

福建—台湾地区地壳构造及其显示的 动力学构造研究*

李祖宁¹, 郑 勇², 熊 熊², 林 树¹, 陈祥熊¹, 鲍 挺¹, 陈 光¹

(1. 福建省地震局, 福建 福州 350003; 2. 中国科学院测量与地球物理研究所
大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077)

摘要: 基于已有的地壳三维速度结构, 结合福建—台湾地区的地貌和构造特征, 分析了地壳三维速度结构与该区域构造的关系。结果显示: (1) 浅层的速度结构与该区的地貌、地形及地质特征有较好的对应关系, 福建主要的地热区漳州盆地和福州盆地都呈现明显的低速异常, 尤其是漳州盆地的低速异常一直延伸到较深的深度; (2) 福建地区的地壳运动、断裂活动和地震活动存在明显的南北差异, 与地壳速度结构分布对应关系较好, 南部的中上地壳呈现低速而北部中上地壳呈现高速; (3) 在一些大型活动断裂带的两侧存在明显的速度结构差异, 如在福建构造活动最为强烈的滨海断裂带两侧在 15 km 深度的速度结构剖面上显现明显的差异, 这也解释了福建地区地震活动的震源深度大多位于 15 km 之上的现象; (4) 台湾地区的大多数强震一般发生在板块碰撞或俯冲的高速带上, 并形成明显的贝里奥夫带, 台湾地区的强震活动与该地区的复杂的板块结构及其运动密切相关。

关键词: 福建—台湾地区; 三维速度结构; 构造性质; 地震活动性

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)01-0029-10

0 引言

台湾地区位于太平洋板块、菲律宾板块和欧亚板块的交汇、俯冲部位 (Teng, 1990), 是我国地震活动最强烈的地区之一。台湾及台湾海峡地区强烈的构造运动和地震活动对福建地区有明显的影响, 尤其是位于台湾海峡西侧的滨海断裂带的泉州海外段和金门海外段是自晚更新世—全新世以来迄今仍在活动的断裂 (Ho, 1986), 其较强烈的近代构造活动和所发生的大地震对福建沿海有明显影响。和一般俯冲带不同, 台湾及其周边区域存在着复杂的大陆碰撞和俯冲作用, 在台湾南部, 欧亚板块向菲律宾板块下部俯冲, 而在其中北部, 菲律宾板块则俯冲到冲绳岛弧下面。由于存在这些复杂的构造过程, 台湾—福建地区的地震构造非常复杂, 既有浅层地震, 又有深层地震。为了弄清楚台湾—福建地区的地震分布及其发震构造, 必须要了解其地壳和上地幔结构特征和运动变形机制 (Hsu *et al*, 2009), 因此利用地震波资料研究这一区域的深部结构, 探讨地震发生的深部构造环境和动力来源具有

十分重要的意义。

近十几年, 地震层析成像技术已广泛应用于探查多尺度的地球内部不均匀结构。三维地壳速度结构反演目前发展迅速, 是地震层析成像技术的重要组成部分, 高分辨率的地震层析成像不仅是研究地球内部结构和动力学过程是一个前沿课题, 也是未来资源勘查的战略选择。已有很多学者利用台湾密集的数字地震台网资料反演了台湾地区下部的速度结构 (Rau, Wu, 1995; Ma *et al*, 1996; Chen *et al*, 2001; Wu *et al*, 2007; Liu *et al*, 1997), 而对福建地区包括台湾海峡的研究仍然比较少。虽然通过沿海人工地震测深资料研究, 获得了该地区局部区域的一些二维速度结构 (廖其林等, 1988; 章惠芳等, 1988), 但高精度的三维速度结构, 特别是速度结构与该区域板块构造的关系等方面的研究仍然比较薄弱。

随着福建和周边区域数字地震台网的建立和逐步加密, 近年来已经积累了大量的地震波资料, 为地震学层析成像研究提供了必要的条件。黄金莉 (2008) 等利用层析成像方法, 研究了福建和台湾海峡地区的地壳 P 波速度结构, 为了解和认

* 收稿日期: 2013-09-10.

基金项目: 地震公益性行业科研专项项目 (201308013) 和福建省科技计划项目 (2002Y004) 共同资助.

识该区域的构造特征以及演化提供了参考。Zhou 等 (2012) 通过噪声层析成像以及地震波数据反演了华南地区的地壳面波频散图, 获取了地壳和上地壳的剪切波速度结构。虽然该结果只得到了福建和华南地区的速度结构, 没有涉及台湾海峡以及台湾岛地区, 但也对认识福建地区的构造性质提供了参考。由于 P 波和剪切波对地下介质异常的响应存在不同, 综合分析 P 波和剪切波的速度结构差异, 对了解地下物质的组成、密度以及温度等信息有重要的意义。因此, 本文将基于黄金莉等 (2008) 获得的 P 波层析成像结果, 并结合该区域的地震活动性资料对 ($22^{\circ} \sim 28^{\circ} \text{N}$, $116^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$) 区域范围内的地壳速度结构进行分析, 探讨地壳速度结构所显示的地质和构造特征及其对应的构造动力学性质。

1 台湾—福建地区地震层析成像结果简介

黄金莉等 (2008) 收集了 1990 ~ 2007 年福建地震台网先后运行的 35 个台站记录的福建及台湾地区大量的地震到时资料 (1999 年以前为模拟地震记录数据), 且选取的每个事件至少有 10 个以上的到时数据。同时, 为避免不可靠的资料对反演结果的影响, 程序中对参与反演资料的残差进行了限制, 残差超过限度的地震射线将不参与反演。考虑到利用福建台网数据定位台湾地震精度较差, 因此尽量采用台湾地震台网的定位结果, 并且采用了区分大区域和小区域的两套反演方案 (图 1) 分别对反演结

果进行分辨率检验, 并对结果进行了比较分析, 从而获取可靠的速度模型结果。

由图 2 可见, 各个深度层面上中心区域 (跨台湾海峡) 的射线数分布相当密集, 射线数达 1 万多条, 而大部分区域的射线数也在 3 000 ~ 4 000 条以上, 一些边缘地区的射线数在 10 至几百条范围内, 射线数越密集的区域, 反演结果的分辨率也越高。尤其在 15 km 深度, 红色区域面积最大, 分辨率最高。这为我们判断不同区域反演结果的分辨率和可靠性提供了一个依据。

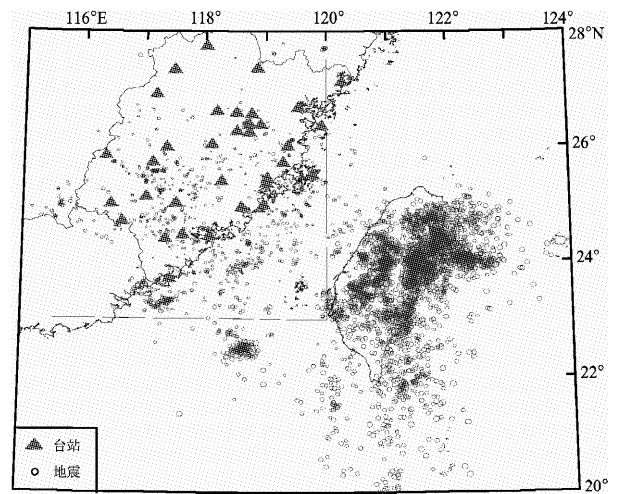


图 1 研究区范围及研究所用的地震 (1990 ~ 2007 年) 和台站分布 (左上角黑色框内为福建小区域部分)
Fig. 1 The range of the studied area, and distribution of earthquakes from 1990 to 2007 and seismic stations in the study (the illustration in the left top is the small area of Fujian)

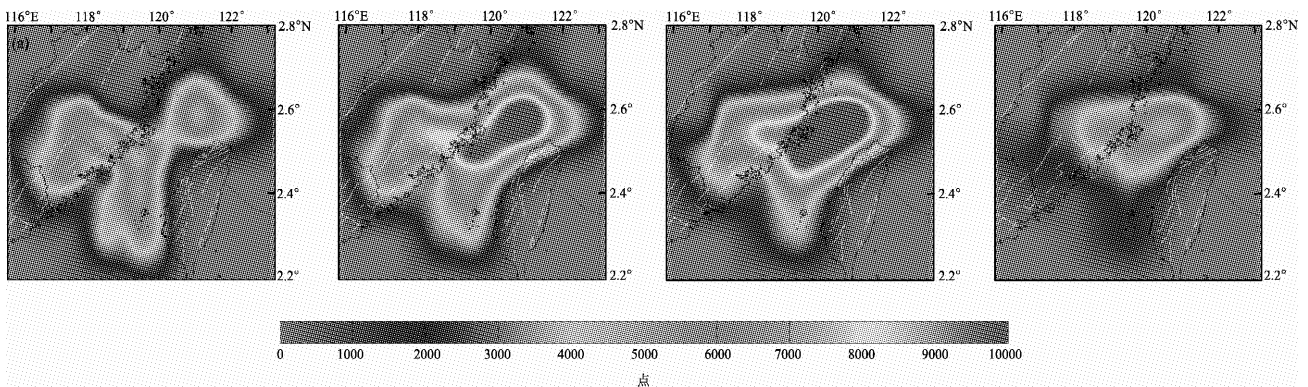


图 2 不同深度的地震射线密度分布

(a) 1 km; (b) 6 km; (c) 15 km; (d) 28 km

Fig. 2 Distribution of ray path density in different depth

(a) 1 km; (b) 6 km; (c) 15 km; (d) 28 km

在层析成像反演中, 黄金莉等(2008)采用了Zhao等(1992)提出的利用地震到时数据进行地震层析成像的方法进行分析。该方法广泛应用于许多不同构造特点的地区(Zhao *et al.*, 1996, 1997; Zhao, 1992, 1994, 2001a, 2001b; Huang *et al.*, 2002; Huang, Zhao, 2004, 2006; 黄金莉等, 2001; 黄金莉, 赵大鹏, 2005; Paige, Saunders, 1982), 其数据适应性强, 结果可靠性高。该方法的主要思想是通过阻尼最小二乘法(LSQR)求解大型稀疏的观测方程组, 非线性层析成像问题通过迭代的线性反演求解。在每一次的迭代中震源参数和速度结构可同时反演, 也可将部分定位结果较好的地震震源的位置固定, 只求各节点的速度扰动。为快速、精确地计算理论走时和地震射线路径, 采用迭代应用伪弯曲技术和Snell定律进行三维射线追踪(Zhao *et al.*, 1996; Um, Thurber, 1987)。反演中使用一维地壳速度初始模型, 在参考本地区人工地震剖面解释以及地球物理的研究结果(廖其林等, 1988; 章惠芳等, 1988; 陈祥熊等, 2005)的基础上, 构建了一个三层的一维速度模型作为初始速度模型(图3)。由于本地区处于大陆地壳与海洋地壳的过渡地带, 莫霍面的深度变化较大, 因此反演中所用的初始模型取莫霍面平均深度为33 km, 此深度为福建和台湾陆地区域莫霍面的平均深度(马杏垣, 1989), 和CRUST2.0模型莫霍面深度34 km也很接近(Lask, Master, 1997; Mooney *et al.*, 1998)。

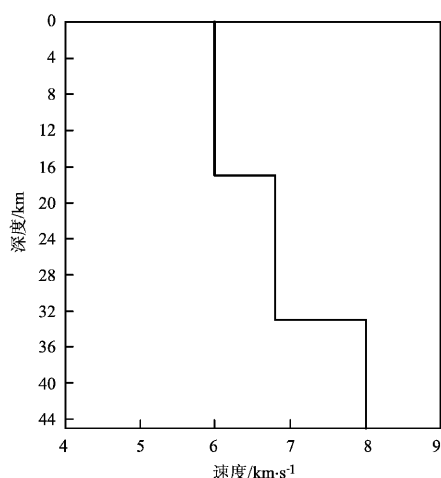


图3 一维初始速度模型(陈祥熊等, 2005)

Fig. 3 The one dimensional initial velocity model (Chen *et al.*, 2005)

由黄金莉等(2008)的层析成像的分辨率和检测板测试结果来看, 除边缘区外, 在1 km、15 km、28 km各深度层上, 都有很好的分辨率。6 km深度层上也正确地恢复了速度的正负异常, 但恢复的程度稍差。由此可见黄金莉等(2008)获得的P波速度结构结果较为可靠, 我们将以其反演结果为基础, 结合其他的层析成像结果以及该区域的构造性质等进行构造解释。

2 速度结构剖面分析及构造解释

由于台湾东部外海和福建西部边缘处于研究区域边缘, 结果可靠性较低, 因此本文的深部构造解释工作主要集中在福建沿海、台湾海峡和台湾本岛。这些地区位于研究区域中心, 射线密度较大, 检测板分辨率检测结果也说明这一地区的反演结果是较可靠的。为研究本区域深部P波速度结构及其与深、浅部构造的关系, 我们选取4个深度的P波速度结构的水平剖面图进行讨论(图4)。

2.1 浅层速度结构反映区域内的地形、地貌特征

从1 km的深度剖面看(图4a), 以台湾海峡中的滨海断裂带为界, 西部福建地区大部分为高速异常区(紫色区域), 在福建地区大范围高速分布的背景下, 如福州盆地、泉州盆地、漳州盆地、龙岩盆地等或者地势低洼区域出现小范围的低速异常(绿色到红色区域), 这体现了盆地沉积层的分布情况。台湾海峡北部为低速区, 南部为高速区, 澎湖隆起区则位于高速异常区。台湾本岛西部的平原区明显为低速, 而到中东部的高山区很快变为高速。

由区域地形图(图5a)可见: 福建地形以低山、丘陵为主, 由西、中两列山脉构成福建地形的骨架, 均呈东北—西南走向, 与海岸平行。沿海为狭窄的海湾平原, 境内分布有若干较大的第四纪沉积盆地——沿海的福州盆地、泉州盆地、漳州盆地以及闽西的龙岩盆地。台湾海峡海底地形比较复杂, 丘、谷相间, 起伏较大, 这是由于在形成台湾海峡时地壳变动和火山岩侵入而造成的。澎湖列岛和台湾浅滩生成于发生了断裂及形成了台湾海峡之后, 由沿裂缝溢出岩浆冷却而成。出露海面的为澎湖列岛, 未出露的为台湾浅滩。台湾本岛多山、地形复杂, 东部多山脉, 中部多丘陵, 西部多平原, 最大的嘉南平原位于台湾岛

的中西部。

总体而言, 1 km 深度上的地震波速异常分布与区域的地形特征较好的吻合。山脉、丘陵一般位于高速异常区; 平原、盆地一般位于低速异常区。反演结果基本上反映了本区域的地形特征。

2.2 深部的地震波速图像特征

随着深度的加深, 速度扰动异常的图像发生了明显变化。在 6 km 的深度层上 (图 4b), 福建大部分地区已由高速变为低速; 海峡地区基本上保持着 1 km 深度上速度异常南高北低的格局, 但南部的高速区向北扩大; 而台湾岛上西部的低速异常已向中部移动, 低速异常沿着中央山脉及花东纵谷大断裂从南到北贯穿整个台湾岛。

在 15 km 深度层 (图 4c), 以滨海断裂带为界, 西边的福建沿海大部分地区恢复为高速区, 东边的整个台湾海峡都为低速区, 澎湖隆起高速区东移到台湾岛上。台湾海峡的低速区可能与该区域岛弧后拉张构造有关, 表明该区域的强度相对较低。

在 28 km 深度层 (图 4d), 福建沿海高速区进一步向北、向西扩大, 覆盖了福建全省的大部; 除花莲地区外, 台湾海峡的低速区向东扩展几乎覆盖了全岛。

从浅部到深部的地震波速分布来看, 福建到台湾岛区域存在一个近东西向分布的西浅东深的低速带, 该低速带的倾向和分布状态可能反映了上地幔物质 (高温, 低速、柔性) 在上涌过程中的横向迁移特征, 同时存在着许多上地幔物质上涌的“通道”, 其形成机制可能与菲律宾板块的俯冲构造造成的台湾海峡拉张有关, 这可能说明“薄皮”模型或者碰撞挤压 (Mooney *et al.*, 1998) 不是造成台湾海峡和周边区域动力学形变的主要原因。

2.3 台湾海峡及滨海断裂带深部构造及其地震活动性探讨

从地震活动性来看, 位于台湾海峡西侧的滨海断裂带是福建沿海地震活动最强烈的地带。滨海断裂带的台湾海峡段是福建近岸海域内最大的一条晚第四纪或全新世活动断裂, 其展布始于平潭岛以东海域, 沿 $NE30^{\circ} \sim 50^{\circ}$, 南延至东山岛海外, 全长约 500 km, 整条断裂带被数条 NW 向的早第四纪断裂切割成三段 (平潭海外段、泉州海外段和金门海外段)。Wu 等 (1997) 研究表明,

滨海断裂带两侧海底地形有明显差异; 从重力布格异常分析, 该断裂带东、西两侧地壳厚度存在明显差异; 从磁力异常分析表明, 滨海断裂带是一条切穿地壳的断裂带。震源机制解和构造应力场的研究也表明, 研究区 (包括福建沿海、台湾海峡和台湾本岛) 现代构造应力场的主压应力方向一致为 NW 或 NWW 方向 (Hsu *et al.*, 2009)。

自有历史记载以来, 滨海断裂带及附近区域曾发生过 1 次 8 级地震, 2 次 7~7.3 级地震以及多次 6 级地震, 近期中、小地震活动频繁, 密集成带, 是东南沿海地震带上活动性最强烈的地区。这些地震都是浅源地震, 深度在 5~20 km (图 1)。

由图 4c 可见, 在 15 km 深度, 台湾海峡从东侧的台湾岛西海外的澎湖—玉里大断裂到西侧的滨海断裂带之间和台湾岛北部存在一大片呈北东向分布的低速区, 福建沿海和台湾西海岸则为高速区, 滨海断裂带和台西海外大断裂恰好位于高低速区的交界部位。

一般在高、低速区交界部位往往是地震孕育和发生的场所。滨海断裂带上的强烈地震大多发生在偏交界线的高速区一侧, 其平均震源深度也大约在这个深度 (图 1)。从构造演化的观点看, 根据台湾海峡新构造运动发展: 在晚第三纪时, 由于菲律宾板块沿北西方向在花莲附近与欧亚大陆板块碰撞、俯冲, 使其前方的上地幔物质上拱, 致使台湾岛与大陆逐渐解体, 形成了弧后凹陷——台湾海峡。在台湾西部及海峡内发育了数千米厚的上第三系弧后沉积 (黄昭, 王善雄, 2006)。15 km 深度剖面海峡和台湾东北部大片的低速区可能反映了这个过程。

2.4 台湾地区的地壳深部构造、活动断裂与地震活动性关系探讨

台湾地震构造区包括台湾省及其邻近海域, 是中国地震活动最频繁的地区之一。台湾位于环太平洋地震带西侧, 菲律宾海板块在台湾东部与欧亚大陆板块碰撞, 并沿北西方向在花莲附近海域向琉球岛弧下方俯冲、消减, 台湾东部纵谷是两大板块的“缝合带”。

两大板块的碰撞、挤压作用, 造成了强烈的“造山运动”, 形成台湾东部一系列北东走向的山脉 (如“中央山脉”现今仍有强烈活动)。板块碰撞边缘的挤压作用最强, 故台湾的地震大多数发

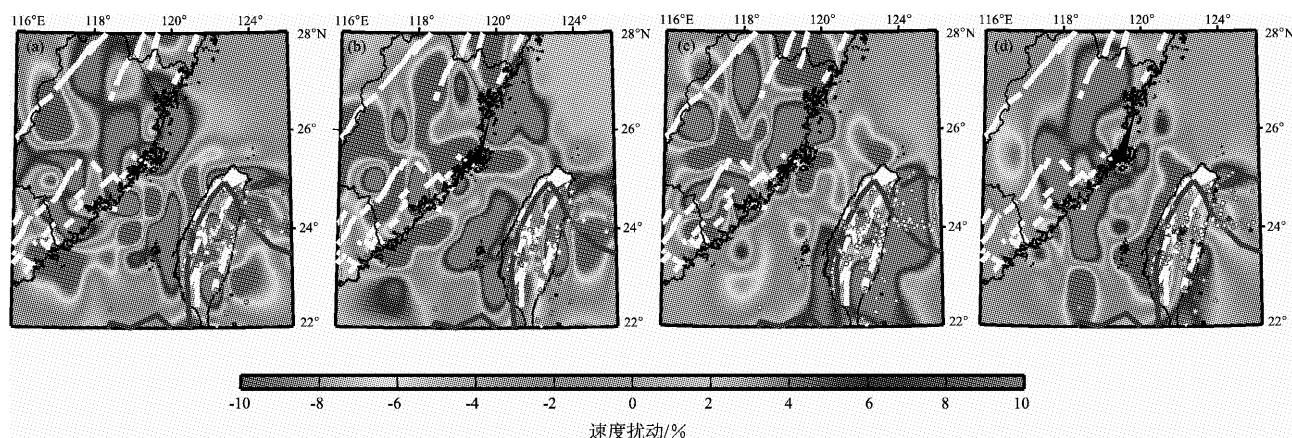


图4 研究区域不同深度P波速度异常水平剖面图

(a) 1 km; (b) 6 km; (c) 15 km; (d) 28 km

Fig. 4 P wave velocity maps at different depths in study region

(a) 1 km; (b) 6 km; (c) 15 km; (d) 28 km

生在花莲、宜兰外海，对本岛影响不大。而台湾本岛，由东到西六个地质单元，各地质单元间都有“界线断层”分割，这些“界线断层”大部分是呈北北东向的活动断层，容易引发强烈地震。台湾本岛强烈地震大多发生在这些“界线断层”上，如著名的集集大地震就发生在西部麓山带和西部沉积平原间的车龙埔—触口断层。台湾南部板块运动和地震活动模式与东、北部不同，南中国海板块在台湾岛西南侧向东运动（“南海盆地东扩”），过了屏东平原后，向东隐没在菲律宾板块之下，这里存在明显的“贝里奥夫带”，因此屏东平原“缺震”，地震多发生在台东外海。

为了解台湾本岛下部的深部构造，我们穿过台湾岛作了5条交叉的速度剖面（剖面A~E）。同时，为了研究福建内部的构造以及其与地震活动性的关系，在福建内部选取了2条东北—西南向的垂直剖面（剖面G，F），剖面位置如图5a所示，其中北西向三条剖面A、B、C跨越福建大陆、台湾海峡和台湾本岛；北东向两条剖面D、E跨越台湾本岛东、中部。

由图5可见，台湾地区大多数强震都发生在高速区内，尤其是宜兰和花莲外海（剖面C和D），这与菲律宾板块在花莲外海俯冲到台湾岛下面的高速板块带（或称“板舌”）有关。

由图4b可见，沿台湾中央山脉及一条大断裂，从南到北贯穿全岛，存在一条低速带。从图5d可见，这条低速带由地壳深部一直上升到接近中央山脉底部。这可能反映了中央山脉正下方存在一

条上地幔物质上涌的“通道”，大地震往往发生在中央山脉两侧的断裂带上，这些断裂带位于高、低速区的交界部位。集集地震就发生在这条“通道”西侧的车龙埔—触口断层上。中央山脉下方低速带的产生机制与上述台湾海峡低速带产生机制类似，可能与菲律宾板块在台湾东部海域与欧亚板块碰撞、俯冲有关。

2.5 福建大陆地区的深部构造、地震活动性及地热异常的关系

福建地区位于华南地震带内的东南沿海地震带，区内滨海断裂带及其邻近地区地震活动性最为强烈，对福建沿海的影响最大，而福建陆域地震活动稍弱。福建大陆地震活动的特点为：以闽江断裂带为界，南部地震活动性比北部强、东部沿海比西部内陆强，即所谓“南强北弱、东强西弱”的特点。

福建大陆存在着三条北北东—北东向的规模较大、延伸较长、切割深和活动性较强的断裂带（图6），即沿海的长乐—诏安断裂带（ F_3 ）；中部的政和—海丰断裂带（ F_4 ）以及西部的邵武—河源断裂带（ F_5 ），其中沿海的 F_3 断裂带活动性最强。与台湾岛上断裂带分布（主要是北东向）不同，福建境内在闽江断裂以南还分布有一些次一级的北北西—北西向断裂，从北到南依次有：闽江断裂（ F_6 ）、沙县—南日岛断裂（ F_7 ）、永安—晋江断裂（ F_8 ）、九龙江断裂（ F_9 ）和上杭—云霄断裂（ F_{10} ），还有东西向的清流—连江断裂（ F_{11} ）。其中， F_6 、 F_8 、 F_{10} 规模较大、延伸较长；

F_7 、 F_8 、 F_9 延伸到台湾海峡甚至到达台湾岛西侧, 这些断裂带切割滨海断裂带, 构成了该断裂带的分段标志。福建陆域的北东向和北西向两组断裂相互交错, 构成了福建陆地上的地震构造, 且经常发生中、强地震。

综上所述, 福建陆域无论从地震构造、断裂带分布、地震活动性强度以及地热异常的分布来看, 都是以北西向的闽江断裂 (F_6) 为界, 南北之间存在着明显的差异。闽江断裂以北, 在 F_4 和

F_5 之间为前寒武纪变质岩, 地块相对稳定 (丁祥焕, 1998), 地震活动性很弱并且没有温泉分布。闽江断裂以南 (简称 “闽南”) 伴随着岩浆侵入和古火山喷发, 断块分异作用强烈。闽南地区存在两组北东、北西向的规模较大、延伸较长的断裂 (带), 相互交错, 形成了网格状的地震构造格局, 也是温泉大量分布的地热异常区, 同时也是中、强地震频发的地区, 尤其是沿海的长乐—诏安断裂带是福建省陆域地震活动较强的断裂带。

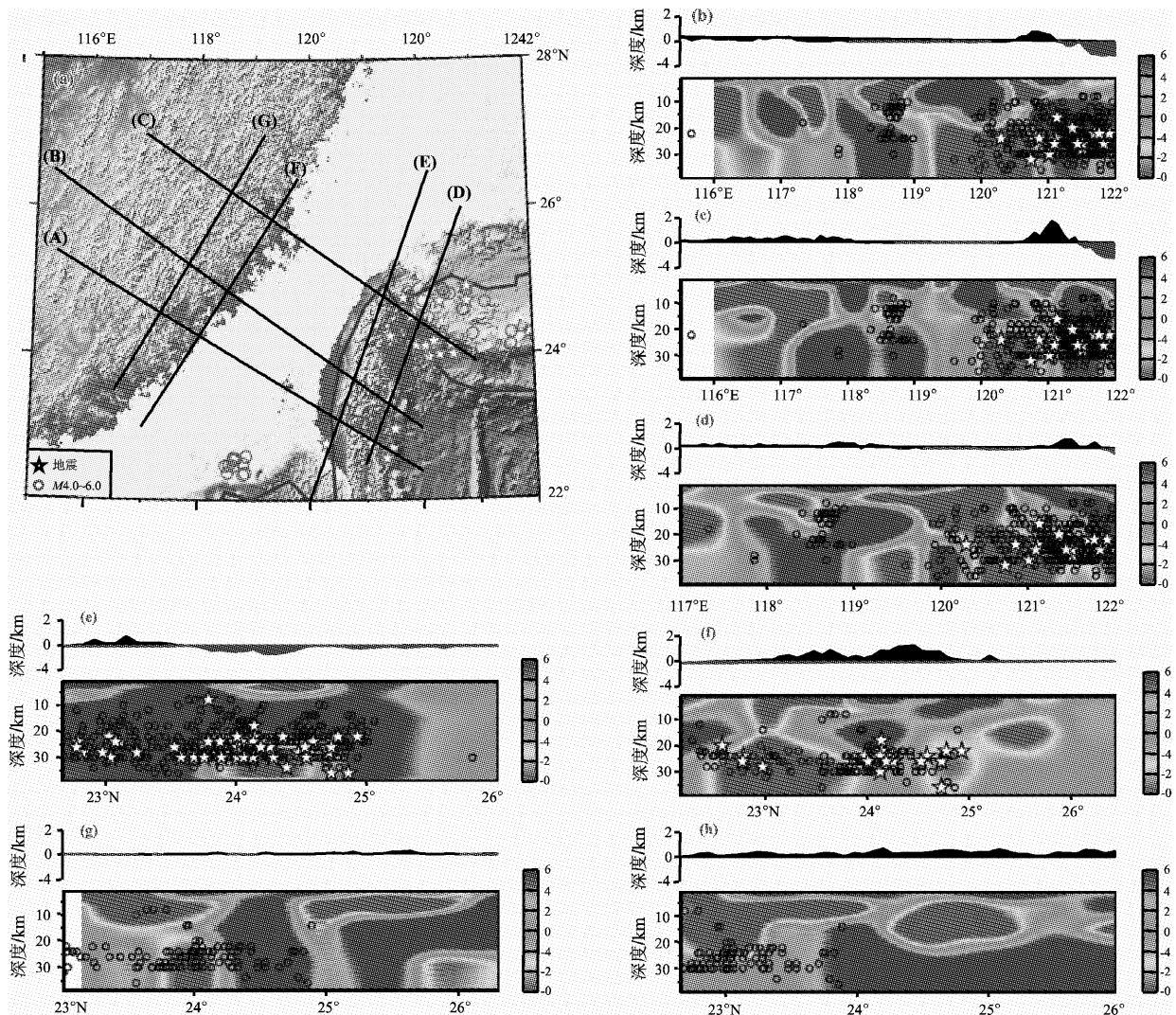


图5 速度扰动异常垂直剖面位置及其地震波速度图

- (a) 7 条速度扰动异常垂直剖面位置; (b) A 剖面的地震波速度; (c) B 剖面的地震波速度; (d) C 剖面的地震波速度; (e) D 剖面的地震波速度; (f) E 剖面的地震波速度; (g) F 剖面的地震波速度; (h) G 剖面的地震波速度

Fig. 5 Location of vertical profiles of the velocity perturbation abnormal and their seismic velocity

- (a) the location of 7 vertical profiles of velocity perturbation abnormal; (b) seismic velocity distribution along A profile; (c) seismic velocity distribution along B profile; (d) seismic velocity distribution along C profile; (e) seismic velocity distribution along D profile; (f) seismic velocity distribution along E profile; (g) seismic velocity distribution along F profile; (h) seismic velocity distribution along G profile

为了考察闽南地区地震构造、地震活动性、地热异常的深部成因，我们沿着北东方向作了两条速度扰动异常垂直剖面 F 和 G，其平面位置见图 5a，其地震波速度分布如图 5g、5h 所示。F 剖面位于福建沿海，从粤东北部沿西南—东北方向穿

越漳州—泉州—福州盆地。由图 5g 可见，以福州（长乐—诏安断裂带的北端位于福州长乐）为起点往西南方向的地壳速度结构除 1 km 以上的浅层外，在 1~10 km 的上、中地壳中明显存在一个低速区，该低速区可能是福州盆地至泉州盆地高地热异常

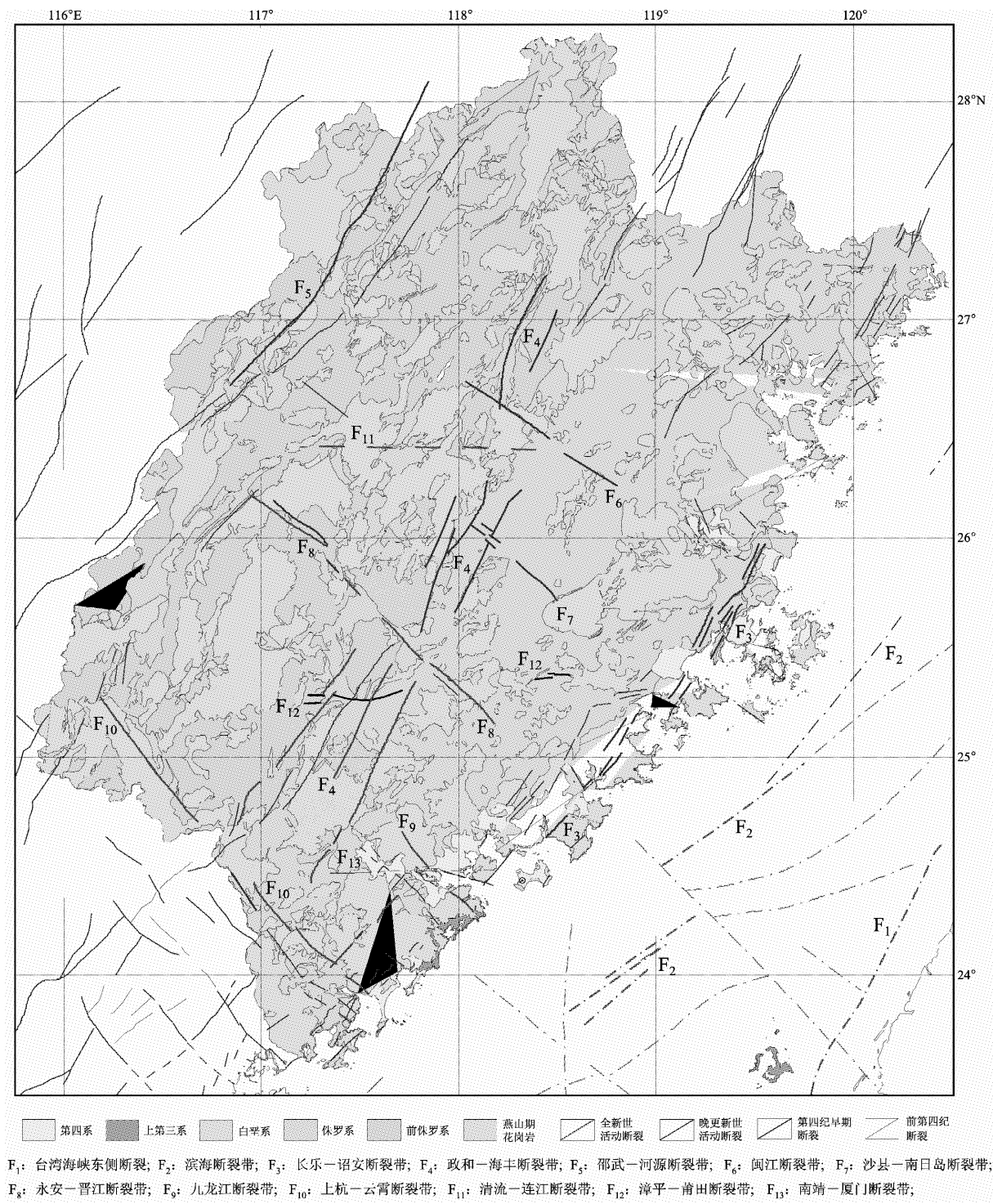


图 6 福建省地质构造图

Fig. 6 Seismotectonic map of Fujian province and its surroundings area

的显示,其位置和福州盆地的高地热异常区吻合,也与长乐—诏安断裂带的走向一致;10 km 以下至下地壳底部以高速区为主。

在漳州盆地以南至广东汕头地区,有深达 20 km 的低速区,从连续穿越漳州盆地的北西向剖面 A (图 5b) 可见,整个漳州地区地壳 3 ~ 20 km 处存在有大范围的低速区。这可能是漳州以南直至粤东北的高地热异常的反映。与福州盆地相比,漳州盆地下面的低速区延伸更深。

G 剖面位置走向与 F 剖面平行,但更偏向内陆一侧,并且穿越戴云山脉,其基本图像与剖面 F 类似 (图 5h),但漳州盆地以南地壳中的低速区范围更大,连成一片,深度直达到上地幔顶部 (深度 33 km),这可能意味着漳州盆地以南直至粤北地区地下存在着一个上地幔热物质上涌的“通道”,造成了这一地区岩浆活动剧烈、地热异常明显,许多地区有玄武岩喷溢, Li 等 (2007) 的研究也证明了这一点。漳州盆地周围也是该区域陆域地震活动最强的地区,根据历史记载考证,漳州地区曾经发生过 1185 年 6½ 级和 1445 年 6¼ 级地震,这是福建陆域有记载以来最大震级的地震。

综上所述,无论是地热异常的强度、温泉露头的分布、地震构造的断裂分布、地震活动性的频度和强度,闽江断裂以南 (简称“闽南”) 的福建陆域乃至粤北,与“闽北”相比,存在很大差异,其深部构造的原因可能是该区域的地壳深部存在着一个连通上地幔的高温、高压的上地幔物质上涌的“通道”,造成这一区域较剧烈的地壳构造运动,形成了较强的地震活动局面。当然,这种上地幔热物质的“上涌”运动,从时间过程看,在不同的地质年代是不均匀的,王洪涛等 (1991) 认为,燕山运动以来,闽、台断块分异作用强烈,与地壳深部三次重要的热幕活动密切相关。从空间上看热物质的上涌也是不均匀的,存在着“横向迁移”的可能。

3 结论与讨论

本文利用福建—台湾地区三维地壳速度结构的反演结果,讨论了研究区域内地震构造环境、地热活动异常以及地震活动性区域差异与地壳深部构造的关系。研究结果表明:

(1) 在 1 km 深度层,以台湾海峡中的滨海断

裂带为界,西部的福建地区主要为高速异常,东部的台湾及海峡地区高低速相间,海峡地区的北部为低速区,南部为高速区,浅层的速度结构很好地反映了该区地形地貌及地质特征。

(2) 福建地区的地壳运动和断裂活动存在着东西和南北差异。本次研究结果也可看出福建沿海的深部速度结构明显存在南北差异,这与福建地区的构造运动、断裂活动、地震活动性的差异是一致的,也与闽南地区广泛分布的地热异常有关。

(3) 在一些大型活动断裂带两边存在明显的速度结构的差异,例如晚更新世以来仍有强烈活动的滨海断裂带恰好位于 15 km 深度的福建陆地的高速区和台湾海峡低速区的交界部位。

(4) 福建地区主要的地热区,如闽南的漳州盆地和闽东的福州盆地都呈现低速异常,尤其是闽南地热区的低速异常一直延伸到较深的深度。福建地区的断裂带分布呈现北东、北西向断裂纵横交错的构造格局,交错部位往往是中强地震发生的场所。从一些速度剖面图上可以看到地震往往发生在高、低速的交界部位。

(5) 台湾地区的大多数强震一般发生在板块碰撞或俯冲的高速带上,并形成明显的贝里奥夫带,显然台湾地区的强震活动与该地区的复杂的板块结构及其运动密切相关。

受所采用的观测资料精度、地震和台站分布的不均匀性、台间距相对较大等因素的影响,反演结果的精度和分辨率必然受到限制,因而解释的精度和边界范围也会受到限制。随着数字地震台网的逐步加密、观测资料精度的逐步提高、两岸地震观测台网合作的逐步加深,相信以后能够得到福建—台湾地区深部构造的更高精度和分辨率的结果。

参考文献:

- 陈祥熊,林树,李祖宁,等. 2005. 福建—台湾地区一维地壳速度结构的初始模型[J]. 地震, 25(2): 62-68.
- 丁祥焕. 1998. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福州: 福建科学技术出版社.
- 黄金莉,李祖宁,陈祥熊,等. 2008. 应用福建地震台网资料反演福建及台湾海峡地区三维地壳速度结构//中国地震预报探索, 纪念梅世蓉先生 80 华诞文集[C]. 北京: 地震出版社, 520-528.
- 黄金莉,赵大鹏,郑斯华. 2001. 川滇活动构造区地震层析成像[J]. 地球物理学报, 44(增刊): 127-135.
- 黄金莉,赵大鹏. 2005. 首都圈地区地壳三维 P 波速度细结构与强震

- 孕育的深部构造环境[J]. 科学通报, 50(4): 348–355.
- 黄昭, 王善雄. 2006. 台湾海峡滨海断裂带的构造特征与活动性[J]. 大地测量与地球动力学, 26(3): 16–22.
- 廖其林, 王振明, 王屏路, 等. 1988. 福州—泉州—汕头地区地壳的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, 31(3): P270–280.
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学图集[M]. 北京: 中国地图出版社.
- 王洪涛, 范光禄, 郭振琪, 等. 1991. 板块碰撞与台湾海峡两岸“热—震”能态结构的研究[A]//台湾海峡及两岸地质地震研讨会论文集[R]. 北京: 海洋出版社.
- 章惠芳, 章林云, 赖松, 等. 1988. 泉州—汕头地区地壳结构和深部构造研究, 中国大陆深部构造的研究与进展[C]. 北京: 地质出版社.
- Chen C. H., Wang W. H., Teng T. L. 2001. 3D velocity structure around the source area of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: before and after the mainshock[J]. *Bullet. Seismol. Soc. Amer.*, 91(5): 1 013–1 027.
- Ho C. S. 1986. A synthesis of the geological evolution of Taiwan [J]. *Tectonophysics*, 125(1–3): 1–16.
- Hsu Y. J., Yu S. B., Simons M., *et al.* 2009. Interseismic crustal deformation in the Taiwan plate boundary zone revealed by GPS observations, seismicity, and earthquake focal mechanisms [J]. *Tectonophysics*(1–2), 479: 4–18.
- Huang J., Zhao D., Zheng S. 2002. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China [J]. *JGR*, 107(B10), doi:10. 1029/2000JB000137.
- Huang J., Zhao D. 2004. Crustal heterogeneity and seismotectonics of the region around Beijing, China [J]. *Tectonophysics*, 385(1–4): 159–180.
- Huang J., Zhao D. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions [J]. *JGR*, 111 (B09305), doi: 10. 1029/2005JB004066.
- Laske G., Masters G. 1997. A Global Digital Map of Sediment Thickness [J]. *EOS Trans. AGU*, 78: 483.
- Li Z. X., Li X. H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A fault-slab subduction model [J]. *BSSA*, 35(2): 179–182.
- Liu, C. S., Huang I. L., Teng L. S. 1997. Structure features off southwestern Taiwan [J]. *Marine Geology*, 137(3–4): 305–319.
- Ma K. F., Wang H., Zhao D. 1996. Three-dimensional seismic velocity structure of the crust and uppermost mantle beneath Taiwan [J]. *J. Phys. Earth*, 44: 85–105.
- Mooney W. D., Laske G., Masters T. G. 1998. Crust 5. 1: a global crustal model at 5x5 degrees [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (B1): 727–747.
- Paige C. C., Saunders M. A. 1982. Algorithm 583; LSQR: Sparse linear equations and least-squares problems [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 8(2): 195–209.
- Rau, R. J., Wu F. T. 1995. Tomographic imaging of lithospheric structure under Taiwan [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 133 (3–4): 517–532.
- Teng L. S. 1990. Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan [J]. *Tectonophysics*, 183(1–4): 57–76.
- Um J., Thurber C. 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing [J]. *BSSA*, 77(3): 972–986.
- Wu, F. T., Rau R. J., Salzberg D. 1997. Taiwan orogeny: think-skinned or lithospheric collision [J]. *Tectonophysics*, 274(1–3): 191–220.
- Wu, Y. M., Chang C. H., Zhao L., *et al.* 2007. Seismic tomography of Taiwan: Improved constraints from a dense network of strong motion stations [J]. *J. Geophys. Res.*, 112(B8), doi:10. 1029/2007JB004983.
- Zhao D., Kanamori H., Negishi H. 1996. Tomography of the source zone of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter [J]. *Science*, 274: 1 891–1 894.
- Zhao D. 2001b. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 192(3): 251–265.
- Zhao D. H., Kanamori D., Wiens 1997. State of stress before and after the 1994 Northridge earthquakes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24 (5): 519–522.
- Zhao D. 2001a. Seismological structure of subduction zones and its implications for arc magmatism and dynamics [J]. *Phys Earth Planet Inter*, 127(1–4): 197–214.
- Zhao D. P., Hasegawa A., Horiuchi S. 1992. Tomographic Imaging of P and S Wave Velocity Structure Beneath Northeastern Japan [J]. *J Geophys Res*, 97(B13): 19 909–19 928.
- Zhao D. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from Local, regional, and teleseismic events [J]. *JGR*, 99 (B11): 22313–22329.
- Zhou L., Xie J., Shen W., *et al.* 2012. The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography [J]. *Geophys. J. Int.*, 189 (3), doi: 10. 1111/j. 1365–246X. 2012. 05423. x.

Research on Crustal Three Dimensional Velocity Structure in Fujian-Taiwan Region and its Tectonic Implications

LI Zu-ning¹, ZHENG Yong², XIONG Xiong², LIN Shu¹,
CHEN Xiang-xiong¹, BAO Ting¹, CHEN Guang¹

(1. *Earthquake Administration of Fujian, Fuzhou 350003, Fujian, China*)

(2. *Geodesy and Geodynamics State Key Laboratory, Institute of Geodesy
and Geophysics, CEA, Wuhan 430077, Hubei, China*)

Abstract

Basing on the crustal 3D velocity structure, we combined with the geomorphology and tectonic structures in Fujian-Taiwan region to analyze the relationship between the crustal 3D velocity structure and tectonic in this area. The results show that: (1) The velocity structure in shallow crust has the good consistence with the geomorphology, topography and geological characteristics in this area. The low velocity anomalies obviously locate at the areas with high geothermal flow, such as the Zhangzhou and the Fuzhou Basins, especially the low velocity anomalies near the Zhangzhou Basin extend to deep depth. (2) There are significant differences in crustal movements, fault activities and seismic activities between the south and the north parts of Fujian province, which is corresponding with the crustal velocity structure. The tomography result shows that the seismic velocity in upper and middle crust in the south part of Fujian is much lower than that in the north. (3) The velocity structures are significant different across some big active faults. For example, there exists the significant difference at the depth of 15 km between the two sides of the Coast Fault Belt whose tectonic activity is the most intense in Fujian, which may explain that the epicenter depth of most earthquakes in Fujian province are shallower than 15 km. (4) The most strong earthquakes in Taiwan region are concentrated at the high velocity anomalies belt in the plate collision or subduction belts, which forms obvious Benioff zone, so the activity of strong earthquakes may tightly be relate to the complex plate structure and movement in Taiwan.

Key words: Fujian-Taiwan region; 3D velocity structure; tectonic characteristic; seismic activity