

腾冲火山区 S 波速度结构与岩浆活动特征

李雪垒^{1,2}, 胥颐^{1*}, 汪晟^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院油气资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: xuyi@mail.iggcas.ac.cn

2017-04-01 收稿, 2017-05-23 修回, 2017-05-24 接受, 2017-08-15 网络版发表

国家自然科学基金(41374066)资助

摘要 腾冲位于青藏高原东南缘印度与欧亚大陆碰撞边界, 是中国最年轻的火山区之一. 全新世以来的火山主要分布在腾冲盆地的中央, 由北向南形成一个串珠状的火山链. 为了研究这一地区的壳内岩浆活动以及火山分布的对应关系, 我们在腾冲盆地开展了为期一年的流动地震观测, 利用记录的远震波形和接收函数方法反演了台站下方的 S 波速度结构. 结果表明, 打鹰山、大-小空山、黑空山存在一个相互联通的岩浆囊, 它的深度为 6~15 km, 南北方向宽约 16 km; 火山湖具有一个相对独立的岩浆囊, 它的深度为 9~16 km, 南北方向小于 8 km, 上述两个岩浆囊的深部热流通道位于黑空山与火山湖之间. 在测线南端, 老龟坡火山下方的低速特征十分突出, 岩浆活动集中在 10~25 km 深度之间, 有可能受到大盈江断裂与腾冲火山断裂相互交汇的影响, 它与邻近的马鞍山属于另一个岩浆存储系统. 火山区的莫霍面深度在 38~41 km 之间, 在大-小空山下方出现局部抬升, 部分台站的壳幔边界具有过渡带性质并呈开放状, 有可能成为热流物质由地幔进入地壳的上升通道.

关键词 腾冲火山区, 接收函数, S 波速度结构, 岩浆活动

腾冲位于青藏高原东南缘欧亚板块与印度板块的碰撞带附近, 是中国大陆最年轻的火山区之一, 大约 70 座规模不等、时代不同的火山分布在腾冲盆地及其周围^[1]. 自上新世晚期到全新世火山活动十分频繁, 早期的火山主要分布在腾冲盆地的外围, 更新世以来逐渐向盆地中心迁移, 最新一期的火山集中在盆地的中央^[2,3], 形成一个南北方向的串珠状火山链, 主要包括马鞍山、老龟坡、打鹰山、大-小空山、黑空山和火山湖等(图 1). 火山岩多为富含幔源元素的高钾钙碱性玄武岩和安山岩, 与古洋壳的俯冲存在密切的联系^[4,5].

腾冲火山区的岩浆活动一直是地球科学家关注的热点, 为此开展了许多地球物理探测工作, 研究结果揭示出高热流、低电阻率和低波速特征^[6~11], 低速

异常一直延伸至数百千米的上地幔, 反映了印缅板块向东俯冲引起的地幔上涌^[12~14]. 根据热流活动分布, 腾冲地区目前存在 3 个壳内岩浆囊, 它们分别位于马站、热海以及五合一带^[8,15], 其中热海和马站附近的岩浆囊已经得到大地电磁测深的确认^[6,9]. 但是由于缺少密集点距的地球物理观测, 上述两处岩浆囊之间存在怎样的联系目前尚不明确, 也不清楚马站附近的岩浆囊与周围其他火山的联系. 同位素分析表明, 黑空山、打鹰山和马鞍山的火山岩为同源岩浆^[5], 同步的岩浆热演化史表明这一地区可能存在一个相互联通的岩浆囊^[16]. 然而, 黑空山、打鹰山和马鞍山的火山熔岩斑晶成分和显微构造的差异暗示它们形成于不同的岩浆环境, 即来自不同的岩浆囊^[17]. 那么上述火山究竟是具备独立的岩浆囊还是共享一

引用格式: 李雪垒, 胥颐, 汪晟. 腾冲火山区 S 波速度结构与岩浆活动特征. 科学通报, 2017, 62: 3067–3077

Li X L, Xu Y, Wang S. Evidence of magma activity from S-wave velocity structure of the Tengchong volcanic area (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3067–3077, doi: 10.1360/N972017-00123

个岩浆存储系统? 幔源岩浆又是通过怎样的传输通道对壳内岩浆囊进行补给的? 这些问题都需要从深部地球物理探测中寻求答案。

鉴于上述原因, 中国科学院地质与地球物理研究所所在腾冲火山区开展流动地震观测. 本文利用记录的远震波形数据, 通过接收函数方法反演了台站下方的S波速度结构, 期望揭示地壳内部的岩浆活动特征并建立与地表火山分布的联系, 为进一步完善腾冲火山区的地学模型和动力学机制提供依据。

1 数据资料与方法

1.1 数据资料

地震观测位于腾冲和顺镇与固东镇之间, 从南向北依次穿过老龟坡、打鹰山、大-小空山、黑空山和火山湖, 长度约40 km(图1). 沿测线一共安放9台宽频带地震仪, 台站平均间距约4 km, 其中SHZ, DYC, MZT台分别位于老龟坡、打鹰山和大-小空山, HSH台位于火山湖. 每个台站均配备RefTek130数字采集器、Guralp CMG-3ESP拾震器和GPS时间服务系统, 采样率为40 s⁻¹, 从2015年5月至2016年7月持续观测14个月. 根据中国地震台网中心(CENC)发布的

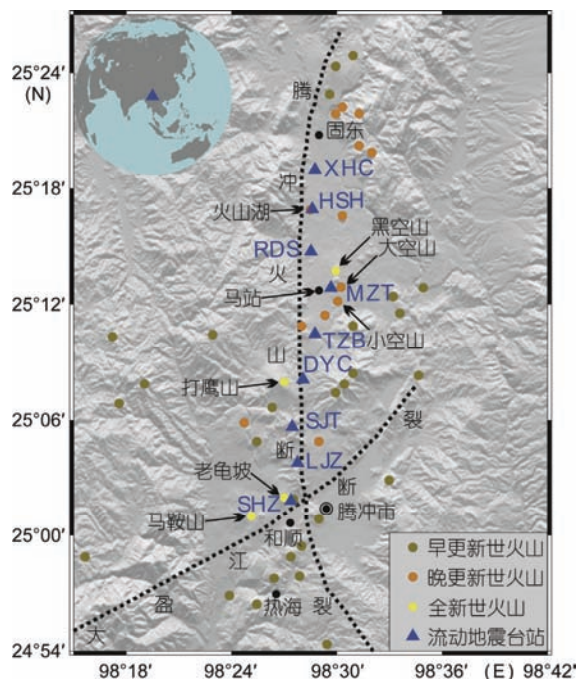


图1 腾冲北部火山区主要断裂和流动地震台站分布图

Figure 1 Locations of major fault zones and temporary seismic stations in the northern Tengchong volcanic area

地震目录, 从这一期间的记录数据中挑选出61个震级为5级以上、震中距在30°~90°之间、震相清晰的远震事件, 其中包括1个8级地震、9个7级地震、49个6级地震和2个5级地震. 震中分布表明(图2), 大多数地震分布在腾冲东北和东南方向的西太平洋地区。

波形截取采用下述方法: 首先根据标准地球模型计算从震源到台站的地震波理论到时, 确定相对于发震时刻的波形时间窗, 再从记录数据中截取地震波形, 最后从9个台站的记录数据中一共挑选出612个地震波形。

1.2 方法

(i) 接收函数提取. 提取接收函数方法采用最大熵谱反褶积方法, 该方法是在时间域内测定台站接收函数的有效途径^[18]. 鉴于不同尺度的S波速度结构对波形的频率变化非常敏感^[19,20], 参照以往的研究工作^[21,22], 分别选取了高斯系数为1.0和2.5的接收函数进行联合反演, 对应的截止频率分别为0.48和1.2 Hz(水准因子取0.1). 其中高斯系数1.0的波形用于突出莫霍面的各种反射震相, 主要反映较大尺度的结构变化, 高斯系数2.5的波形则用于突出壳内各种震相的特征, 主要反映小尺度的结构变化. 考虑到过多的高频干扰容易导致反演结果失稳, 因此在提

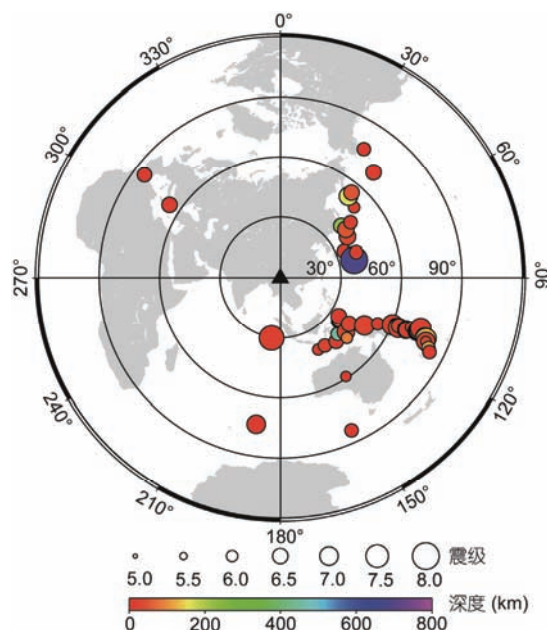


图2 五级以上地震的震中分布(震中距 30°~90°)

Figure 2 Locations of $M_s \geq 5.0$ earthquakes with epicentral distances 30°–90°

取接收函数波形时未使用更高频率的高斯系数。

为了减少接收函数波形中的不确定因素,首先采用智能自动化和人工识别相结合的方式选取出波形相关性较好、多次反射震相清晰的接收函数,剔除不合理的波形。挑选步骤如下:

(1) 将提取的接收函数与垂向分量做褶积计算并与径向分量做相关计算,选择相关度高于80%的接收函数;

(2) 去除直达P波初至震相极性为负,并且续至震相振幅超过直达波振幅的接收函数;

(3) 对步骤(1)和(2)挑选后的接收函数进行人工识别,保留莫霍面震相清晰、信噪比高、相似程度好的波形,剔除信噪比偏低以及波形不符合要求的接

收函数。

为了进一步提高接收函数的波形质量,分别将每个台站不同高斯系数(1.0和2.5)的接收函数进行叠加,然后用单个接收函数与叠加后的接收函数做互相关,保留相关程度较高的波形。经过上述处理后一共获得了403个接收函数,其中包括207个高斯系数为1.0的波形和196个高斯系数为2.5的波形。图3为RDS台站的接收函数排列图像,可以看出高斯系数为1.0的波形信噪比较高,来自莫霍面的Ps震相非常清晰,而高斯系数为2.5的波形则含有较多的壳内多次波信息。图4为各台站叠加后的接收函数波形,可以看出Ps震相信噪比明显提高:在高斯系数为1.0的波形中,莫霍面反射震相PpPs, PpSs和PsPs非常明

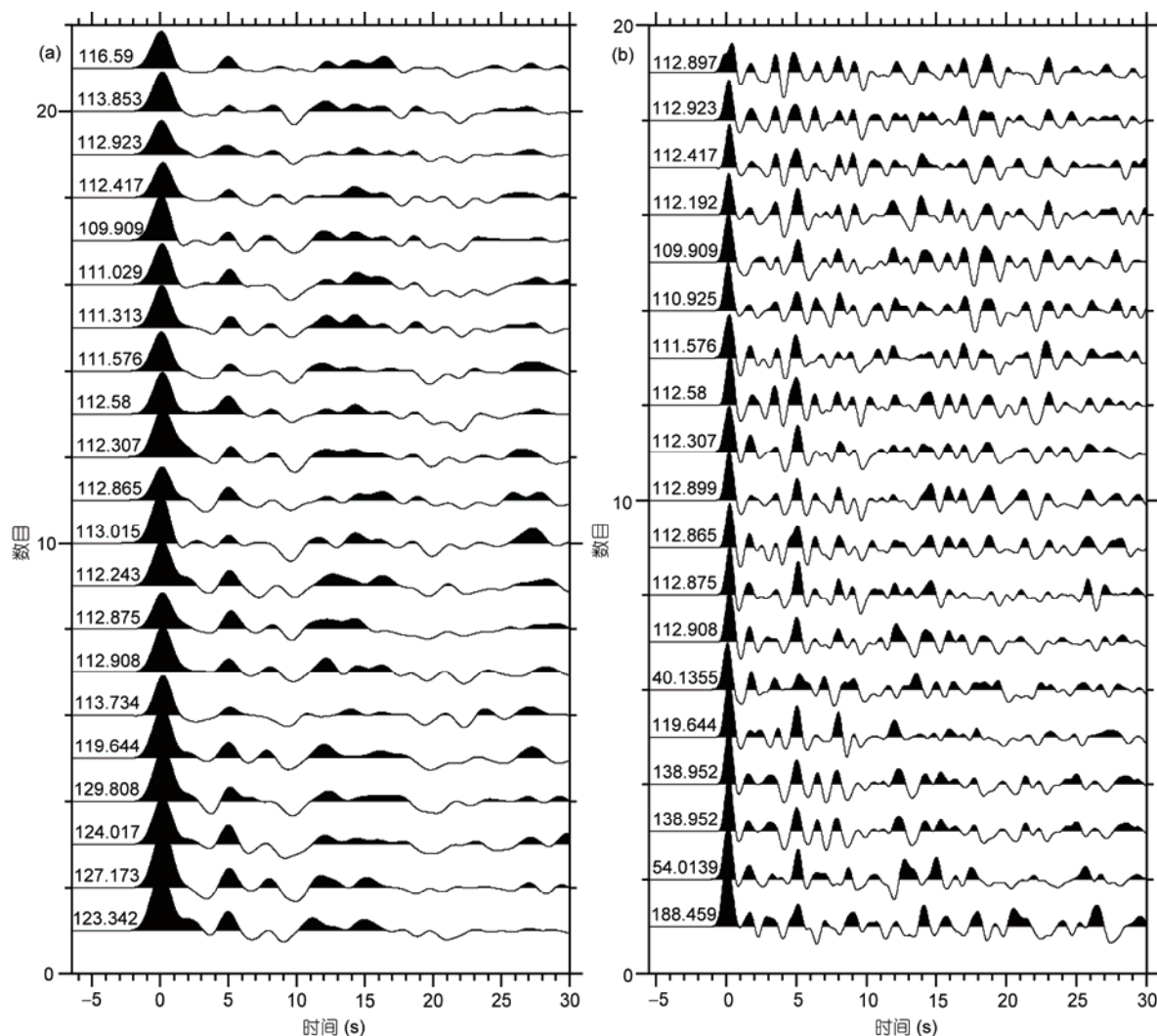


图3 RDS台站的接收函数波形(按照反方位角排列). (a) 高斯系数 1.0; (b) 高斯系数 2.5

Figure 3 Receiver function waveforms ranked at back azimuth in RDS station. (a) Gaussian filter 1.0; (b) Gaussian filter 2.5

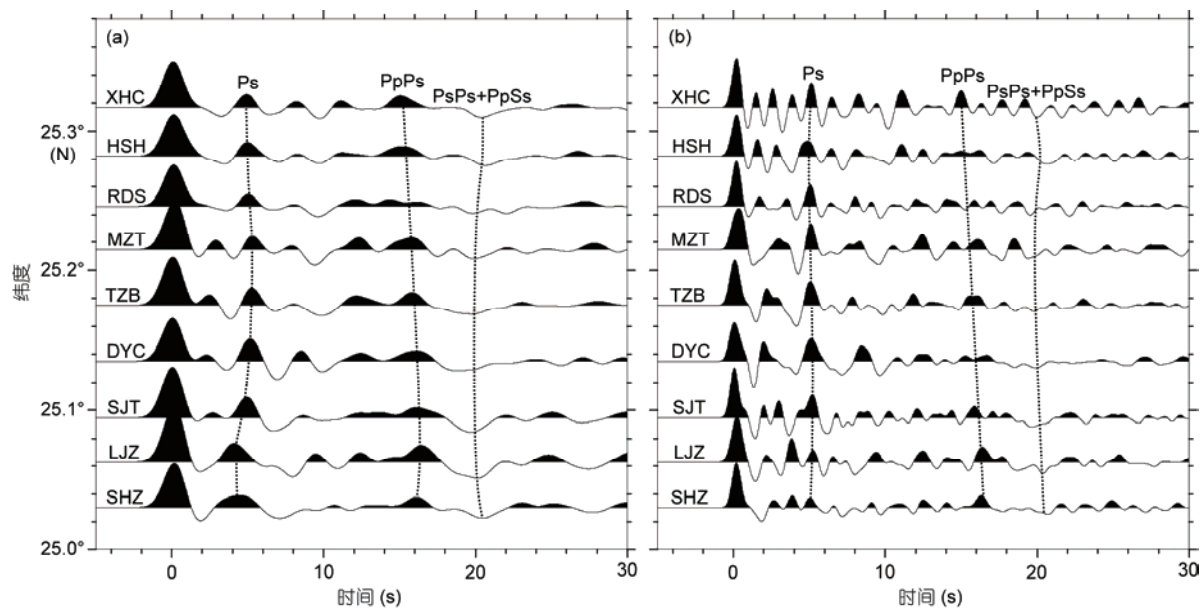


图4 叠加后9个台站的接收函数. (a) 高斯系数1.0; (b) 高斯系数2.5
Figure 4 Stacked receiver function waveforms for 9 stations. (a) Gaussian filter 1.0; (b) Gaussian filter 2.5

显; 在高斯系数为2.5的波形中, 地壳内部的反射震相也很清晰.

(ii) 接收函数反演. 接收函数反演采用邻域算法(NA). NA算法是基于非线性理论的一种搜索算法^[23,24], 其搜索目标是找出一个最优模型集代替全局最优解, 具有较强的自适应搜索能力, 可以避免反演陷入局部最优解. 基于每次搜索的模型, 正演计算采用Thomson-Haskell矩阵方法合成理论接收函数^[25,26].

模型空间包含以下参数: 构造层厚度、构造层顶面和底面的S波速度以及层内的波速比, 假设层内的速度随着深度的增加呈线性递增. 表1和2为初始参考模型和模型空间参数, 初始模型参考了腾冲地区人工地震测深、地震层析成像和接收函数的研究结果^[7,10,11].

通过对多个参考模型进行试算, 最终确定的反演参数如下: 采样点 $n_s=20$, 重采样多边形数 $n_r=2$, 迭代次数为500. 考虑到Ps和PpPs等主要震相的到时特征, 反演窗口设置为P波初至前5 s到和P波初至后20 s, 去除了20 s以后信噪比较差的多次波震相, 以避免拟合过多的噪声而降低反演结果的可靠性. 对高斯系数为1.0和2.5的接收函数波形进行联合反演时, 两种高斯系数的权重根据“试错法”进行选取, 反演权重分别设置为0.4(高斯系数1.0)和0.6(高斯系数2.5), 一共获得10020个反演模型, 取失配值最小的1000个模型的平均值作为最终反演模型. 图5为反演前后高斯系数1.0 (0.48 Hz)和2.5 (1.2 Hz)的接收函数波形拟合图, 总体上理论接收函数与观测接收函数拟合较好. 此外, 由于在初始模型中增加了沉积层, 从反演获得的S速度结构来看, 与初始模型相比, 最佳模型的沉

表1 初始参考模型
Table 1 Initial reference model

层位	厚度(km)	顶面S波速度(km/s)	底面S波速度(km/s)	V_p/V_s
沉积层	2	2.6	2.8	2.8
结晶基底	1	2.8	2.95	1.8
上地壳	13	3	3.6	1.75
中地壳	15	3.6	3.8	1.75
下地壳	8	3.8	4	1.75
上地幔	20	4.3	4.4	1.8

表 2 反演模型空间参数

Table 2 Model space parameters for the inversion

层位	厚度(km)	顶面S波速度(km/s)	底面S波速度(km/s)	V_p/V_s
沉积层	0~5	1.5~3.2	1.5~3.2	1.8~3
结晶基底	0~3	2~3.6	2~3.6	1.5~2
上地壳	5~15	2.6~4	2.6~4	1.5~2
中地壳	5~15	2.8~4.5	2.8~4.5	1.5~2
下地壳	5~15	3~4.5	3~4.5	1.5~2
上地幔	10~30	4~4.5	4~4.5	1.7~2

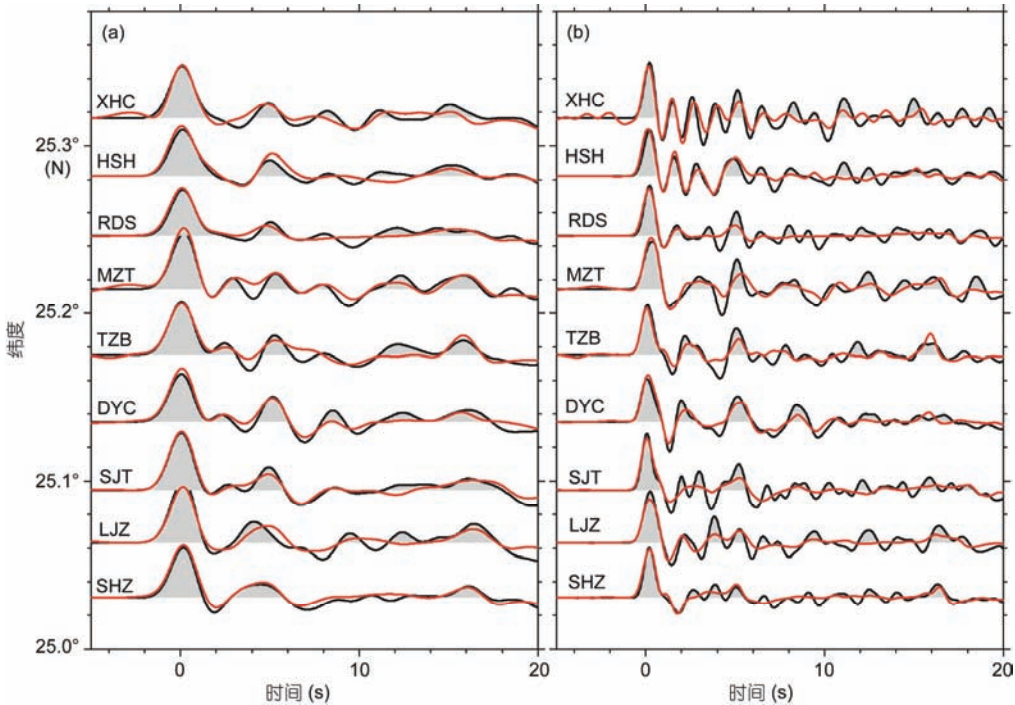


图 5 单个台站的接收函数波形拟合结果. (a) 高斯系数 1.0; (b) 高斯系数 2.5. 黑色实线表示叠加后的观测接收函数, 红色实线表示理论合成的最佳接收函数

Figure 5 The waveform fitness between synthetic and observed receiver functions for each station. (a) Gaussian filter 1.0; (b) Gaussian filter 2.5. The black and red lines denote observed and synthetics receiver functions respectively

积层速度发生明显变化, 相应的震相(初至P波后, 前 10 s 以内的震相)也拟合得较好, 在一定程度上减少了沉积层的影响.

2 结果分析

图6为利用NA算法反演的9个台站的S波速度分布. 从反演收敛情况可以看出, 个别台站如XHC台(图6(a)中的红线)存在反演不均衡现象, 但其他台站的整体收敛情况较好. 因此, 最终采用了1000个最佳模型集的平均结果(图6中的白线), 平均后的模型S波速度变化虽然较为平滑, 但是特征仍然十分明显, 相邻台

站具有一定的相似性, 反映出地壳结构的连续变化, 在此基础上进行插值构成二维S波速度剖面(图7).

分析表明, S波速度的变化与火山分布存在一定的对应关系. XHC, HSH, MZT, TZB和DYC台分别位于火山湖、大-小空山和打鹰山附近, 5个台站下方的速度变化均较大, 壳内低速层明显, 相邻台站特征比较接近; RDS台位于火山湖与大-小空山之间, 速度变化相对平缓. SJT, LJZ和SHZ台位于测线南部, 其中LJZ和SHZ台靠近老龟坡附近, 毗邻大盈江断裂与腾冲火山断裂带的交汇处, 总体上3个台站下方速度变化较为平缓, LJZ和SHZ台地壳中、下部速度偏低, 明

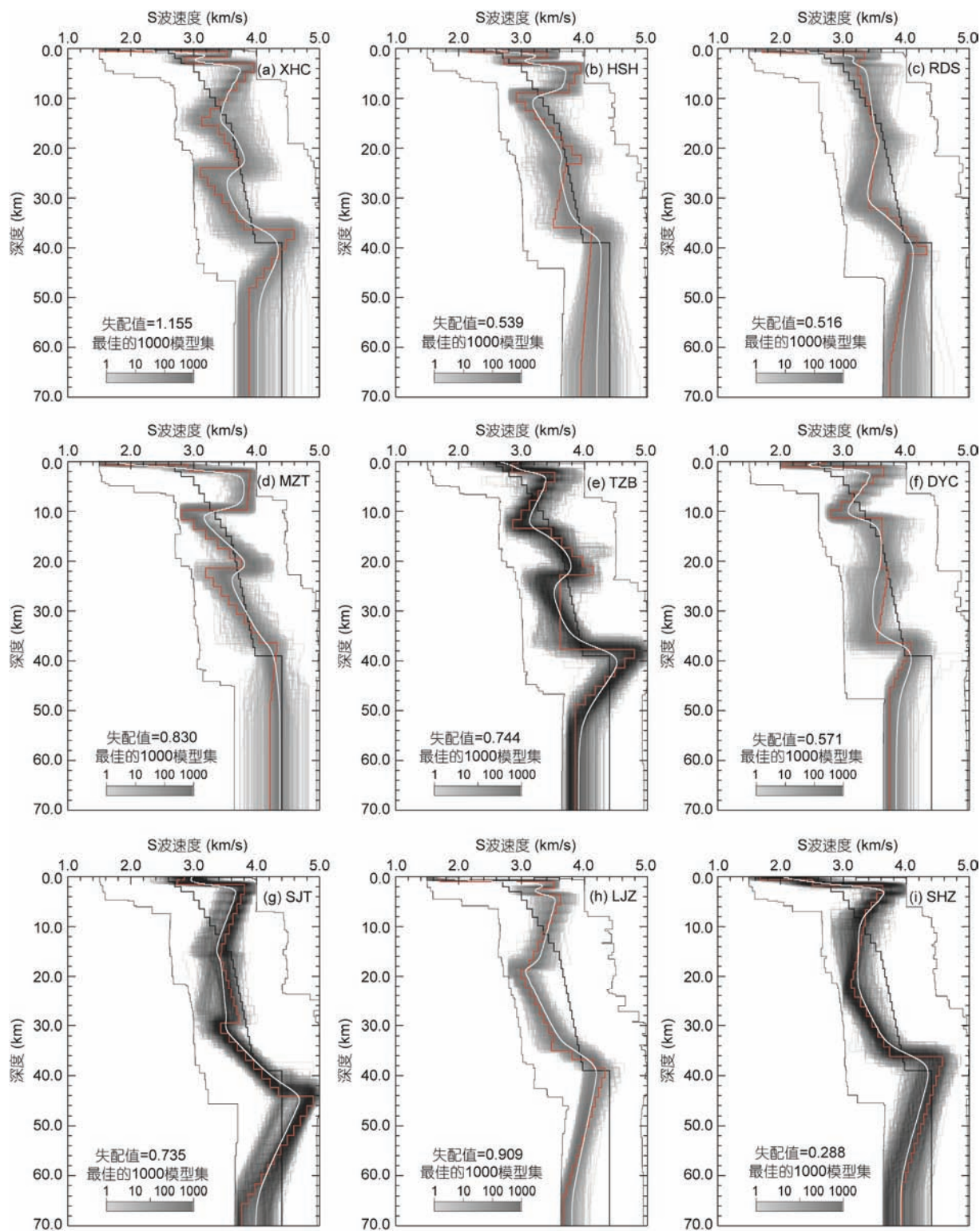


图6 单个台站的S波速度结构. 最外侧的黑色实线表示模型搜索空间, 灰色区域为拟合度较高的1000个反演模型集, 搜索区域内的黑色实线表示初始参考模型, 红色实线表示最优反演结果, 白色实线表示1000个模型集的平均值

Figure 6 The S-wave velocity structure for each station. Outmost black lines indicate the model searching space. Gray lines between them are 1000 acceptable inversion models. The black lines within the searching space denote the initial reference model. The red lines mark the best fitting model. The white lines show the average of the 1000 acceptable models

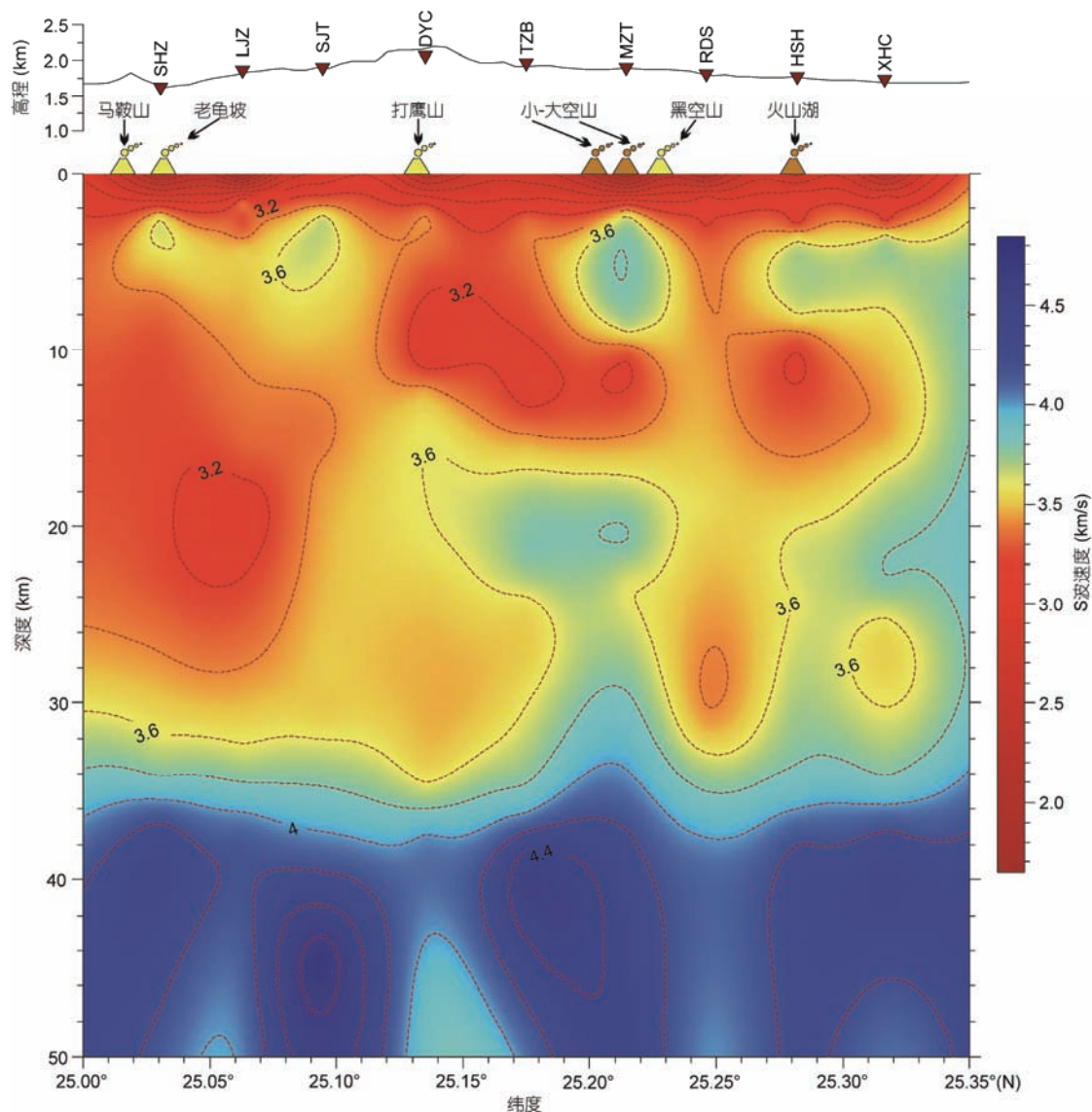


图7 测线下方二维S波速度结构

Figure 7 The S-wave velocity structure under the profile

显不同于测线北部的其他台站。

从图7可以看出,地壳浅部的沉积层厚度达到3 km;火山湖下方存在一个低速区,深度在9~16 km之间;黑空山、大-小空山、打鹰山下方有一个相互联通的低速层,最大深度位于MZT台下方约15 km,上方被地壳浅部的高速体覆盖。在打鹰山和大-小空山之间,该低速层与地壳浅部的沉积层相连,低速层之下直至地壳深部和莫霍面附近速度均偏高。在测线南端的老龟坡附近,LJZ和SHZ台下方8~26 km深度之间为低速区,该低速区的深度超过打鹰山一侧的低速层,但是两者之间并不相连。总体上测线下方的壳

幔边界比较清晰,莫霍面的深度在38~41 km之间,部分台站的壳幔边界呈现过渡带的性质(如RDS台和DYC台),大-小空山附近莫霍面出现局部抬升。

人工地震测深资料表明^[7],腾冲至固东之间基底隆起,壳内平均速度较高,仅在腾冲县城附近地壳深部出现局部低速区,其他区域并未发现低速层。然而,大地电磁测深资料显示^[9],黑空山下方12~30 km存在明显的低电阻层,被认为是马站-固东一带的壳内岩浆囊,接收函数研究也证实马站的地壳中、下部均呈现低速特征^[7,10]。尽管上述结果的具体细节有所不同,但是基本特征与本文的反演结果类似,只是

与人工地震测深资料相比存在一定的差异。

据此推测,图7中火山湖、黑空山、大-小空山和打鹰山下方的低速层应该与火山区的壳内岩浆活动有关,其中火山湖具备一个独立的岩浆囊,黑空山、大-小空山和打鹰山共享了一个相互联通的岩浆囊,它的最大深度15 km左右,南北方向约为16 km,热流通道可能位于黑空山和火山湖之间(RDS台下方),从地壳深部对上述两个岩浆囊进行热流补给。在测线南端,老龟坡下方的低速区很可能是另一个岩浆囊,由于靠近马鞍山并且与打鹰山一侧的低速区互不相连,估计它们分属于两个不同的岩浆存储系统,也许与热海一带的热流活动有关。由于测线并未向南延伸,需要开展进一步的研究才能证实。此外,RDS台以及DYC台的壳幔边界具备过渡带性质,地壳深部和上地幔顶部速度均偏低。考虑到腾冲地区深至数百千米的速度异常^[12~14],这里有可能成为地幔热流向地壳侵入的通道。

上述结果与 H - κ 叠加搜索方法计算的地壳厚度和平均波速比 V_p/V_s 存在很好的对应关系。胥颐等人^[27]的研究结果表明,打鹰山、大-小空山至火山湖一带莫霍面明显抬升,地壳平均波速比和泊松比偏高,尤其是在火山分布相对集中的马站台(MZT)附近平均波速比和泊松比达到最大值,莫霍面较周边台站抬升了1~2 km。Yang等人^[28]和张龙等人^[29]的研究结果同样显示马站台具有较高的地壳平均波速比和泊松比,与本文揭示的岩浆囊位置是相吻合的,也与赵慈平等人^[8]利用地热资料推断的岩浆囊尺度基本相当。根据温泉逸出气体的碳同位素分析^[30],马站-曲石附近的岩浆囊平均温度为524℃,达到流纹岩浆的形成温度。在这样的温度条件下,花岗岩的地震波传播速度和屈服强度将大幅度降低^[31,32]。据此分析,地壳平均波速比偏高的主要是岩浆囊内的热流活动导致S波速度降低所致,而莫霍面的局部抬升则与火山区下方的地幔热流物质上涌有关,火山岩以及温泉逸出气体中富含的幔源成分以及深至数百千米的地幔低速异常都证实了这一推论^[5,8,12~14,33]。

根据同位素地球化学分析,李欣和刘嘉麒^[5]认为黑空山、打鹰山和马鞍山为同源岩浆,其中打鹰山的火山岩演化程度最强,黑空山次之,马鞍山最弱;Tucker等人^[16]根据锆石年龄的相似性也提出打鹰山和马鞍山具有同步的岩浆热演化史,认为腾冲北部火山区下方可能存在一个相互联通的岩浆囊。然而,

于红梅等人^[17]通过分析火山熔岩的斑晶成分和显微结构,认为马鞍山、打鹰山和黑空山的火山岩形成于不同的岩浆环境,推断它们来源于不同的岩浆囊。从本文的反演结果来看,打鹰山和黑空山的确共享了一个壳内岩浆囊。由于测线南端接近大盈江断裂与腾冲火山断裂带的交汇处,孙洁等人^[34]根据大地电磁测深发现和顺镇附近存在埋深约10 km的低阻层,姜朝松等人^[35]根据地震记录中的S波湮灭和颤动现象也推测马鞍山和老龟坡一带存在岩浆熔融体,估计其顶面深部不超过10 km,这些都与SHZ台站下方低速区的深度是大体吻合的。热红外遥感影像表明,腾冲地区的地热异常与断裂分布存在密切的对应关系^[36],老龟坡附近地壳深部大范围的低速体也许反映了断裂交汇处的热流活动。

至于上述火山的岩浆活动是否来自相同的幔源通道,还有待于更大深度和范围的地球物理探测才能证实,但是至少与两个因素有关:(1)腾冲位于青藏高原东部两个下地壳流动通道经过的地区^[37],壳内的低电阻率和低波速特征已被诸多的地球物理观测证实,如人工地震测深^[7]、大地电磁测深^[6,9]、接收函数^[10,38]以及地震层析成像^[11];(2)延伸至数百千米深度的低速异常揭示了印缅板块向东俯冲引起的地幔上涌^[12~14],这些深部动力作用势必对腾冲火山区的壳幔结构产生了影响,导致岩石圈减薄和莫霍面抬升^[27,29],可见深部热流进入地壳是加剧腾冲火山区岩浆活动的根本原因。

3 结论

利用流动地震观测数据和接收函数方法反演了腾冲北部火山区的S波速度结构,揭示了地壳内部的岩浆活动特征及其与地表火山分布的对应关系。分析表明,火山湖具备一个独立的岩浆囊,深度约9~16 km,南北方向小于8 km;打鹰山、大-小空山和黑空山拥有一个相互联通的岩浆囊,它的最大深度为15 km,南北方向约16 km,地壳深部的热流通道位于黑空山和火山湖之间。老龟坡的热流活动分布在10~25 km深度之间,可能与大盈江断裂与腾冲火山断裂在附近交汇有关,估计与邻近的马鞍山共有一个岩浆存储系统。火山区的莫霍面深度在38~41 km之间,在大-小空山附近出现局部抬升;部分台站的壳幔边界具有过渡带性质并呈开放状,有可能成为地幔热流进入地壳的上升通道。

致谢 云南省地震局腾冲火山监测台网孙志刚、刘克镶、段毅等同志对野外观测工作给予了大力支持,两位审稿人对论文进行了认真审核并提出了宝贵建议,在此表示感谢。

参考文献

- Jiang C S. Distribution characteristics of Tengchong volcano in the Cenozoic Era (in Chinese). *J Seismol Res*, 1998, 21: 309–319 [姜朝松. 腾冲新生代火山分布特征. 地震研究, 1998, 21: 309–319]
- Li D M, Li Q, Chen W J. Volcanic activities in the Tengchong volcano area since Pliocene (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2000, 16: 362–370 [李大明, 李齐, 陈文奇. 腾冲火山区上新世以来的火山活动. 岩石学报, 2000, 16: 362–370]
- Wang Y, Zhang X M, Jiang C S, et al. Tectonic controls on the late Miocene-Holocene volcanic eruptions of the Tengchong volcanic field along the southeastern margin of the Tibetan Plateau. *J Asian Earth Sci*, 2007, 30: 375–389
- Chen F, Satir M, Ji L, et al. Nd-Sr-Pb isotopes of Tengchong Cenozoic volcanic rocks from western Yunnan, China: Evidence for an enriched-mantle source. *J Asian Earth Sci*, 2002, 21: 39–45
- Li X, Liu J Q. A study on the geochemical characteristics and petrogenesis of Holocene volcanic rocks in the Tengchong volcanic eruption field, Yunnan Province, SW China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2012, 28: 1507–1516 [李欣, 刘嘉麒. 云南腾冲全新世火山岩地球化学特征及其成因. 岩石学报, 2012, 28: 1507–1516]
- Bai D H, Meju M A, Liao Z J. Magnetotelluric images of deep crustal structure of the Rehai geothermal field near Tengchong, southern China. *Geophys J Int*, 2001, 147: 677–687
- Wang C Y, Huangfu G. Crustal structure in Tengchong volcano-geothermal area, western Yunnan, China. *Tectonophysics*, 2004, 380: 69–87
- Zhao C P, Ran H, Chen K H. Present-day magma chambers in Tengchong volcano area inferred from relative geothermal gradient (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2006, 22: 1517–1528 [赵慈平, 冉华, 陈坤华. 由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存岩浆囊. 岩石学报, 2006, 22: 1517–1528]
- Jiang M, Tan H D, Zhang L W, et al. Geophysical mode of Mazhan-Gudong magma chamber in Tengchong volcano-tectonic area (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2012, 33: 731–739 [姜枚, 谭捍东, 张聿文, 等. 云南腾冲火山构造区马站-固东岩浆囊的地球物理模式. 地球学报, 2012, 33: 731–739]
- He C S, Wang C Y, Wu J P. S-wave velocity structure inferred from receiver function inversion in Tengchong volcanic area (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2004, 26: 11–18 [贺传松, 王椿镛, 吴建平. 腾冲火山区 S 波速度结构接收函数反演. 地震学报, 2004, 26: 11–18]
- Xu Y, Yang X T, Li Z W, et al. Seismic structure of the Tengchong volcanic area southwest China from local earthquake tomography. *J Volcanol Geotherm Res*, 2012, 239–240: 83–91
- Li C, van der Hilst R D, Meltzer A S, et al. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 274: 157–168
- Lei J S, Zhao D P, Su Y J. Insight into the origin of the Tengchong intraplate volcano and seismotectonics in southwest China from local and teleseismic data. *J Geophys Res*, 2009, 114: B05302
- Wei W, Xu J D, Zhao D P, et al. East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism. *J Asian Earth Sci*, 2012, 60: 88–103
- Li H, Peng S B, Qiao W T, et al. The distribution and activity of Cenozoic magma chamber in Tengchong volcano area deduced from the MODIS multi-temporal monthly night LST data (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2011, 27: 2873–2882 [李辉, 彭松柏, 乔卫涛. 根据多时相夜间 MODIS LST 推断的腾冲地区新生代火山岩岩浆囊分布与活动特征. 岩石学报, 2011, 27: 2873–2882]
- Tucker R T, Zou H, Fan Q, et al. Ion microprobe dating of zircons from active Dayingshan volcano, Tengchong, SE Tibetan Plateau: Time scales and nature of magma chamber storage. *Lithos*, 2013, 172–173: 214–221
- Yu H M, Xu J D, Lin C Y, et al. Microstructural characteristics of trachyandesite lavas in Heikongshan, Ma'an Shan and Dayingshan volcanoes, Tengchong, Yunnan Province and its volcanological implications (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2012, 28: 1205–1216 [于红梅, 许建东, 林传勇, 等. 云南腾冲黑空山、马鞍山和打莺山火山粗安岩显微结构特征及其火山学意义. 岩石学报, 2012, 28: 1205–1216]
- Wu Q J, Tian X B, Zhang N L, et al. Receiver function estimated by maximum entropy deconvolution (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2003, 25: 382–389 [吴庆举, 田小波, 张乃铃, 等. 计算台站接收函数的最大熵谱反褶积方法. 地震学报, 2003, 25: 382–389]
- Tomfohrde D A, Nowack R L. Crustal structure beneath Taiwan using frequency-band inversion of receiver function waveforms. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 737–764
- Wu Q J, Li Y H, Zhang R Q, et al. Wavelet modelling of broad-band receiver functions. *Geophys J Int*, 2007, 170: 534–544

- 21 Li X, Li Z, Hao T, et al. A multi-frequency receiver function inversion approach for crustal velocity structure. *Comput Geosci*, 2017, 102: 45–55
- 22 Wu Z B, Xu T, Wu C L, et al. Crustal shear-wave velocity structure beneath the western Tibetan Plateau revealed by receiver function inversions (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2016, 59: 516–527 [武振波, 徐涛, 武澄洸, 等. 利用接收函数反演青藏高原西部地壳 S 波速度结构. *地球物理学报*, 2016, 59: 516–527]
- 23 Sambridge M. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm-I. Searching a parameter space. *Geophys J Int*, 1999, 138: 479–494
- 24 Sambridge M. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm-II. Appraising the ensemble. *Geophys J Int*, 1999, 138: 727–746
- 25 Thomson W T. Transmission of elastic waves through a stratified solid. *J Appl Phys*, 1950, 21: 89–93
- 26 Haskell N A. The dispersion of surface waves in multilayered media. *Bull Seismol Soc Am*, 1953, 43: 17–34
- 27 Xu Y, Li X L, Wang S. Crustal thickness and Poisson's ratio of the Tengchong volcanic area in southwestern China (in Chinese). 2017, 60: 2256–2264 [胥颐, 李雪垒, 汪晟. 腾冲火山区的地壳厚度和平均泊松比研究. *地球物理学报*, 2017, 60: 2256–2264]
- 28 Yang H, Hu J, Hu Y. Crustal structure in the Tengchong volcanic area and position of the magma chambers. *J Asian Earth Sci*, 2013, 73: 48–56
- 29 Zhang L, Hu Y L, Qin M, et al. Study on crustal and lithosphere thickness of Tengchong volcanic area in Yunnan (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2015, 58: 1622–1633 [张龙, 胡毅力, 秦敏, 等. 云南腾冲火山区地壳及岩石圈厚度研究. *地球物理学报*, 2015, 58: 1622–1633]
- 30 Zhao C P, Ran H, Chen K H. Present-day temperatures of magma chambers in the crust beneath Tengchong volcanic field, southwestern China: Estimation from carbon isotopic fractionation between CO₂ and CH₄ of free gases escaped from thermal springs (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2011, 27: 2883–2897 [赵慈平, 冉华, 陈坤华. 腾冲火山区壳内岩浆囊现今温度: 来自温泉逸出气体 CO₂, CH₄ 间碳同位素分馏的估计. *岩石学报*, 2011, 27: 2883–2897]
- 31 Chen Y L, Shao W, Zhou Y C. Experimental study on mechanical properties of granite after high temperature (in Chinese). *Chin Quart Mech*, 2011, 32: 397–402 [陈有亮, 邵伟, 周有成. 高温作用后花岗岩力学性能试验研究. *力学季刊*, 2011, 32: 397–402]
- 32 Zhang W, Sun Q, Hao S, et al. Experimental study on the variation of physical and mechanical properties of rock after high temperature treatment. *Appl Therm Eng*, 2016, 98: 1297–1304
- 33 Zhao Y W, Fan Q C. Magma origin and evolution of Maanshan volcano, Dayingshan volcano and Heikongshan volcano in Tengchong area (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2010, 26: 1133–1140 [赵勇伟, 樊棋诚. 腾冲马鞍山、打鹰山、黑空山岩浆来源与演化. *岩石学报*, 2010, 26: 1133–1140]
- 34 Sun J, Xu C F, Jiang Z, et al. The electrical structure of the crust and upper mantle in the west part of Yunnan Province and its relation of crustal tectonics (in Chinese). *Seismol Geol*, 1989, 11: 35–45 [孙洁, 徐常芳, 江钊, 等. 滇西地区地壳上地幔电性结构与地壳构造活动的关系. *地震地质*, 1989, 11: 35–45]
- 35 Jiang C S, Ye J Q, Cai S P, et al. Waveform characteristics of earthquakes in Tengchong volcanic area (in Chinese). *J Earthq Res*, 2005, 28: 349–352 [姜朝松, 叶建庆, 蔡绍平, 等. 腾冲火山区地震波形特征. *地震研究*, 2005, 28: 349–352]
- 36 Qin Q M, Zhang N, Nan P, et al. Geothermal area detection using Landsat ETM+ thermal infrared data and its mechanistic analysis—A case study in Tengchong, China. *Int J Appl Earth Observ Geoinform*, 2011, 13: 552–559
- 37 Bai D, Unsworth M J, Meju M, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging. *Nat Geosci*, 2010, 3: 358–362
- 38 Gao X, Su Y, Wang W, et al. Lower-crust S-wave velocity beneath western Yunnan Province from waveform inversion of dense seismic observations. *Terra Nova*, 2009, 21: 105–110

Summary for “腾冲火山区 S 波速度结构与岩浆活动特征”

Evidence of magma activity from S-wave velocity structure of the Tengchong volcanic area

LI XueLei^{1,2}, XU Yi^{1*} & WANG Sheng^{1,2}

¹ Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: xuyi@mail.iggcas.ac.cn

Tengchong is a young volcanic area near the Euro-Asian collision boundary in the southeastern Tibetan margin. Holocene volcanoes are mostly concentrated in the center of the Tengchong basin, where they construct a string-like volcanic cluster along the north-to-south direction. In order to study the magma activity and its relation with the volcanic distribution, we deployed a temporary earthquake observation within the Tengchong basin. The survey line is approximately 40 km long between the Heshui town in the south and the Gudong town in the north, passing through the Laoguipo, Dayingshan, Dakongshan, Xiaokongshan volcanoes and the Crater Lake. Broadband seismic instruments were installed at nine stations with an average 4 km spacing. The observation operated for a period of 14 months from May 2015 to July 2016. According to the Chinese Earthquake Bulletins, we selected 61 teleseismic events with magnitudes greater than M_s 5.0 and distance ranges between 30° and 90° . They include 1 $M_s \geq 8.0$ event, 9 $M_s \geq 7.0$ events, 49 $M_s \geq 6.0$ events, 2 $M_s \geq 5.0$ events. Most of the events were located in the western Pacific region, however, they were very rare in west of the study area. Finally, 612 teleseismic waveforms are obtained from the recording data at nine stations.

A time-domain deconvolution technique is employed to compute receiver functions, in which the maximum entropy as the rule to determine auto-correlation and cross-correlation functions is used to calculate receiver functions. The advantage of this is to extract valid signals that are overwhelmed by background noise. The length-scale of seismic structure is sensitive to the waveform frequency, thus two Gaussian filters (1.0 and 2.5) were applied to constrain the receiver functions. The former is used to extract large-scale velocity structures and the latter to resolve detailed structures. Due to the low signal/noise ratio for receiver functions with $G > 2.5$, they are not used in our inversion. The neighborhood algorithm (NA) was used for the receiver function inversion. This approach is a derivative-free searching method for finding models of acceptable data fit in a multi-dimensional parameter space. The objective is to find an ensemble of models that preferentially sample regions of parameter space that exhibit a good fit to data, rather than seeking a single optimal model. A synthetic receiver function is calculated from the true model using the Thomson-Haskell matrix method.

We selected 1000 minimal misfit models to calculate the average S-wave velocity model for each station. Results from nine stations show that there is an interconnected low-velocity zone beneath the Dayingshan, Dakongshan and Heikongshan volcanoes. It is 6–15 km at depth and ranges ~16 km from north to south. A small, low-velocity zone is found beneath the Crater Lake, which is situated at 9–16 km depth with a size of ≤ 8 km. They are considered to indicators of magma chambers beneath the volcanoes. A heat flow channel which connects two magma chambers can be recognized in the deep crust. To the south, prominent low velocities are observed beneath the Laoguipo volcano, suggesting strong magma activities at depths of 10–25 km, partly affected by the intersection of the Dayingjiang fault zone and the Tengchong volcanic fault zone. It may belong to another magma chamber within the crust also connected to the nearby Maanshan volcano. The Moho depth of the volcanic area varies between 38 and 41 km and is partially elevated beneath the Dakongshan volcano group. For some stations, the Moho appears to be a transition zone with an open channel for the heat flow into the crust from the upper mantle.

Tengchong volcanic area, receiver functions, S-wave velocity structure, magma activity

doi: 10.1360/N972017-00123