

张致伟、程万正、吴朋等, 2013, 自贡-隆昌地区地震重新定位及 P 波速度结构研究, 中国地震, 29 (1), 37 ~ 47。

自贡-隆昌地区地震重新定位 及 P 波速度结构研究

张致伟¹⁾ 程万正¹⁾ 吴朋¹⁾ 宫悦¹⁾ 陈文康²⁾ 许艳²⁾ 周秀忠³⁾

1) 四川省地震局, 成都市人民南路三段 29 号 610041

2) 自贡市防震减灾局, 四川自贡 643000

3) 成都地震基准台, 成都 611730

摘要 基于 2007 年 1 月 ~ 2010 年 8 月自贡地方数字测震台网和流动台站记录的地震观测报告, 对自贡-隆昌地区开展了地震精定位和速度结构反演两方面的研究工作, 并结合研究区地震活动时间序列及注水井 (家 33 井) 的加压数据, 探讨了注水区域及邻区地震震源深度分布、P 波速度结构特征及其与家 33 井加压注水的关系。定位结果显示: 地震的空间丛集性更加明显, 集中分布在自贡 (A 区)、富顺-隆昌交界 (B 区) 及隆昌 (C 区) 等 3 个区域。其中距家 33 井西侧约 20km 的 A 区地震呈 NNE 向长轴展布, 震源深度主要分布在 5 ~ 15km; B、C 区域内的地震则沿 NW 向长轴展布, 家 33 井所在的 B 区绝大多数地震的震源深度在 2 ~ 6km, 即家 33 井的注水层位附近, 呈现由 NW 至 SE 的铲形特征, 并逐渐变深; 位于家 33 井东南方向约 15km 的 C 区, 地震震源深度相对 B 区较深, 优势深度在 8 ~ 15km。分析认为, A 区地震活动与家 33 井加压注水无关, 而 B、C 区域的地震活动却明显受到加压注水的影响。P 波速度结构显示: 在 3km 深的注水层位附近, 区域 B、A 之间形成了 1 条近 NS 走向的高、低波速过渡带, B 区地壳介质的 P 波速度明显高于 A 区, 其原因是家 33 井出现容腔饱和, 使该区地下介质具有较高含水饱和度引起的。

关键词: 自贡-隆昌地区 加压注水 双差定位 联合反演 速度结构

[文章编号] 1001-4683 (2013) 01-0037-11

[中图分类号] P315

[文献标识码] A

0 引言

20 世纪 20 年代, 美国地质学家在德克萨斯州南部观测到, 鹅溪油田 (Goose Creek Oil Field) 的开发引发了邻近地区的地表沉陷、断层错动和地震等现象, 这是人类第 1 次发现因油田开采引发的地质活动现象 (谢礼立, 2007)。此后, 油气田开采与地震活动的关系引起了国内外众多学者的关注 (Healy et al, 1968; Yerkes et al, 1976; Segall, 1989; 刁守中等, 1987、1989、1990; 程式等, 1992; 朱丽霞等, 2007; 阮祥等, 2008)。

[收稿日期] 2012-02-20; [修定日期] 2012-04-24

[项目类别] 地震科技星火计划项目 (XH1021Y)、中国地震局监测预报司震情跟踪定向工作任务 (2012020107) 及国家自然科学基金项目 (41090294) 共同资助

[作者简介] 张致伟, 男, 1983 年生, 工程师, 主要从事数字地震学和地震预测方法等方面的研究。

E-mail: zzw1983107@163.com

四川作为全国主要的油气田和井矿盐产区之一,存在多处采盐、采气及废水回注井。其中位于自贡市大安区牛佛镇与隆昌县黄家场镇交界的家33井为天然气采空废井,为避免环境污染,气矿自贡作业区将其附近的其他天然气生产井所产生的工业废水回注到家33井中。2009年1月上旬该井出现容腔饱和,随后开始人为加压注水,而家33井周边的地震活动亦随之明显增强,并于2009年2月16日、5月22日先后发生了 $M_L4.4$ 、 4.2 地震(图1)。为此,地震部门增设流动数字地震台进行监测,并开展了相应的研究工作。

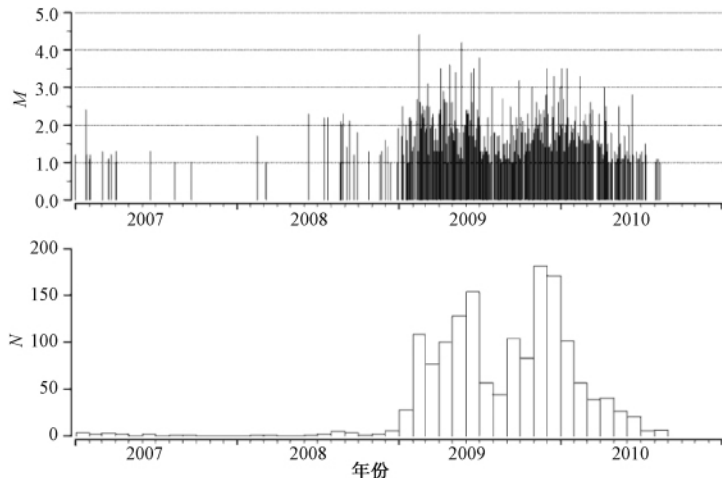


图1 2007年以来家33井周边地震活动 $M-t$ 、 $N-t$ 图

本文以四川自贡-隆昌地区($29.0^{\circ} \sim 29.8^{\circ}N$ 、 $104.4^{\circ} \sim 105.4^{\circ}E$)为研究区域,基于2007年1月~2010年8月自贡地方数字测震台网和流动台站记录的地震观测报告,主要开展了两方面的研究工作:一是采用双差定位法对研究区域的地震进行重新定位;二是利用震源与速度结构联合反演方法确定该区域的P波速度结构。并结合研究区地震活动的时间序列及家33井的加压数据,试图分析注水区域及邻区地震震源深度分布、P波速度结构特征及其与家33井加压注水的关系。

1 地震定位

1.1 资料的选取

研究区域为四川自贡-隆昌地区($29.0^{\circ} \sim 29.8^{\circ}N$ 、 $104.4^{\circ} \sim 105.4^{\circ}E$),研究中收集了2007年1月~2010年8月自贡地方数字测震台网和流动台站记录的观测报告,所选用的地震至少被4个台站记录到,经筛选最后符合条件的地震共有3308次,震级范围为 $M_L0.1 \sim 4.6$,其中以小震为主, $M_L2.0$ 以下地震占97.7%,图2(a)给出了定位前小震的空间分布。

图2(b)是本文所涉台站的分布图,其中自贡地方数字测震台网(灰色三角所示)于1994年开始运行。2009年1月,该台网东侧的富顺-隆昌交界地区出现了小震活动明显增强的异常现象,随后四川省地震局在小震增强区域周围布设了5套流动测震台(黑色三角所示),于2009年7月起正式运行,这10个子台平均台距为10km,监测能力震级下限可达 $M_L0.1$ 。

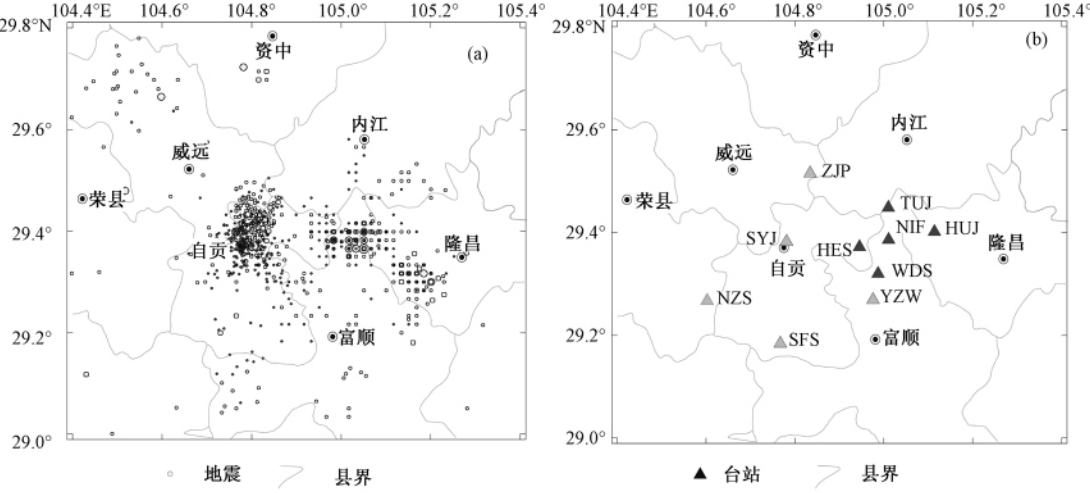


图2 研究区域内的地震(a)及台站(b)分布图

赵珠等(1987)基于 10 个工业爆破、154 个天然地震及四川台网 50 个台站记录的 P 波到时等资料,以龙门山断裂和二级大地构造单元分界线为界,获得了四川东部盆地和西部高原不同的地壳上地幔平均速度模型。参考赵珠等(1987)的模型,同时结合该区域的地壳速度结构研究结果(王椿镛等,2002;马宏生等,2008),最终采用表 1 作为本研究的初始速度模型。

表 1 研究区域地壳 P 波平均速度模型

深度(km)	0.0	3.0	7.0	16.0	18.0	20.0	30.0	40.0
P 波速度(km•s ⁻¹)	5.80	5.82	5.88	5.95	6.35	6.43	6.60	7.14

1.2 定位方法

双差地震定位算法由 Waldhauser 等(2000)提出,是一种比绝对定位法精度高的相对定位方法,其反演的是一组丛集地震中每个地震相对于该丛集矩心的相对位置,不仅能像其他相对定位方法一样有效地减小由于对地壳结构了解不够精细而引起的误差,而且能应用在空间跨度比主事件定位法大的地震事件群体,有其独到的优点(杨智娴等,2003)。

在双差算法中,使用两个地震走时差的观测值与理论计算值的残差(“双差”)确定其相对位置,即

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = dr_k^{ij} \tag{1}$$

式中 dr_k^{ij} 是“双差”

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)_{\text{obs}} - (t_k^i - t_k^j)_{\text{cal}} \tag{2}$$

即第 i 个地震至第 k 个地震台的地震波走时 t_k^i 与第 j 个地震至第 k 个地震台的地震波走时 t_k^j 之差的观测值 $(t_k^i - t_k^j)_{\text{obs}}$ 与理论计算值 $(t_k^i - t_k^j)_{\text{cal}}$ 的残差, $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$ 是第 i 个地震的震源参数 $(x^i, y^i, z^i, \tau^i)^T$ 的改变量。将由所有地震 $(i, j = 1, 2, \cdots, N)$ 及所有台站 $(k = 1, 2, \cdots)$ 得到形如(1)式的方程,用矩阵表示,即为下列方程

$$WGm = Wd \quad (3)$$

式中, G 是一个 $M \times 4N$ (M 是双差的观测数, N 是地震数) 的偏微商矩阵, d 是双差数据矢量; m 是由待定的震源参数改变量 $(\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta \tau^i)^T$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 构成的维数为 $4N$ 的矢量; W 是一用以对每个方程加权的对角线矩阵。反演中, 对所有地震经重新定位的各震源参数 (即 3 个方向上的坐标和发震时刻) 加上了使其平均移动 (其“矩心”不动) 为零的约束条件

$$\sum_{i=1}^N \Delta m^i = 0 \quad (4)$$

有关该方法的细节, 可参阅 Waldhauser 等 (2000) 的文献。

1.3 震源深度分布与家 33 井加压注水的关系

采用双差定位法对 2007 年 1 月 ~ 2010 年 8 月发生在研究区域的 3308 次地震进行重新定位, 最终获得了 2706 次地震的定位结果。定位之后, 到时残差的均方根平均值为 0.09s, EW 向平均定位偏差为 0.12km, NS 向为 0.08km, 垂直向则为 1.2km。图 3 给出了定位后中小地震及家 33 井的位置分布图。由图 3 可见, 地震空间丛集性更加明显, 集中分布在自贡 (A 区)、富顺-隆昌交界 (B 区) 及隆昌 (C 区) 3 个丛集区域, 其中 A 区地震分布的长轴方向为 NNE 向, B、C 两区地震分布则以 NW 向为长轴。我们将详细阐述 A、B、C 各区域地震震源深度分布特征, 并结合各区地震活动时间序列及家 33 井注水加压情况, 进一步探讨家 33 井对注水区域及邻区深部地震分布的影响。

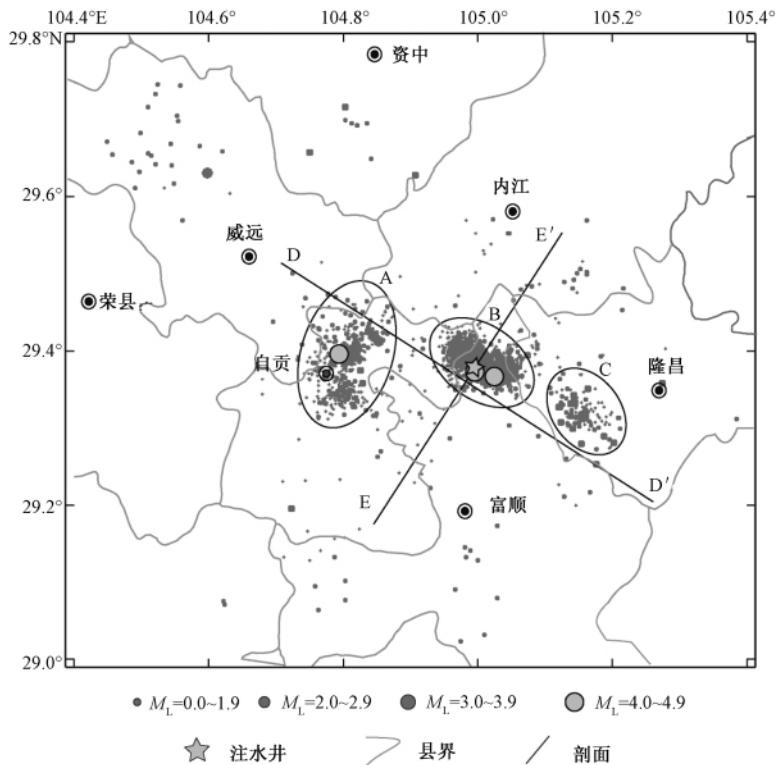


图 3 双差定位后中小地震及测井位置分布图

图 4 分别给出了上述 3 个丛集区域地震沿其长轴的震源深度分布及分档直方图。结果表明,距家 33 井西侧约 20km 的 A 区地震震源深度主要集中在 5 ~ 15km,且呈正态分布(图 4(a))。从该区地震活动时间序列及注水加压曲线(图 5(a))来看,地震活动增强时段为汶川 8.0 级地震之后、家 33 井加压之前。加压之后地震活动处于正常水平。分析认为,2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震的发生,在一定程度上改变了四川盆地地下应力场环境,致使盆地南缘出现地震活动增强的原因,基本可确认与家 33 井加压注水无关。

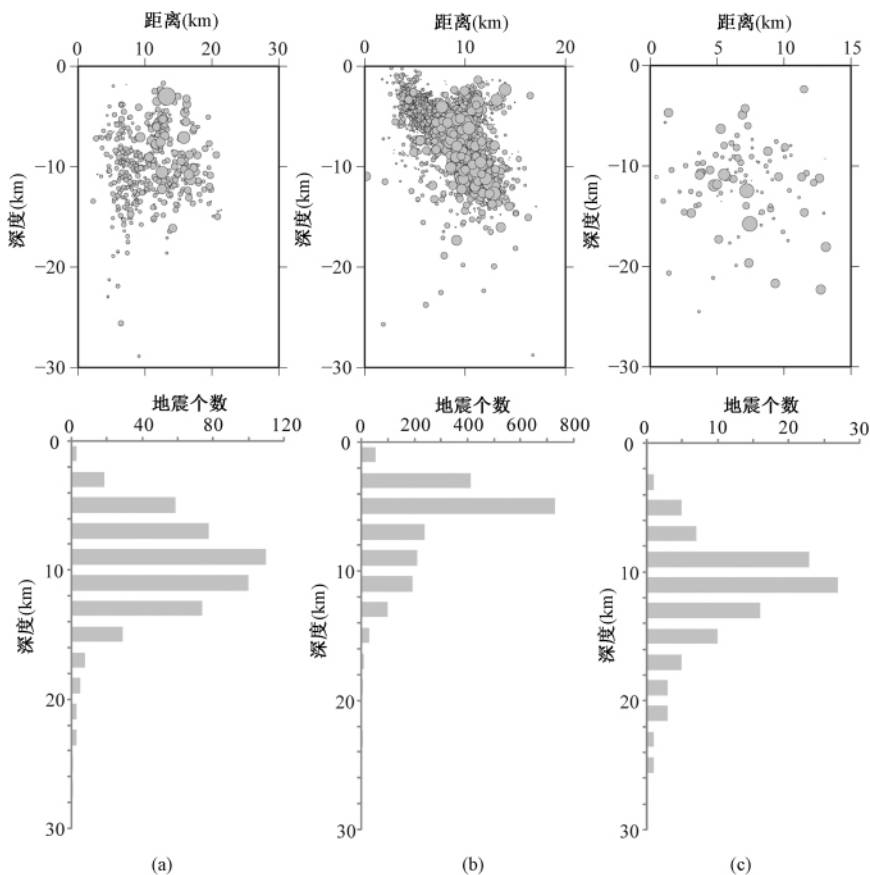


图 4 各区中小地震沿长轴的深度分布及分档直方图

(a) 区域 A; (b) 区域 B; (c) 区域 C

家 33 井所在的 B 区地震震源深度较浅,绝大多数分布在 2 ~ 6km,即家 33 井注水层位及下方,震源深度剖面呈现由 NW 至 SE 的铲形特征,并逐渐变深(图 4(b))。朱丽霞等(2007)在研究荣昌地区注水地震时也发现小震以浅源地震为主,而且小震活动存在由浅向深发展的过程;阮祥等(2008)在研究四川长宁盐矿井注水诱发地震时也得出小震震源深度较浅(2 ~ 3km)的定位结果。图 5(b)显示该区地震活动与家 33 井注水压力曲线具有很好的相关性,可见家 33 井注水压力对 B 区地震活动有明显的调控作用。鉴于时间、空间和深度分布特征,分析认为 B 区地震的发生与家 33 井加压注水有一定关系,注水井加压致使孔隙压力增大,从而降低该区地下岩石的剪切强度,则先在浅部发生一些小地震,水的润滑作

用使小破裂互相串通,并向较深处扩展。

距家33井东南方向约15km的C区地震震源的优势深度在8~15km,5km内的浅层小震活动稀疏。从该区地震活动时间序列与家33井注水压力曲线看(图5(c)),C区地震活动在家33井加压之后也有所增强,但由于距注水井较之B区更远,因此地震活动没有B区明显。从空间分布看,C区位于B区的SE方向,从震源深度看,C区小震震源深度相对B区较深,地震活动有从B区向C区延伸的趋势。鉴于B、C区域小震活动的时空分布特征,分析认为,C区小震活动可能是家33井加压致使B、C区域之间地下裂隙贯通,流体向C区深部延伸产生微裂隙的结果。反之,也可根据地震活动空间分布来推断流体在地下的流向及裂隙的延伸方向。

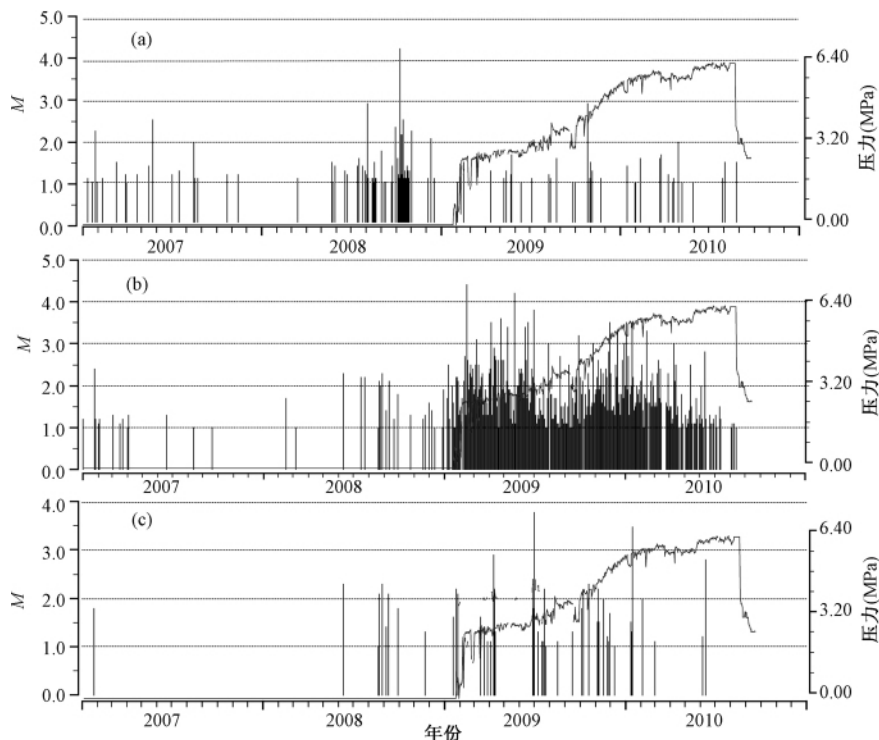


图5 各区地震活动的时间序列与家33井注水压力曲线

2 地壳速度结构反演

储层岩石多孔,其间可填充水或油,流体的存在将会影响岩石介质的地震参数特征,其速度会随饱和程度而变化。大庆油田榆树林地区的砂岩实验结果表明:含水饱和度对纵波速度的影响较大,而横波速度基本不受影响(施行觉等,1995)。基于上述实验结果,本文选取自贡-隆昌地区2007年1月~2010年8月自贡地方台网和流动台站记录的3308次地震共计14381条P波射线数据,试图用震源与速度结构联合反演的方法确定该区域P波速度结构,将家33井所在的B区与其西侧20km的A区作为对比研究区域,分析家33井的加压注水对A、B两个区域P波速度的影响。

2.1 反演方法

在震源位置和速度结构的联合反演过程中,走时残差 δt 是由震源参数的扰动和速度扰动引起的。根据有关研究文献 (Aki et al, 1976; Thurber, 1983; 刘福田, 1984), 该问题可以用以下线性方程表示

$$\delta t = \Delta t + \frac{\partial t}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial t}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial t}{\partial z} \Delta z + \sum_{n=1}^N \frac{\partial t}{\partial v} \Delta v_n \quad (5)$$

式中, Δt 、 Δx 、 Δy 、 Δz 和 Δv_n 分别表示震源的发震时刻、经度、纬度、深度的扰动以及速度的扰动, N 为速度参数的总个数。对于 l 个地震和 k 个台站, 可以将式 (5) 写成如下的紧凑形式

$$\delta t = A \delta v + B \delta x \quad (6)$$

式中, δt 是 m 维走时残差向量, δv 是 n 维节点速度扰动向量, δx 是 $4l$ 维震源参数扰动向量, A 是 $m \times n$ 维走时对速度的偏导数矩阵, B 是 $m \times 4l$ 维走时对震源参数的偏导数矩阵。

根据联合反演的基本公式 (6), 速度参数和震源参数是相互耦合着的。要在同一个方程中同时反演两种不同量纲的参数, 除了会增加算法的数值不稳定性外, 还需要耗费大量的计算机内存和机时, 因此必须进行参数分离 (Pavlis et al, 1980; Spencer et al, 1980; 刘福田, 1984)。本文采用刘福田等 (1989) 提出的正交投影算子, 将式 (6) 分解为以下两个分别求解速度参数和震源参数的方程组

$$(I - P_B) A \delta v = (I - P_B) \delta t \quad (7)$$

$$B \delta x = P_B (\delta t - A \delta v) \quad (8)$$

式中, P_B 为与震源参数有关的从 R^m 到 B 的像空间 $R(B)$ 上的正交投影算子。速度参数和震源参数解耦合后的分析表明, 速度扰动量的确定与震源位置扰动量无直接关系, 仅与它的初值有关。我们采用网格方法 (Thurber, 1983) 对速度模型进行参数化, 在平面方向上将研究区域划分成 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的均匀网格, 模型中的速度分布用连续函数表示, 网格内任意一点的速度用内插方式计算 (Thurber, 1983; Zhao et al, 1992), 一维参考速度模型如表 1 所示。

2.2 解的分辨分析

本文采用检验板方法 (Humphreys et al, 1988; Inoue et al, 1990) 来估计解的分辨率。其基本原理是, 在给定速度模型参数的基础上, 对各节点进行正负相同的扰动; 然后根据实际射线分布通过正演计算得到理论走时数据, 将理论走时数据加上一定随机误差后作为观测数据进行反演, 其间要求反演方法与实际成像过程中的方法一致; 最后比较反演结果和检验板的相似程度, 估计解的可靠性。文中扰动值取为正常值的 $\pm 3\%$ 。P 波检验板分辨检验结果显示 (图 6), 在小于等于 7km 的不同深度的大部分节点上, 解的分辨率是令人满意的, 16km 深度上只有少数节点 (自贡-隆昌交界地区) 的解比较理想。

2.3 P 波速度结构与家 33 井加压注水的关系

图 7 给出了自贡-隆昌地区不同深度范围内切面的地壳 P 波速度结果。仅就该区域而言, P 波速度在不同深度呈现出不同的图像。7km 深度范围内, 家 33 井所在的 B 区地壳介质 P 波速度明显高于其西侧 20km 的 A 区, 其中深度 $0 \sim 3$ km, A 区中心介质 P 波速度略高于四周, 而在深度 3km 的注水层位附近, 区域 B、A 之间形成了 1 条近 NS 走向的高、低波速过渡带。这是由于 B 区存在一废水回注井 (家 33 井), 并于 2009 年 1 月开始出现容腔饱

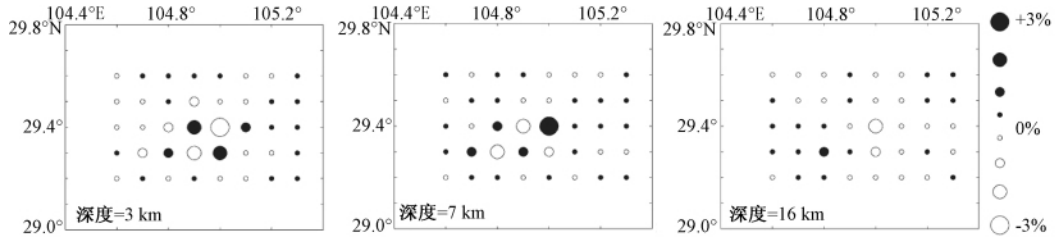


图6 不同深度 P 波检验板分辨检测结果

和,随后对该井人为加压注水所致。分析认为,该区 P 波速度明显升高的原因在于家 33 井出现容腔饱和致使该区地下介质具有较高含水饱和度引起的,与家 33 井的加压注水有一定的关系。沈文略等(2003)的实验结果也表明,当饱和度为 5% ~ 60% 时, v_p 的变化较小,且无规律;当样品的水饱和度在 60% ~ 80% 时, v_p 有明显的上升。而在 16km 深度, A、B 及邻区地壳介质的 P 波速度均表现为相对较高,可能说明 A、B 区域在 16km 及其以下深度地壳介质含水饱和度较高。

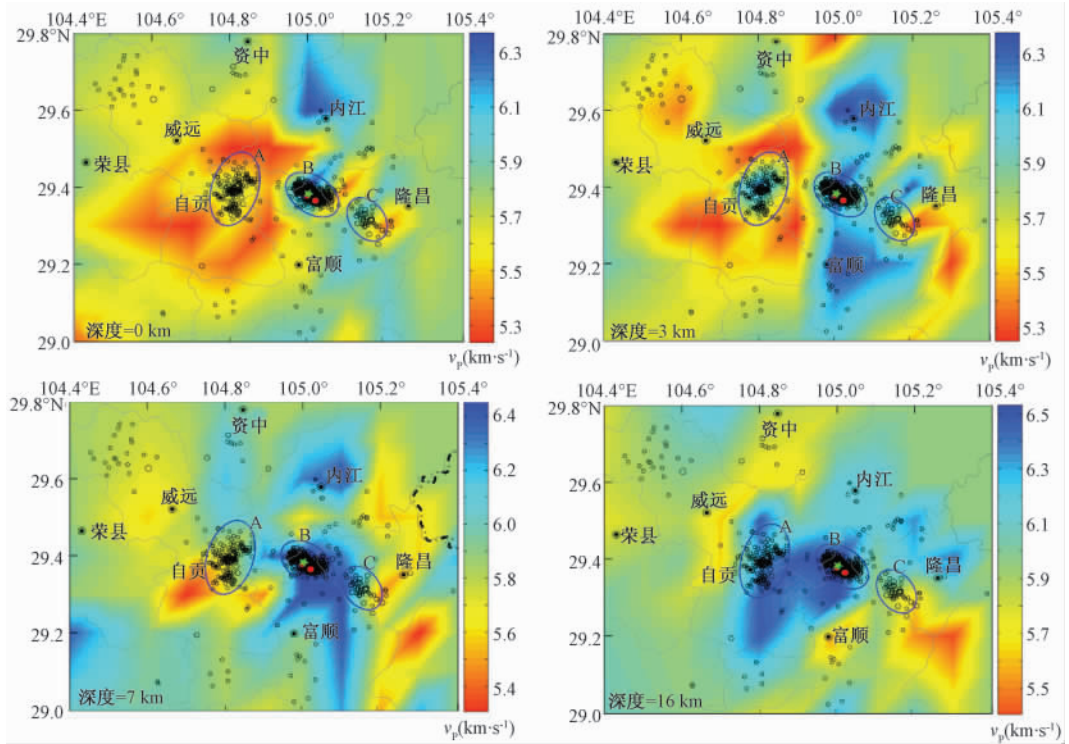


图7 不同深度地壳 P 波速度反演结果

沿 DD'、EE' 的速度垂直剖面图(图 8) 同样也可看出, B 区地下介质 P 波速度明显高于 A 区, B 区形成的密集微震带或裂隙带向深部延伸, 均分布在相对较高的波速区域, 而且在 16km 及其以下深度存在一高速体。反之, 高波速也能反映地下流体的存在, 说明在 16km 以下地壳介质的含水饱和度较高。

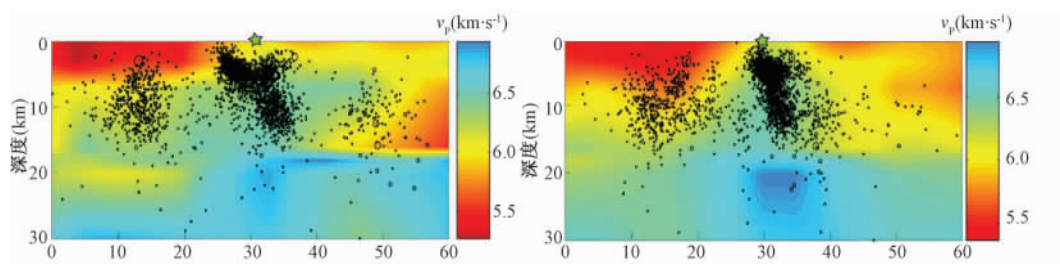


图 8 沿 DD'(a)、EE'(b) 剖面的 P 波速度

3 结论与讨论

对四川自贡-隆昌地区的地震进行了重新定位,并反演了该区域的速度结构,在此基础上结合研究区地震活动时间序列及家 33 井的加压数据,探讨了注水区域及邻区地震震源深度分布、P 波速度结构特征及其与家 33 井加压注水的关系,得到如下认识:

(1) 对地震重新定位后发现,地震在空间上的丛集性更加明显,集中分布在自贡(A 区)、富顺-隆昌交界(B 区)及隆昌(C 区) 3 个区域,各区震源深度的优势分布呈现不同特征。其中 A 区地震分布的长轴呈 NNE 向,震源深度主要在 5 ~ 15km;B、C 区域地震则以 NW 向为长轴,B 区绝大多数地震的震源深度集中在 2 ~ 6km,即家 33 井的注水层位及以下,呈现由 NW 至 SE 的铲形特征;C 区小震震源深度相对 B 区较深,5km 以内的浅层小震活动稀疏,优势深度在 8 ~ 15km。

(2) 对地震活动的时空特征进行分析后认为:距家 33 井西侧约 20km 的 A 区的地震活动与家 33 井的加压注水无关;家 33 井所在的 B 区地震活动明显受加压注水的调控作用,机理在于加压致使孔隙压力增大,从而降低岩石的剪切强度,则先在浅部发生一些小地震,水的润滑作用使小破裂互相串通,并向较深处扩展;位于家 33 井东南方向约 15km 的 C 区,地震活动的丛集现象可能是由于家 33 井的注水加压导致 B、C 区域之间地下裂隙贯通,流体向 C 区深部延伸产生微裂隙的结果。

(3) P 波速度结构显示,不同深度 P 波速度呈现出不同的图像,深度在 3km 的注水层位及附近,区域 B、A 之间形成了 1 条近 NS 走向的高、低波速过渡带,家 33 井所在的 B 区地壳介质 P 波速度明显高于其西侧 20km 的 A 区。由于 B 区存在一废水回注井,并于 2009 年 1 月开始出现容腔饱和,随后人为加压注水。分析认为 B 区 P 波速度明显升高的原因在于家 33 井出现容腔饱和致使该区地下介质具有较高含水饱和度引起的,与家 33 井的加压注水有一定的关系。根据 Kauster 等(1974)的理论,弹性波速度和裂隙状孔隙的刚度有非常大的关系,裂隙状孔隙刚度的增加会明显增加岩石的弹性波速度。所以,B 区地下介质处于高饱和度时所有尺度大的孔隙都被饱和,水代替空气而造成孔隙的液相连通,在裂隙状孔隙被水饱和而增加其刚度时, v_p 值则明显上升。

致谢:四川省地震局监测研究所、自贡市防震减灾局为本研究提供了地震观测资料,震源与速度结构联合反演采用中国地震台网中心周龙泉博士提供的程序,本研究还得到了马宏生博士、周龙泉博士及邵志刚博士的大力支持和指导,两位评审专家提出了非常中肯、有价值的修改意见。在此一并致谢。

参考文献

- 程式、刘文泰,1992,中国注水诱发地震的又一个实例,地震,(1),63~66。
- 刁守中,1989,山东角 07 井注水诱发地震序列的时间分布特征,地震,1,27~31。
- 刁守中、蒋海昆、徐学炎,1990,山东胜利油田角 07 井注水地震序列的演化及其机制,地震学报,12(4),399~406。
- 刁守中、周焕鹏、郭爱香,1987,山东角 07 井注(漏)水诱发地震——震源参数与地震序列特征,地震地质,9(3),84~89。
- 刘福田,1984,震源位置和速度结构的联合反演(I)——理论和方法,地球物理学报,27(2),167~175。
- 刘福田、李强、吴华等,1989,用于速度图像重建的层析成像法,地球物理学报,32(1),46~61。
- 马宏生、张国民、闻学泽等,2008,川滇地区三维 P 波速度结构反演与构造分析,地球科学—中国地质大学学报,33(5),591~602。
- 阮祥、程万正、张永久等,2008,四川长宁盐矿井注水诱发地震研究,中国地震,24(3),226~234。
- 沈文略、杨东全,2003,岩石弹性波速度和饱和度、孔隙流体分布的关系,地球物理学报,46(1),138~142。
- 施行觉、徐果明、靳平等,1995,岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的实验研究,地球物理学报,38(增刊 1),281~287。
- 王椿镛、Mooney W D、王溪莉等,2002,川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究,地震学报,24(1),1~16。
- 谢礼炯,2007,论油气田的地震灾害和防御,油气田地面工程,26(12),1~4。
- 杨智娴、陈运泰、郑月军等,2003,双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用,中国科学(D 辑),33(增刊 1),129~134。
- 赵珠、张润生,1987,四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究,地震学报,9(2),154~166。
- 朱丽霞、黄世源、魏红梅,2007,荣昌地区注水地震研究,大地测量与地球动力学,27(6),86~90。
- Aki K, Lee W H K, 1976, Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using P arrival times from local earthquakes (1) A homogeneous initial model, J Geophys Res, 81, 4381~4399.
- Healy J H, Rubey W W, Griggs D T, et al, 1968, The Denver earthquakes, Science, 161, 1301~1310.
- Humphreys E, Clayton R W, 1988, Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems, J Geophys Res, 93, 1073~1085.
- Inoue H, Fukao Y, Tanabe K, et al, 1990, Whole mantle P-wave travel time tomography, Phys Earth Planet Interi, 59, 294~328.
- Kaaster G T, Toksoz M N, 1974, Velocity and attenuation of seismic wave in two-phase media, Geophysics, 39(5), 607~618.
- Pavlis L G, Booker J R, 1980, The mixed discrete-continuous inverse problem: Application to the simultaneous determination of earthquake hypocenters and velocity structure, J Geophys Res, 85, 4801~4810.
- Segall P., 1989, Earthquakes triggered by fluid extraction, Geology, 17(10), 942~946.
- Spencer C, Gubbins D, 1980, Travel time inversion for simultaneous earthquake location and velocity structure determination in laterally varying media, Geophys J R Astron Soc, 63(1), 95~116.
- Thurber C H, 1983, Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote lake area, Central California, J Geophys Res, 88, 8226~8236.
- Waldhauser F, Ellsworth W L, 2000, A double difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California, Bull Seism Soc Amer, 90(6), 1353~1368.
- Yerkes R F, Castle R O, 1976, Seismicity and faulting attributable to fluid extraction, Engineering Geology, 10(24), 151~167.
- Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S, 1992, Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan, J Geophys Res, 97, 19909~19928.

Study on earthquake relocation and P-wave velocity structure in the Zigong and Longchang area

Zhang Zhiwei¹⁾ Cheng Wanzheng¹⁾ Wu Peng¹⁾ Gong Yue¹⁾ Chen Wenkang²⁾ Xu Yan²⁾
Zhou Xiuzhong³⁾

1) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

2) Earthquake Administration of Zigong City, Zigong 643000, Sichuan, China

3) Chengdu Seismic Station, Chengdu 611730, China

Abstract Based on earthquake observation report recorded by the Zigong local digital seismic network and mobile stations from January 2007 to August 2010, the earthquake relocation and velocity structure inversion are developed in the Zigong and Longchang area. Taking into account the time series of seismic activities and injection pressure of water injection well (Jia 33 well) in study area, we discuss the focal depth distribution, the characteristics of P-wave velocity structure and relationship with injection pressure of Jia 33 well in and around injection region. The positioning result shows that the earthquake space cluster distributions are more obvious, the earthquakes are concentrated in three cluster regions of Zigong (region A), Fushun-Longchang juncture (region B) and Longchang (region C). Region A is about 20km to the west of Jia 33 well, earthquakes distribute along NNE direction, and the dominant range of focal depth is 5 ~ 15km. Earthquakes distribute along NW direction in regions B and C. Region B is where Jia 33 well locates in, the focal depth of most earthquakes are between 2km and 6km, which is near the affusion layer of Jia 33 well. The focal depth presents shovel-shaped distribution characteristic which spreads from NW to SE, and then become gradually deep. Region C is about 15km to the southeast of Jia 33 well. The focal depth in region C is relatively deeper than that in region B. The dominant depth is 8 ~ 15km. The seismic activities of region A are independent of injection pressure of Jia 33 well. However the injection pressure of Jia 33 well has obvious regulatory effect on seismic activities of Regions B and C. The P-wave velocity structure shows that near the affusion layer at the depth of 3km, there is a near NS direction transition zone of high-and-low velocity between regions B and A. P-wave velocity in region B is higher than that in region A. We make the conclusion that the significantly increased P-wave velocity in region B results from the higher water saturation of underground medium by square-cavity saturation of Jia 33 well and it has a correlation with injection pressure of Jia 33 well.

Key words: Zigong and Longchang area Injection pressure Double-difference
Algorithm simultaneous inversion Velocity structure