

叶秀薇、黄元敏、刘吉平, 2016, 新丰江地区地壳 P 波三维速度结构及活动构造研究, 中国地震, 32(3), 465~476。

新丰江地区地壳 P 波三维速度结构及活动构造研究

叶秀薇 黄元敏 刘吉平

广东省地震局(地震监测与减灾技术重点实验室), 广州市先烈中路 81 号大院 510070

摘要 利用震源位置和速度结构的联合反演得到 2007 年 6 月~2014 年 7 月新丰江地区地震序列的震源位置及 P 波三维速度结构模型, 并进一步对比区域活动构造的产状特征及震源机制解等。结果显示, 自 ES 向 WN 新丰江库区断裂深度有逐渐增大的趋势, 与重力场的研究结果一致。库区大坝至东源锡场之间的中-上地壳存在 4 个大小不等的高速体, 其中, 锡场下方的高速体 I 体积最大(EW 向截面约 $6\text{km}\times 7\text{km}$), 速度最大, 中心速度达 6.3km/s 。库区大坝下方存在以人字石断裂(F_2)、南山-坳头断裂(F_4)、河源断裂(F_1)、石角-新港-白田断裂(F_3)等为中心的强烈构造变形区, 1960 年至今大坝下方高速体 III、IV 边缘已发生包括 1962 年 6.1 级地震在内的 7 次 $M_L\geq 5.0$ 地震, 能量释放较为彻底; 锡场下方高速体 I 的边缘自 2012 年以来中小地震活跃, 且 b 值较低, 不排除发展为中强震孕震凹凸体的可能。

关键词: P 波速度结构 联合反演 活动构造 新丰江水库

[文章编号] 1001-4683(2016)03-0465-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

新丰江地区特指广东省河源市新丰江水库及周边区域。该区是近年来华南地区地震最为活跃的区域之一, 2012 年 1 月~2014 年 7 月广东数字地震台网已记录到发生在该区的 9000 多次 $M_L\geq 0$ 地震, 其中 7 次为 $M_L\geq 4.0$ 地震, 最大震级为 2012 年 2 月 16 日在库区西北边缘东源县锡场镇发生的 4.8 级地震。

2012 年东源 4.8 级地震发生前, 新丰江地区的地震活动主要集中于水库下游大坝附近, 如 1962 年在距大坝仅 1km 处发生的 6.1 级地震。以往对新丰江地区地震的研究主要针对水库大坝区的地震(王妙月等, 1976; 魏柏林等, 1991; 郭贵安等, 2004; 丁原章等, 1983、1992; 丁原章, 1989; 陈益明, 1982; 潘建雄等, 1982; 沈崇刚等, 1974), 另外, 受地震活动区域、台网分布及计算机技术等限制, 以往对新丰江地区上地壳速度结构的研究, 也仅以一维速度模型对水库大坝附近极小的区域进行反演(郭贵安等, 1992), 精度低且范围小。随着库区数字地震台网的日益完善以及地震活动从库区大坝向 NW 库区边缘的扩展, 对库区地震的研究

[收稿日期] 2016-01-06; [修定日期] 2016-05-05

[项目类别] 广东省科技计划项目(2012A030200005)、中国地震局公益性行业科研专项(201108003)共同资助

[作者简介] 叶秀薇, 女, 1970 年生, 高级工程师, 主要从事数字地震学及地震预测等方面的研究。

E-mail: 1424201562@qq.com

亦扩展至近年来中等地震活跃的东源锡场附近。

在地震层析成像技术的发展过程中(Aki et al, 1976; Thurber, 1983; 刘福田等, 1989; Zhao et al, 1992), 三维地壳速度结构模型的建立为地震定位研究提供了方便。层析成像时加入震源项进行震源与速度结构的联合反演(Crosson, 1976; Pavlis et al, 1980; Spencer et al, 1980; 刘福田, 1984; Michael, 1988; Kissling et al, 1994; 周龙泉等, 2006), 可在提高定位精度的同时, 得到较高分辨率的地壳速度结构, 该方法已在我国很多地震序列研究中得到成功应用(周龙泉等, 2007、2009; 潘素珍等, 2007; 马宏生等, 2008; 刘福田等, 1986)。本文采用上述方法获取新丰江地区地震序列的空间分布及精细的 P 波速度结构, 并进一步研究主要断裂的产状特征及发震构造, 以期为新丰江地区的震情研判提供深部结构的参考依据。

1 原理

震源深度与速度结构联合反演的基本原理在众多文献中已有详细介绍(刘福田, 1984; 周龙泉等, 2009; 马宏生等, 2008), 本文仅作如下简要说明。在联合反演过程中, 走时残差 δt 由震源参数、速度的扰动引起, 对于 l 个地震和 j 个台站, 可写为如下形式

$$\delta t = A\delta v + B\delta x \quad (1)$$

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

由于式(1)中速度参数与震源参数是相互耦合的, 而若在 1 个方程中同时反演 2 种不同量纲的参数, 将会增加算法的数值不稳定性, 消耗大量的计算机资源, 因此, 须进行参数分离。本文采用刘福田(1984)提出的正交投影算子, 将式(1)分解为 2 个分别求解速度参数和震源参数的方程组

$$(I - P_B)A\delta v = (I - P_B)\delta t \quad (2)$$

$$B\delta x = P_B(\delta t - A\delta v) \quad (3)$$

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; I 为单位矩阵。对速度参数和震源参数解耦后的分析表明, 速度扰动量与震源深度扰动量无直接关系, 仅与其初值有关, 而震源深度扰动量则与速度扰动量明显相关。联合反演过程中由式(2)、(3)先确定研究区的速度结构参数, 再确定震源参数, 从而消除速度结构的不确定性对定位精度的影响。因此, 通过震源深度与速度结构的联合反演可有效提高定位的精度, 并在反演中得到研究区速度结构模型。

2 地震资料和初始速度模型

2.1 地震资料

广东省“十五”期间建设的数字地震台网自 2007 年 6 月开始运行, 本文选取了 2007 年 6 月~2014 年 7 月共计 13247 次地震的 91666 条 P 波走时记录进行速度结构的反演(图 1)。新丰江地区是广东省地震活动最为活跃的地区, 建有由 5 个地震台组成的新丰江数字地震台网, 2012 年东源 4.8 级地震后, 3 次设立流动地震台加密观测, 序列记录较为完整, $M_L \geq 1.0$ 地震基本无遗漏。

地震与台站射线分布图显示(图 2), 研究区($23.2^\circ \sim 24.4^\circ N$, $114.4^\circ \sim 114.8^\circ E$)内部射线

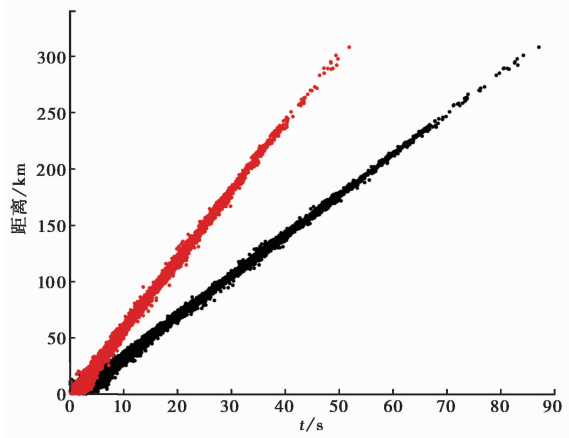


图 1 用于反演的 P 波、S 波走时
红色为 P 波；黑色为 S 波

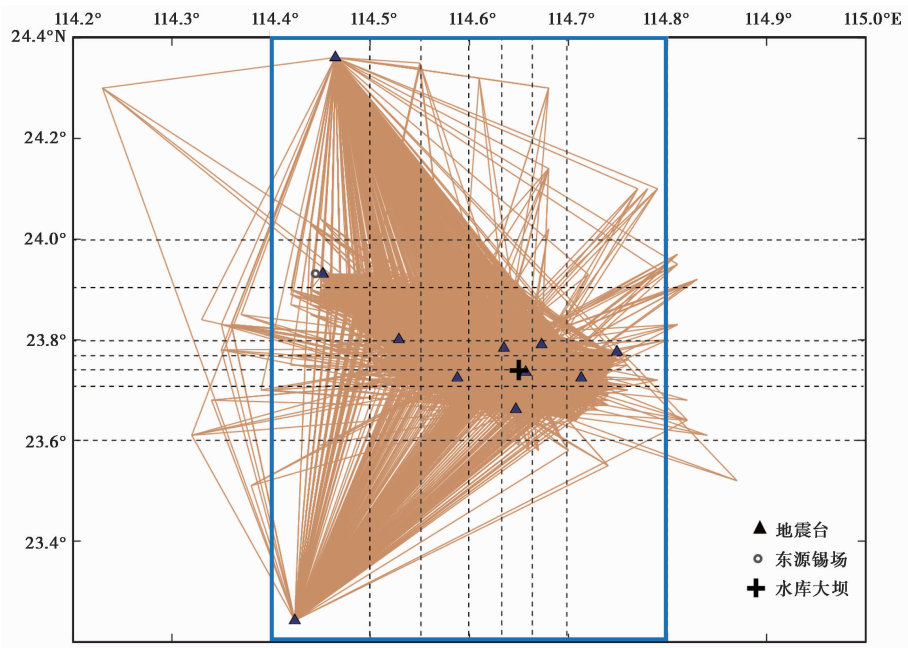


图 2 研究区地震 ($M_L \geq 1.0$) 与台站射线分布以及网格划分方案
实线框为研究区域

密度较高,边缘区域密度略低,进行速度结构反演时射线最密集的区域按 $0.03^{\circ} \sim 0.05^{\circ}$ 间距划分,外围地区按 $0.1^{\circ} \sim 0.4^{\circ}$ 划分(图 2)。

2.2 初始速度模型

进行反演计算前,据相关文献^①(郑圻森等,2003,2004;江西省地质矿产局,1984;闻则刚

① 范玉兰等,1988,华南地区走时表

等,2005;姚伯初等,1994;徐辉龙等,2006;赵明辉等,2004)得到了研究区域地壳各深度的 S 波速度及部分深度的 P 波速度,对于未能查找到的部分深度的 P 波速度则使用插值法获得,最终确定了研究区地壳速度结构模型(表 1)。

表 1 本文使用的初始地壳速度模型

深度/km	0	5	10	15	20	25	31	40
S 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.25	3.48	3.65	3.66	3.67	3.73	3.92	4.58
P 波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	4.92	5.50 *	5.80	5.98	6.40	6.50	6.82	7.98
纵横波速比	1.51	1.58 *	1.59	1.63	1.74	1.74	1.74	1.74

注: * 为插值法估算得到的地壳速度数据。

2.3 分辨率分析

本文采用检测板方法估算解的分辨率和可靠性。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的随机误差(扰动值取正常值的 $\pm 3\%$)后作为观测数据进行反演,比较反演结果与检测板间的相似程度作为解的可靠性估计。该区地震震源主要集中在从水库大坝往 NW 方向延伸至东源锡场、深度为 5~15km 的地壳内,检测板结果(图 3)与地震密集区域一致,震源深度超过 15km 则分辨率下降,此外,库区东北以及西南角由于射线密度稍差,分辨率下降,因此,本文仅讨论水库大坝至东源锡场间地震密集区域的速度结构。

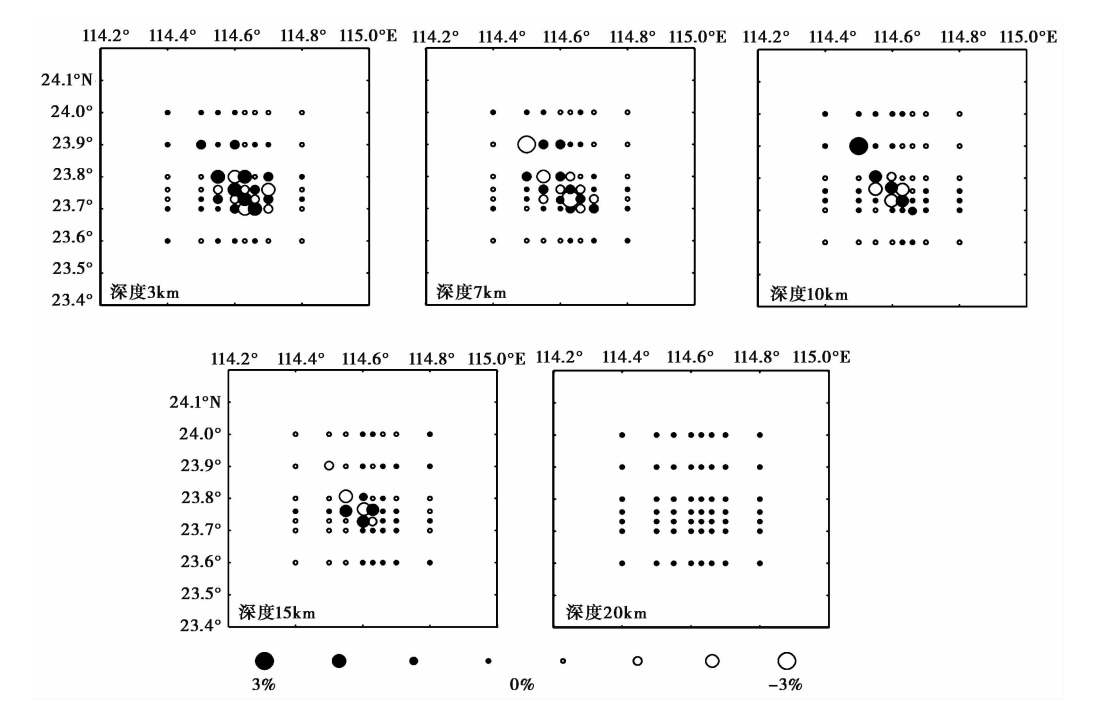


图 3 不同深度 P 波检测板分辨实验的检测结果

3 P 波速度结构、序列空间分布与活动构造

为更直观地反映新丰江库区 P 波速度结构特征,对反演的三维模型选取几组典型的剖面(图 4)进行分析:一是分别穿过东源锡场、水库大坝的 EW 向 AB、CD 剖面;二是穿过东源锡场的 SN 向 GH 剖面;三是穿越整个库区的 NW-SE 向 EF 剖面以及垂直于新丰江地区 2 条最重要的 NE 向断裂(河源断裂(F_1)、人字石断裂(F_2))的 NW-SE 向 MN 剖面。

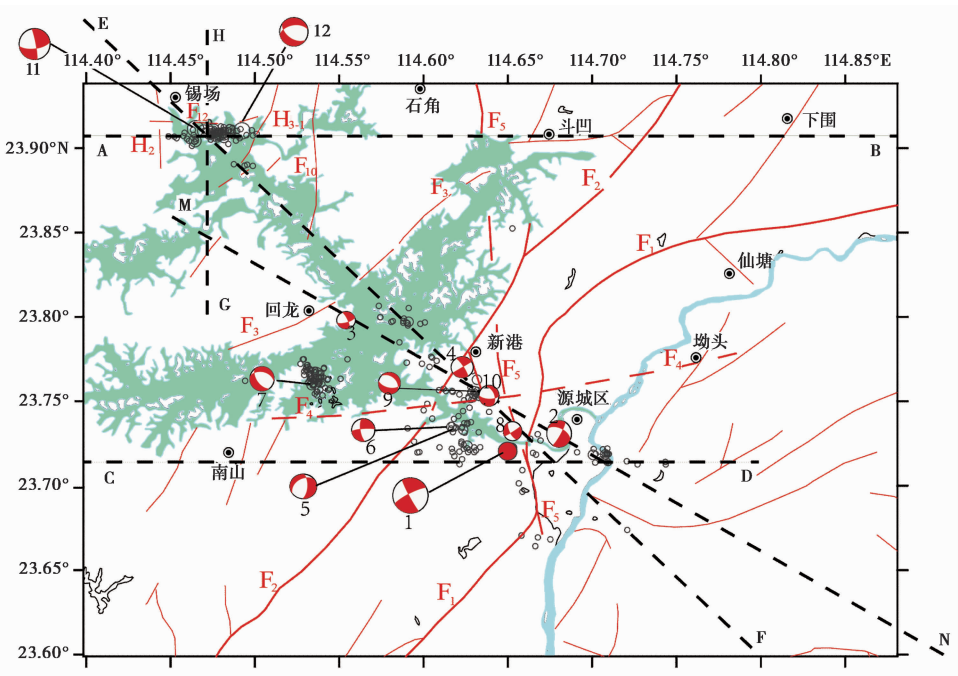


图 4 新丰江地区地震(2007 年 6 月~2014 年 7 月 $M_L \geq 1.5$ 的及有震源机制的)震中、构造及剖面线位置

F_1 河源断裂; F_2 人字石断裂; F_3 大坪-岩前断裂; F_4 南山-坳头断裂; F_5 石角-新港-白田断裂; F_{10} 兰屋-太和洞断裂; F_{12} 大坑南推断断裂; H_2 锡场向斜; H_{3-1} 乌石门至渔潭褶皱群

1.1962-03-19 6.1 级地震;2.1964-09-23 5.1 级地震;3.1971-02-25 3.5 级地震;4.1972-12-18 4.1 级地震;5.1975-07-25 4.3 级地震;6.1977-05-12 4.2 级地震;7.1987-09-15 4.7 级地震;8.1999-03-25 4.2 级地震;9.1999-08-20 4.7 级地震;10.2012-08-31 4.0 级地震;11.2012-02-16 4.8 级地震;12.2013-02-16 4.7 级地震;第 1~9 号地震震源机制解来自魏柏林等(2001);第 10~12 号地震震源机制解来自内部资料^②

3.1 CD、MN 剖面

CD 剖面穿越了 1962 年 6.1 级地震震源区以及区内 3 条重要的断裂,即 NE 向河源断裂(F_1)、人字石断裂(F_2)以及 NNW 向石角-新港-白田断裂带(F_5)(图 5(a))。MN 剖面则与人字石断裂(F_2)、河源断裂(F_1)近乎垂直,能更好地反映断裂的产状特征(图 5(b))。

② 广东省地震局,2013,2014 年度广东省地震趋势研究报告

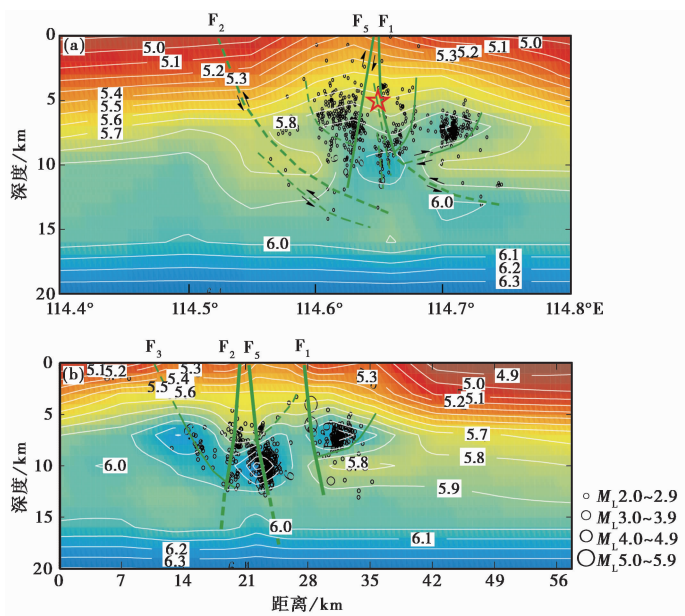


图 5 P 波速度剖面及 $M_L \geq 1.0$ 地震 (2007 年 6 月~2014 年 7 月) 空间分布
(a) CD(EW 向) 剖面; (b) MN(NW-SE 向) 剖面

红色五角星为 1962 年新丰江 6.1 级地震; F_1 河源断裂; F_2 人字石断裂; F_3 大坪-岩前断裂; F_5 石角-新港-白田断裂

人字石断裂(F_2)呈 NE-SW 向纵贯全区,东北段由若干分支断层呈雁行排列,走向 $N50^\circ E$,倾向 SE,倾角 $60^\circ \sim 80^\circ$ 不等;西南段走向 $40^\circ N \sim 45^\circ E$ ^{③④}。石角-新港-白田断裂带(F_5)由许多条大小不等的断裂组成,是新活动性表现最为突出的断裂构造,其北段走向 NNW,倾向 SWW,倾角 $65^\circ \sim 75^\circ$;南段由 1 组走向 NNW 的断裂组成(丁原章,1989)^⑤。河源断裂(F_1)大致可分为北段、中段和南段,MN 剖面经过之处为中段,呈 NNE 走向,倾向 SEE,倾角相对较缓(丁原章,1989)^{③④}。

图 5 剖面清楚地揭示了 F_1 、 F_2 、 F_5 等 3 条断裂的下倾位置与产状。河源断裂(F_1)倾向 SE,在浅部倾角较大,深度超过 10km 后倾角转缓,断裂西盘埋深 10~13km 处存在横截面约 $4\text{km} \times 3\text{km}$ 的速度为 6.0km/s 的高速体,有 1 组小震活动穿越高速体(图 5(a))。1962 年 6.1 级地震震源位于高速体上部的高速度梯度带上,该处近年来小震较少,但不排除 F_1 上盘存在与密集小震相关的反倾(NW 倾)次级分支断裂。图 5(a)揭示,石角断裂(F_5)上密集的小震震源主要集中分布在该断裂上盘 5~10km 的深度,紧贴西盘密集小震活动区的东缘朝 SWW 向陡倾,不排除在该断裂西盘存在与密集小震相关的反倾(NEE 倾)的次级分支断裂。地质研究表明,石角断裂(F_5)由多条断裂组成,航磁异常显示,其为本区切割最深的 NNW 向断裂系统(丁原章,1989)。人字石断裂(F_2)倾向 SE,倾角较大(图 5(b)),其南段(图 5(a))断裂断面所在区域为低速区,近几年小震活动不显著,不排除下部有平行分支断裂;人

③ 广东省地质局新丰江地质队,1964,广东省河源新丰江地区构造系统的初步研究
④ 广东省地质局新丰江地质队,1964,广东河源新丰江地区地震活动与地质构造的关系
⑤ 广东省地震预报研究中心,2006,新丰江水库诱发地震研究

字石断裂(F_2)中段(图 5(b))小震明显较南段活跃,小震活动截止于高速体下部约 14km 处。

3.2 AB、GH 剖面

AB、GH 分别为东源锡场 EW、NS 向剖面(图 6)。1962 年 6.1 级地震后,新丰江库区的地震活动主要集中在库区大坝、上游大坝峡谷区以及库区中部等,2012 年 2 月 16 日锡场 4.8 级地震后,地震活跃区域向 NW 转移,东源锡场成为库区新的地震活跃点。据文献资料,锡场附近最主要的构造为 SN 向的兰屋-太和洞断裂(F_{10}),其南北长约 17km,东西宽 6~10km;另一条 SN 向构造为经过锡场镇西侧的锡场向斜(H_2),其南北可见长约 3km(部分淹没在水库中),东西宽约 4km;在 2 条 SN 向断裂之间存在 1 条近 EW 向地表没有出露、由重磁资料推断的大坑南推断断裂(F_{12})。

由 AB 剖面推断,锡场向斜(H_2)倾向东侧,埋深超过 15km,浅部倾角较大,深度超过 13km 后倾角转缓,东盘埋深 8~12km 处存在 1 个横截面约 6km×7km 的中心速度达 6.2km/s 的高速体,2012 年以来东源锡场的地震活动主要分布在 H_2 东盘高速体的西段。兰屋-太和洞断裂(F_{10})同样倾向东侧,高速体位于 2 条 SN 向断裂 H_2 、 F_{10} 之间。114.7°E 以东区域还存在石角断裂(F_5)、人字石断裂(F_2),但由于锡场 NE 方向没有近距离地震台,这使得模型分辨率下降,因此,本文不作讨论。由图 6(b)可见,震源集中分布在埋深 5~14km 处,倾角约 80°,向南倾。震源位置在地表的投影与大坑南推断断裂(F_{12})的走向、位置基本一致。

4 讨论

(1)利用主动源深地震探测获得的沿英德-河源-陆河剖面(NW-SE)的速度结构显示,剖面穿越新丰江库区(杨卓欣等,2011),与本文的 EF 剖面走向一致。此外,叶秀薇等(2013)以 0.1°×0.1°网格对河源地区进行了 P 波速度结构反演。上述 2 组研究结果均显示,东源锡场至河源源城区间存在 1 个相对高速体,速度达 6.1km/s,河源一端深度为 3.5~8.5km,东源锡场一端略深,深度延伸至约 10km。随着小震记录的大量增加,本研究进一步细分网格,在水库大坝至东源锡场核心区域采用 0.03°~0.05°网格划分,得到了 NW-SE 向(EF)剖面(图 7)。由图 7 及杨卓欣等(2011)、叶秀薇等(2013)的 EF 剖面图可见,本研究结果分辨率更高,库区大坝至东源锡场间的高速体并不是 1 个完整连续的块体,而是由 4 个大小不等的高速体组成。其中,锡场下方的高速体 I 体积最大(横截面约 6km×7km),速度最高,中心速度达 6.3km/s;水库大坝下方 NW 侧高速体 III 次之(横截面约 5km×6km),速度次之,中心速度亦达 6.2km/s;其余 2 个体积较小,中心速度分别为 6.2、6.1km/s。

(2)图 5、7 剖面清楚地揭示,库区大坝下方在人字石断裂(F_2)、南山-坳头断裂(F_4)、石角断裂(F_5)、河源断裂(F_1)等切割的区域,深度 7~8km 之上的上地壳不同波速层的界面表现出明显的上拱变形,而在深度 10~15km 处沿主要断裂出现波速层界面的下凹变形。这反映了库区大坝下方存在大体以 F_1 、 F_2 、 F_4 、 F_5 等为中心的强烈构造变形区。

(3)在库区西北角东源锡场下方的以往并未引起重视的近 SN 向锡场向斜(H_2)、近 EW 向大坑南推断断裂(F_{12})的深度均达到 15km(图 6),由于埋深超过 15km 后分辨率下降,因此,上述 2 组断裂埋深是否大于 15km,有待其它方法的验证。库区中部的南山-坳头断裂

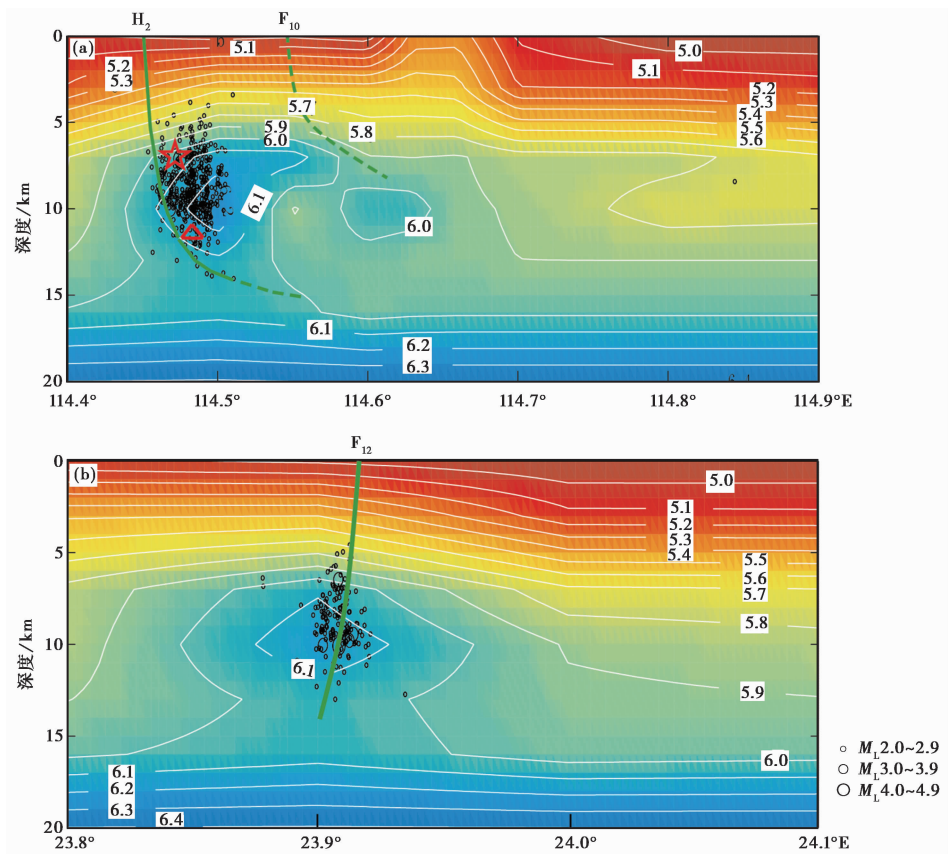


图 6 P 波速度剖面及地震 ($M_L \geq 1.0$) 空间分布
(a) AB 剖面; (b) GH 剖面

F_{10} 兰屋-太和洞断裂; F_{12} 大坑南推断断裂; H_2 锡场向斜; 红色五角星为 2012 年 2 月 16 日东源 4.8 级地震; 红色三角形为 2013 年 2 月 22 日东源 4.7 级地震

(F_4) 以及河源断裂(F_1) 南段(图 5)在深度 10km 左右倾角已显著转缓, NW-SE 向速度剖面(图 7)亦反映出库区西北部的震源深度要大于南部, 整个库区的断裂大体上呈现自 ES 向 WN 逐步加深的趋势, 这与新丰江地区重力场背景的研究结果一致^⑥。

(4) 1962 年新丰江 6.1 级地震后, 迄今为止该区域共发生 13 次 $M_L \geq 5.0$ 地震, 其中, 9 次发生在前述 4 个高速体边缘高速梯度带上(图 7), 这种高、低速多层相间的结构显示了地壳层间相邻物质性质的差异, 该差异利于层间滑动, 也有利于应变能的积累和释放(刘福田等, 1986), 因而地震多发于这种速度梯度较大的区域。其中, 高速体 IV 在水库蓄水初期地震最为活跃, 发生了包括 6.1 级地震在内的 5 次 $M_L \geq 5.0$ 地震, 能量释放较为彻底。而体积最大、速度最高的高速体 I 自 2012 年开始打破平静, 出现中等地震活跃现象, 发生了 2 次 $M_L \geq 5.0$ 地震, 5 次 $M_L 4.0 \sim 4.9$ 地震, 且 b 值扫描结果显示, 在 2 次 $M_L \geq 5.0$ 地震后该高速体

⑥ 广东省地质局新丰江地质队, 1964, 广东河源新丰江地区地球物理探测的主要地质成果

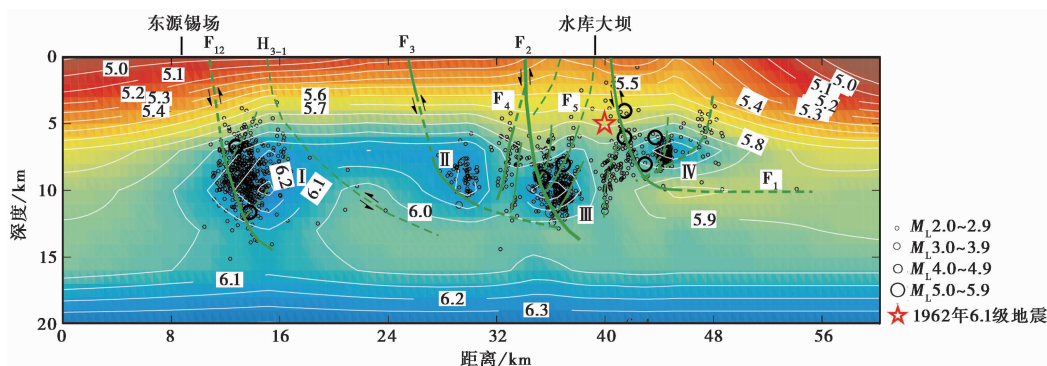


图7 EF向P波速度剖面及 $M_L \geq 1.0$ 地震震源分布

F_1 河源断裂; F_2 人字石断裂; F_3 大坪-岩前断裂; F_4 南山-坳头断裂; F_5 石角-新港-白田断裂; F_{10} 兰屋-太和洞断裂; F_{12} 大坑南推断裂; H_2 锡场向斜; H_{3-1} 乌石门至渔潭褶皱群; I~IV 高速体编号

边缘 b 值出现显著下降^⑦,因此,对于东源锡场下方位于断层面上的高速体I,目前虽 b 值较小,但不排除发展为中强震孕震凹凸体(Aki,1984)的可能。

(5)东源锡场2012年4.8级、2013年4.7级地震序列的空间分布呈近EW向展布(图8), $M_L \geq 1.0$ 地震贯穿了高速体的西侧及中部(图6),近SN向兰屋-太和洞断裂没有发生 $M_L \geq 1.0$ 地震,故未参与锡场2012年至今的地震活动。结合前述锡场地区P波速度结构及活动构造产状、序列空间分布、2次地震震源机制(图4)、破裂面及破裂方式(叶秀薇等,2013)等初步判断,近EW向大坑南断裂(F_{12})与近SN向锡场向斜(H_2)参与了东源锡场2012年至今的地震活动。

(6)潘建雄等(1982)、丁原章(1989)、丁原章等(1983)、沈崇刚等(1974)的研究显示,水库蓄水初期,大部分地震发生在蓄水至高水位时,震源极浅,1962年6.1级地震震源深度为5km。水库载荷在库基岩体中产生的位移场和应力场的影响主要在库区浅部,3~5km深度上水平位移已几乎为0,5km以下深度影响很弱(王妙月等,1976)。由本文的定位结果可见,2007年以来库区大坝附近震源深度为6~9km,较蓄水初期深,往NW方向过了河源断裂(F_1),震源加深,为7~13km,东源锡场的震群震源同样集中在该深度范围,与广东其他非水库地区的地震震源深度相当。2012年至今东源锡场2次4.5级以上地震均发生在2月的枯水期且库水位变化较小,这表明地震活动与库水位变化间的关系不大,震源深度亦远大于5km,因此,本文得到的定位结果不支持2012年至今东源锡场的震群活动与水库蓄水相关的认识。

5 结论

(1)东源锡场至河源城区区间存在4个大小不等的高速体,其中,锡场下方的高速体I体积最大(横截面约6km×7km),速度最高,中心速度达6.3km/s;水库大坝下方NW侧高速体III次之(横截面约5km×6km),速度次之,中心速度亦达6.2km/s;其余2个体积较小,中心

⑦ 广东省地震局,2015,2016年度广东省地震趋势研究报告

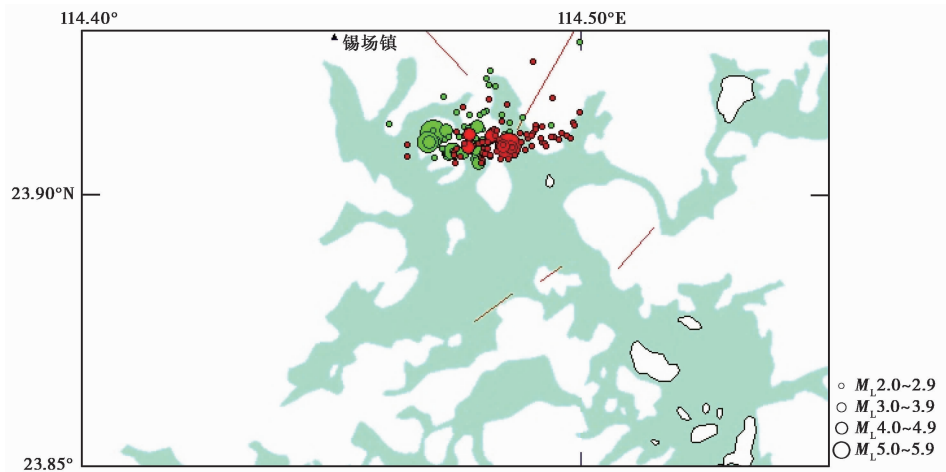


图 8 东源 2 次 4.5 级以上地震序列重新定位后震中分布
绿色圆圈为 2012 年 2 月 16 日~3 月 31 日 $M_L \geq 1.0$ 地震;
红色圆圈为 2013 年 2 月 22 日~4 月 16 日 $M_L \geq 1.0$ 地震

速度分别为 6.2、6.1km/s。

(2)新丰江水库大坝下方存在大体以河源断裂(F_1)、人字石断裂(F_2)、南山-坳头断裂(F_4)、石角-新港-白田断裂(F_5)等为中心的强烈构造变形区。

(3)整个库区的断裂大体上表现为自 ES 向 WN 逐步加深的趋势。近 EW 向大坑南断裂(F_{12})与近 SN 向锡场向斜(H_2)参与了东源锡场 2012 年至今的地震活动,本文得到的定位结果不支持 2012 年至今东源锡场的震群活动与水库蓄水相关的认识。

致谢:中国地震台网中心周龙泉研究员为本研究提供速度结构和震源深度联合反演的计算程序,广东省地震监测中心提供了高质量的震相报告,闻学泽研究员对速度剖面构造解释提出了宝贵意见并给予帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

陈益明,1982,新丰江水库地震及其小震震源机制的研究,华南地震,2(3),64~71。
丁原章,1989,水库诱发地震,北京:地震出版社。
丁原章、潘健雄、肖安予等,1983,新丰江水库诱发地震的构造条件,地震地质,5(3),61~74。
丁原章、王仁、孙菊英等,1992,深层构造新活动性的影响——新丰江水库区构造的三维数学模拟计算,中国科学:B 辑,(2),194~205。
郭贵安、冯锐,1992,新丰江水库三维速度结构和震源参数的联合反演,地球物理学报,35(3),331~342。
郭贵安、刘特培、秦乃岗等,2004,新丰江水库 1961~1999 年小震综合机制解结果分析,地震学报,26(3),261~268。
江西省地质矿产局,1984,江西省区域地质志,北京:地质出版社。
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。
刘福田、曲克信、吴华等,1986,华北地区的地震层析成像,地球物理学报,29(5),442~449。
马宏生、张国民、周龙泉等,2008,川滇地区中小震重新定位与速度结构的联合反演研究,地震,28(2),29~38。
潘建雄、肖安予,1982,新丰江水库区地震构造及其活动特征的初步研究,地震地质,4(2),53~58。

- 潘素珍、张先康、杨卓欣等,2007,伽师强震群区上地壳三维速度层析成像——人工爆破和天然地震的联合反演,地球物理学报, **50**(5), 1456~1463。
- 沈崇刚、陈厚群、张楚汉等,1974,新丰江水库地震及其对大坝的影响,中国科学, (2), 184~205。
- 王妙月、杨懋源、胡毓良等,1976,新丰江水库地震的震源机制及其成因初步讨论,地球物理学报, **19**(1), 1~17。
- 魏柏林、陈彪龙,1991,新丰江地震震源机制解及构造应力场,地震学报, **13**(4), 462~470。
- 魏柏林、冯绚敏、陈定国等,2001,东南沿海地震活动特征,北京:地震出版社。
- 闻则刚、杨马陵、叶秀薇等,2005,广东省东部地区的 S 波速度结构,西北地震学报, **27**(2), 154~157。
- 邓辉龙、丘学林、赵明辉等,2006,南海东北部南澳大地震 ($M=7.5$) 震中区的地壳结构特征与震源构造,科学通报, **51**(增刊 II), 83~91。
- 杨卓欣、刘宝峰、王勤彩等,2011,新丰江库区二维 P 波速度结构:英德-河源-陆河深地震测深剖面探测结果,地球物理学进展, **26**(6), 1968~1975。
- 姚伯初、曾维军、Hayes D E 等,1994,中美合作调研南海地质专报 GMSCS,武汉:中国地质大学出版社。
- 叶秀薇、黄元敏、胡秀敏等,2013,广东东源 M4.8 地震序列震源位置及周边地区 P 波三维速度结构,地震学报, **35**(6), 809~819。
- 赵明辉、丘学林、叶春明等,2004,南海东北部海陆深地震联测与滨海断裂带两侧地壳结构分析,地球物理学报, **47**(5), 845~852。
- 郑圻森、朱介寿、曹家敏等,2004,华南地区岩石圈地壳速度结构数据处理,物探化探计算技术, **26**(2), 97~100。
- 郑圻森、朱介寿、宣瑞卿等,2003,华南地区地壳速度结构分析,沉积与特提斯地质, **23**(12), 9~13。
- 周龙泉、刘福田、陈晓非,2006,三维介质中速度结构和界面的联合成像,地球物理学报, **49**(4), 1062~1067。
- 周龙泉、刘杰、马宏生等,2009,2003 年大姚 6.2 级、6.1 级地震序列震源位置及震源区速度结构的联合反演,地震, **29**(2), 12~24。
- 周龙泉、刘杰、张晓东,2007,2003 年大姚 6.2 和 6.1 级地震前三维波速结构的演化,地震学报, **29**(1), 20~30。
- Aki K, 1984, Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction, J Geophys Res, **89**, 5867~5872。
- 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。
- Crosson R S, 1976, Crustal structure modeling of earthquake data. 1. Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters, J Geophys Res, **81**, 3036~3046。
- Kissling E, Ellsworth W L, Eberhard-Phillips D, et al, 1994, Initial reference models in local earthquake tomography, J Geophys Res, **99**, 19635~19646。
- Michael A J, 1988, Effects of three-dimensional velocity structure on the seismicity of the 1984 Morgan Hill, California, aftershock sequence, Bull Seism Soc Am, **78**, 1199~1221。
- 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。
- 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 late area, Central California, J Geophys Res, **88**, 8226~8236。
- 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。

3D P-wave velocity structure and active tectonics in the Xinfengjiang area of Guangdong

Ye Xiuwei Huang Yuanmin Liu Jiping

Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China

Abstract In this paper, we determined earthquake sequence location in the Xinfengjiang area from June 2007 to July 2014 and 3D P-wave velocity structure by a simultaneous inversion method. On that basis, we studied the occurrence features of active tectonics and the earthquake source mechanism. The results show the reservoir fracture system has the tendency of increase with the gradual depth from southeast to northwest, consistent with the gravitational field research results. There are 4 high velocity zones (HVZ) under the depth of 7–12km crust between the Xinfengjiang Reservoir dam and Dongyuan Xichang district. The max velocity of the biggest HVZ which is under Xichang is 6.3km/s. Under the reservoir dam there is a strong tectonic deformation zone, as the center exit Renzishi fault F_2 , Nanshan-Aotou faults F_4 , Heyuan fault F_1 and Shijiao-Xingang-Baitian fault F_5 . 7 earthquakes with $M_L \geq 5.0$ (including $M6.1$ in March 1962) occurred at the high gradient zone of the HVZ III and HVZ IV edge which is under the reservoir dam since 1960, relativity energy releasing more thoroughly. Moderate seismic activity occurred at the HVZ I edge which is under Xichang since 2012, which is the dangerous zone of $M5.0$ earthquakes in the future.

Key words: P-wave velocity structure; Active tectonics; Simultaneous inversion method; Xinfengjiang reservoir