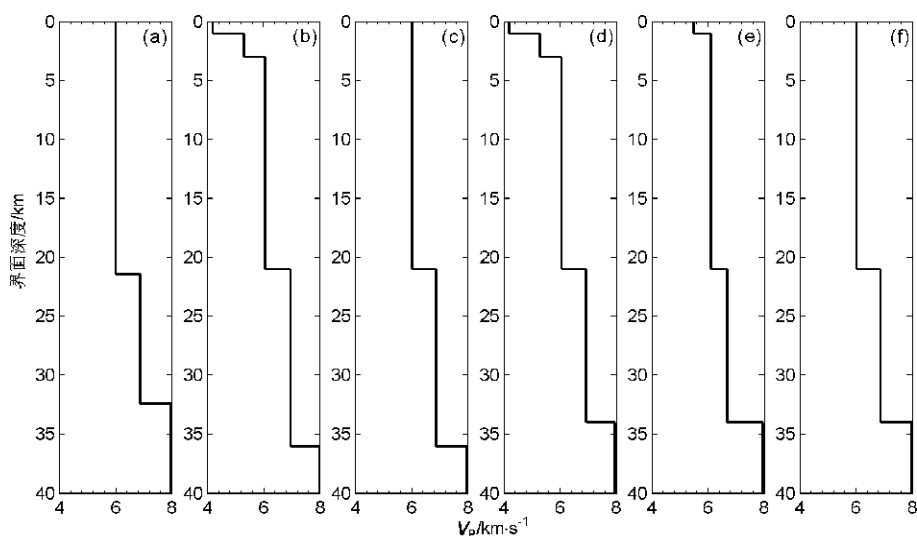


图4 地壳速度模型深度变化曲线

Fig. 4 Curve of depth change of crustal velocity models

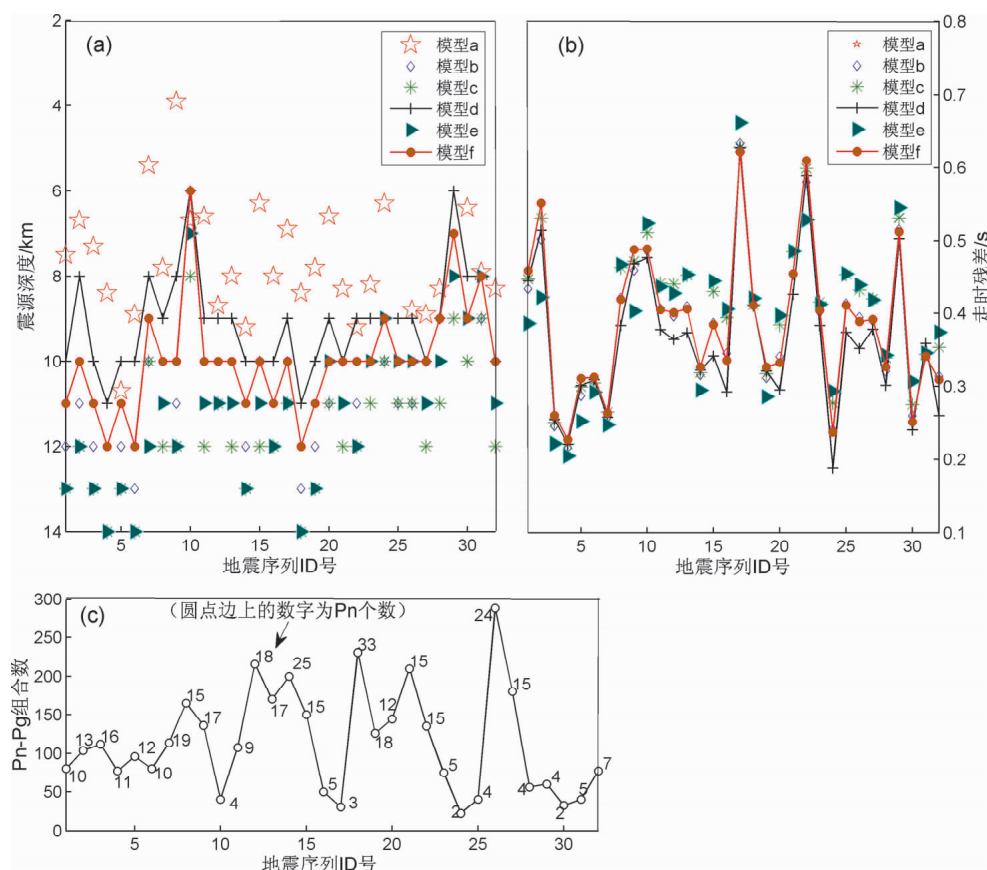


图5 不同速度模型给出的32个地震震源深度分布(a)、走时残差分布(b)与深度测定的Pn-Pg对数(c)

Fig. 5 Distribution of focal depth (a) and travel-time residual (b), and logarithms of Pn-Pg determined by depth (c) of 32 earthquakes in different velocity model

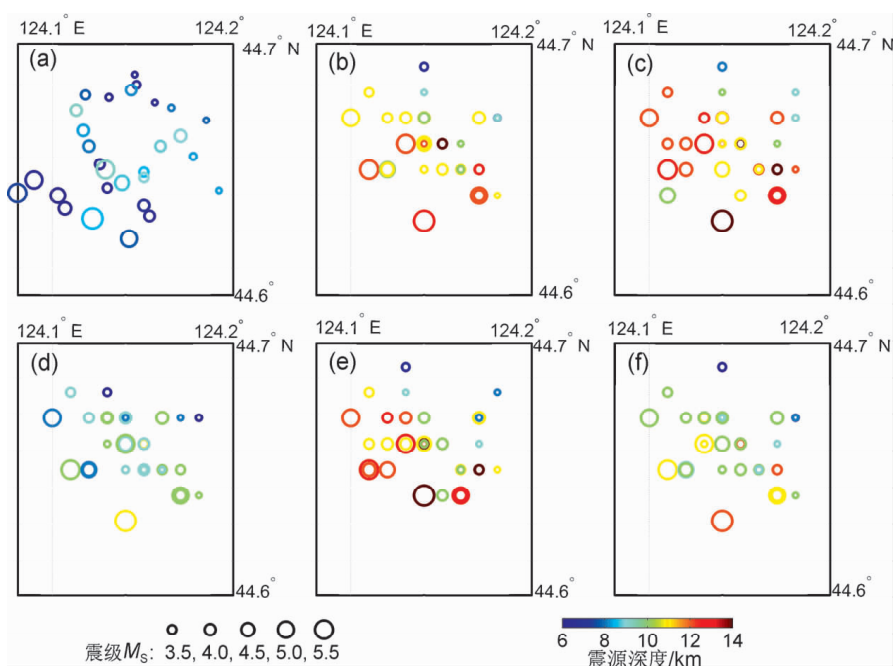


图6 不同速度模型给出的32个地震震源深度及震中分布(图号与模型号对应)

Fig. 6 Distributions of focal depth and epicenter of 32 earthquakes in different velocity model (figure number corresponds with the number of velocity model)

不同速度模型的计算结果反映了一些共性特征：在前一组 5 级地震后和后一组 5 级地震后，小震深度都有变浅的趋势。对于 ID 为 10 号的 $M_s 2.3$ 地震，各种模型计算的结果都是最小的，范围 6 ~ 8 km，最小值为 6 km。这个深度为中生代沉积的底部、基岩顶层深度。因此利用 Pn - Pg 组合定位的局部搜索方法，给出的 32 个地震深度都在 6 km 以下，位于盆地中生代沉积的底部、基岩顶层交界及以下。另外从搜索的震中分布显示，5 种模型给出的 32 个地震震中具有北西向分布特征。大震级的地震偏南深度偏深，小震级的地震偏北偏浅。

2.2 前郭震群的地震深度精度分析

笔者对流动台的 Pg 到时数据进行先后排序，发现流动台 L2202 离多个地震的震中非常近，约 3 km 以内。为此，挑出了震中位置几乎相同的 3 组

地震，ID 号分别为 10 和 16、25 和 26、27 和 29 进行单台 Pg - Sg 走时对比。其中第 1 组前者深度较小，第 2 组二者深度相同，第 3 组后者深度较小。由于采样率为 100 sps，每个地震到 L2202 流动台的直达波 Pg 和 Sg 震相经过局部放大可精确提取初至时刻点，时间拾取精度可以达到 0.01 s。在实际拾取过程中，对比前后波形差异，取波形起始较尖锐并且信噪比大于 3 的点作为震相的初至点。图 7 中黑实线为各组地震中的前 1 个地震波形，红虚线为后 1 个地震波形，波形统一将 Pg 初至调整到第 100 点进行对齐，每组地震的 Sg - Pg 到时差见图 7a' ~ c'，相应的波形见图 7a ~ c，其中括号内数字为深度，前面数字为 Sg - Pg 的到时差。

对比图 7a - a' 可以发现，7 km 深度的地震 (ID = 10) 震中距较远，但 Sg - Pg 到时差小，波形中 Sg 提前。对比图 7b - b'，两个地震震源深度

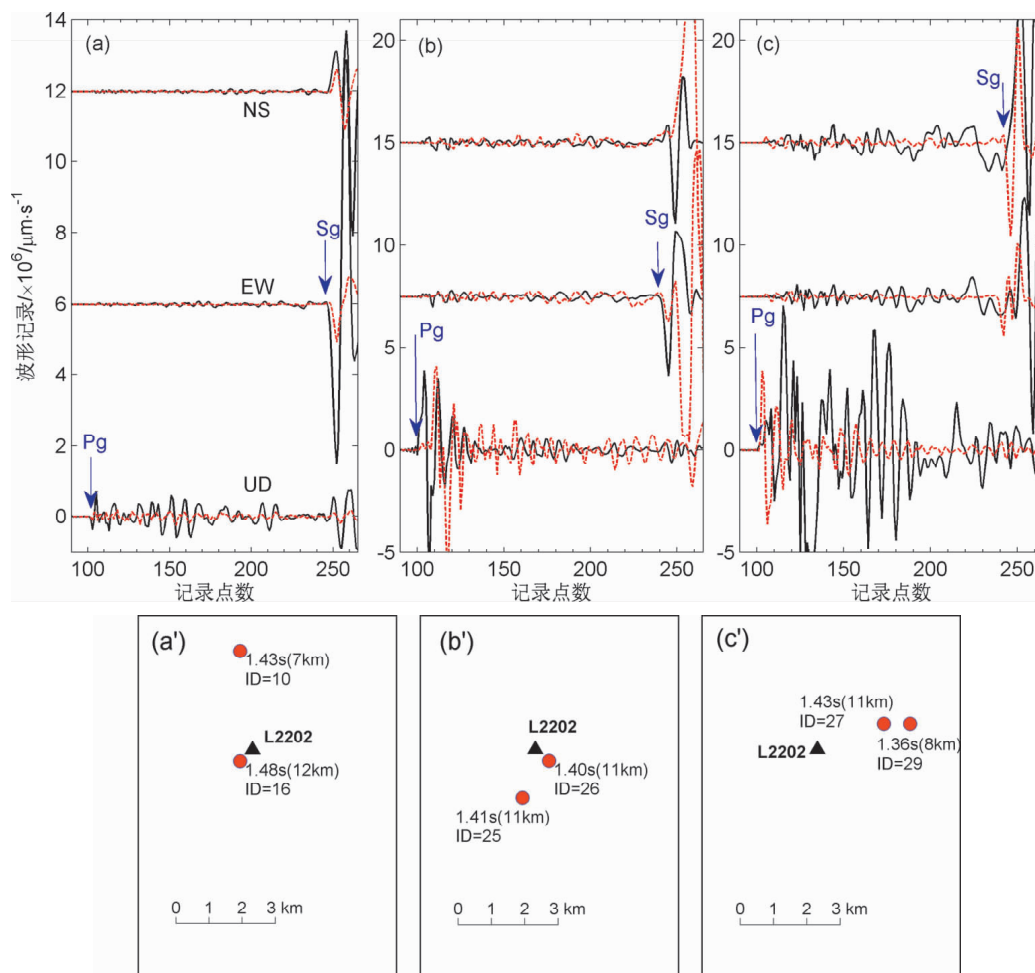


图 7 流动台 L2202 记录三组地震的波形 (a ~ c) 及台站与震中位置 (a' ~ c')；

Fig. 7 Waveforms of three pairs of earthquakes recorded by mobile seismic station of L2202 (a ~ c) and distribution of the location of station and epicenter (a' ~ c')；

相当,震中距远1 km的(ID=25)地震Sg-Pg到时差略大,两次地震记录的波形Sg几乎同时到达。对比图7c-c',震中距小的地震(ID=27)震源深度深,Sg-Pg到时差略大,波形中Sg延后。由于同震中点的地震,震源深度没有明显差异,此处未能得到比较。但是从上述三组事件可以较清晰地看出,用Pn-Pg搜索的深度与极近台Sg-Pg到时差的对比结论是一致的。因此本文给出的各模型结果即使相互间可能有一定的系统偏差,但不同模型确定的地震的相对深度是比较可信的。3组地震中,最大深度12 km,最小7 km,进一步考虑震中距不同的影响,这5 km的深度差异识别度应仅是下限。对于第三组的3 km的深度差,地震波分析也给出了分辨效果。因此综合震中距的影响,其分辨率约为 $0.5 \times \left[\frac{1}{3}(12-7) + \frac{1}{2}(11-8) \right] = 1.58$ km。而对于系统偏差,参照图5b可以发现其残差均值在0.4 s附近,由于这是Pn、Pg反向射线走时的差异,所以单Pg残差上限可估计为 $(1-0.333) \times 0.4 \text{ s} = 0.28 \text{ s}$,若上地壳P波取6.2 km/s速度,其系统深度误差为1.74 km。而利用1.2节的速度模型,可以推出其虚波速度为8.232 km/s,对于ID号为16、26的地震,按虚波速度计算的深度结果与本文是基本一致的(剔除第四纪盖层厚度后吻合度更好)。

3 认识与结论

虽有研究显示,油气开采及其注水增产作业可能会诱发小地震(刘元生,王六桥,1985),但Davis等(1995)提出判别流体抽取导致地震的发生需考虑几条准则,其中3条是:

- (1) 是否有些地震发生在抽取流体的深度上;
- (2) 是否是该地区第一次大地震;
- (3) 是否在抽取流体后发生。

因此在石油开采过程具体资料比较欠缺的情况下,震源深度测定及测定精度对判断地震的主要发震因素非常重要。

本文利用空间局部网格点有穷寻优的Pn-Pg组合法对2013年10月至12月吉林前郭震群进行了深度测定,并利用流动台的观测波形对测定结果进行检验,给出了测定的系统误差与单次地震的深度误差确定性估计。计算结果表明,这32个

地震的深度在6 km及以下,超过松辽盆地中生代沉积的底部、基岩顶层深度,特别是 $M_s \geq 3.3$ 地震的深度超过8 km。因此这些地震最有可能发生在盆地基底的基岩顶层,而不在油气圈闭的沉积盖层内。由于地震震群分布大致呈北西向,与通榆—长春断裂这条切过Moho面的隐伏断裂走向相一致,因此本文推测这些地震与北西向构造活动有关。

另外,据中国地震局地球物理研究所(2013a,b)利用波形拟合方法给出的震源机制解,10月31日5.5级地震的震源机制解为:节面I(strike330°, dip60°, slip50°),节面II(strike209°, dip48°, slip138°);11月23日5.8级地震的震源机制解为:节面I(strike200°, dip70°, slip140°),节面II(strike306°, dip53°, slip25°)。如果按本文北西向的震中分布作为参考,则上述第一个地震的主破裂面为节面I,第二个地震的主破裂面为节面II,都带有一定的逆冲分量,西南盘向东走向滑并兼带仰冲。这与该区域全新世NW向新构造圈闭仍处于隆起状态的结论吻合。

由于前郭地区1119年曾发生6¼级地震,2003年4月16日至7月31日吉林松原出现震群活动后,2005年7月25日在大安—都德断裂的林甸发生5.1级地震,其后2006年3月31日乾安—前郭发生5.0级地震,以及2013年10至12月的多个5级地震的发生,似乎都是北北东向大安—都德断裂和北西向通榆—长春断裂构造活动的结果(盘晓东等,2007)。因此综合前郭地区的历史地震、本次震群的震源深度、震中分布及局部构造运动特征,笔者认为发生在2013年10至12月的前郭震群是构造运动的产物,油田作业不是其主要发震因素。

参考文献:

- 程学儒. 1982. 松辽盆地的板块构造位置与烃类产出特征[J]. 石油勘探与开发, (6): 39-48.
- 傅淑芳, 刘宝诚. 1980. 地震学教程[M]. 北京: 地震出版社, 185-188.
- 傅维洲, 刘宝俊, 刘财, 等. 1998. 中国满洲里—绥芬河地学断面地震学研究[J]. 长春科技大学学报, 28(2): 206-212.
- 高金哲, 李志伟, 包丰, 等. 2013. 2006年吉林乾安—前郭5.0级地震深度及其成因探讨[J]. 地球物理学进展, 28(5): 2328-2335.
- 胡望水, 吕炳全, 张文军, 等. 2005. 松辽盆地构造演化及成盆动力学探讨[J]. 地质科学, 40(1): 16-31.
- 刘天革, 隋红. 1985. 东北地区北西向构造与地震[C]//国家地震局

- 地质研究所. 遥感地震地质文集, 北京:地震出版社, 1-9.
- 刘洋, 刘财, 杨宝俊, 等. 2008. 松辽盆地北部纵波速度区域特征分析及深层油气问题[J]. 地球物理学进展, 23(3):785-792.
- 刘元生, 王六桥. 1985. 油井动态与地震关系研究的新进展[J]. 华北地震科学, 3(1):1-5.
- 盘晓东, 王军亮, 孙旭丽, 等. 2007. 乾安—前郭 5.0 级地震的构造背景分析[J]. 东北地震研究, 23(1):8-15.
- 祁林, 韩广林, 张惠. 1992. 松辽盆地喜山运动期地应力场演化对油气运聚的影响[J]. 石油与天然气地质, 13(4):398-407.
- 裴善文, 王锡魁, 张淑芹, 等. 2012. 松辽平原古大湖演变及其平原的形成[J]. 第四纪研究, 32(5):1011-1021.
- 唐雅芝. 1990. 公元 1119 年 2 月吉林省前郭强震三要素的确定[J]. 东北师大学报(自然科学版), (3):152-160.
- 滕吉文, 曾融生. 2002. 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), 32(2):89-100.
- 杨宝俊, 唐建人, 李勤学, 等. 2003. 松辽盆地隆起区地壳反射结构与“断开”莫霍界面[J]. 中国科学(D 辑), 33(2):170-176.
- 杨令宾. 1995. 松辽平原的生成与演化[J]. 东北师大学报(自然科学版), (2):119-124.
- 周本刚, 高名修. 1992. 松辽盆地几次中强震的构造条件探讨[J]. 地震地质, 14(2):145-150.
- 朱元清, 石耀霖. 1990. 一种确定地震深度的新方法[J]. 地震地磁观测与研究, 11(2):4-12.
- 中国地震局地球物理研究所. 2013a. 2013 年 10 月 31 日吉林省松原市前郭尔罗斯蒙古族自治县 5.5 级地震[EB/OL]. (2013-10-31) [2014-04-27]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/267882.shtml>.
- 中国地震局地球物理研究所. 2013b. 2013 年 11 月 23 日吉林省松原市前郭尔罗斯蒙古族自治县 5.8 级、5.0 级地震[EB/OL]. (2013-11-23) [2014-04-27]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/267992.shtml>.
- Davis D. S., Nyffenegger P. A., Frohlich C. 1995. The 9 April 1993 earthquake in south-central Texas: Was it induced by fluid withdrawal[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 85(6):1888-1895.

Discussion on Cause Factor of Jilin Qianguo $M_s5.8$ Earthquake Sequence in 2013 Using Focal Depth Characteristic of Relocation

LIU Shuang-qing¹, XUE Yan², CAI Hong-lei³, XIE Jing¹

(1. Earthquake Administration of Tianjin Municipality, Tianjin 300201, China)

(2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

(3. Earthquake Administration of Jilin Municipality, Changchun 130117, Jilin, China)

Abstract

Using the local optimum search strategy of couple Pn-Pg phases algorithms, we determined the focal depth of Jilin Qianguo $M_s5.8$ earthquake sequence in 2013 by five different crust velocity models, and the calculation results indicate that the distribution characteristic of the 5 kinds of focal depth is consistency. The focal depths of the selected 32 earthquakes are relocated, the minimum and maximum focal depths are 6 km and 14 km respectively, most focal depths focus on 10 km. The systemic depth measure error may be 1.74 km, and the resolution of focal depth may be about 1.58 km. The advantage distribution of the relocated epicenters is in the NW direction. Compared with the thickness of local sedimentation in the study area, these earthquakes most probably occurred at the top of bed rock under the basin basement, rather than at the sediment overlying strata of oil field. Moreover, the preponderance direction of the distribution of these epicenters is consistent with the strike of Tongyu-Changchun Fault. Combined with the relationship between the local historical earthquakes and tectonic in the study area, we take a further speculation that the earthquake sequence maybe related with the tectonic activity of Tongyu-Changchun Fault in NW, rather than the direct production of the oil-field operation.

Key words: focal depth; Pn-Pg algorithms; location precision; oil-field operation; tectonic movement; Qianguo $M_s5.8$ earthquake sequence