

范心甜,危自根,谢军,等. 2025. 腾冲火山壳幔过渡带分析及岩浆上涌通道初探[J]. 地震研究, 48(1): 041–048, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0005.

Fan X D, Wei Z G, Xie J, et al. 2025. Study of the Crust–Mantle transition zone and magma upwelling conduits beneath the Tengchong volcano area[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(1): 041–048, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0005.

腾冲火山壳幔过渡带分析及岩浆上涌通道初探*

范心甜^{1,2}, 危自根^{1*}, 谢 军¹, 程智伟³, 凌 媛⁴, 李雪垒⁵, 刘益炜^{1,2}

- (1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 湖北 武汉 430077;
2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038;
4. 中国科学院地质与地球物理研究所地球和行星物理重点实验室, 北京 100029;
5. 湖南工商大学 微电子与物理学院, 湖南 长沙 410205)

摘要: 壳幔过渡带是地壳与地幔物质和能量的交换场所, 其结构特征与该区的深部过程和构造演化密切相关。提取腾冲火山区 31 个地震台站下方的接收函数 $H-\kappa$ 叠加获得的地壳厚度随频率变化特征和接收函数的 P_s/P 、 P_p/P_s 振幅比, 发现盈江断裂北部的黑空山—燃灯寺和南侧沙坝台区域具有比周边区域更低的振幅比, 约有 2 km 地壳厚度差异。将该观测结果与前人获得的这两个区域相对薄的地壳厚度与高的 V_p/V_s 比值相结合, 表明黑空山—燃灯寺和沙坝台区域具有厚的壳幔过渡带, 推测其是地幔物质涌入地壳的通道。结合前人获得的该区上、中、下地壳都存在大片低速体的特征, 推测来自地幔的岩浆很可能沿着腾冲火山区黑空山—燃灯寺和沙坝台这两个区域上涌到地壳, 并依次在下、中和上地壳富集和横向展布, 最终沿多个通道喷出地表。

关键词: 腾冲火山; 接收函数; 振幅比; 地壳厚度; 壳幔过渡带; 地幔上涌通道

中图分类号: P317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)01-0041-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0005

0 引言

腾冲火山区位于云南省西部, 地处印度板块与欧亚板块碰撞带的东南缘。该区构造活动频繁, 地震和火山活动较多, 地质现象复杂多样, 是地球科学研究的天然实验室。火山区内自新生代以来经历了多次火山喷发, 自中新世晚期开始, 火山活动逐渐增强, 并在晚更新世达到顶峰(李霓, 张柳毅, 2011), 最近一次喷发大约在公元 1600 年。尽管目前腾冲火山处于休眠状态, 但研究推测, 火山内部岩浆处于活动状态, 仍具有再度喷

发的可能性(皇甫岗, 1997)。因此, 腾冲火山区的深部结构研究对于了解中国西南区域构造演化、火山活动机制以及地震灾害预防具有重要意义。

目前腾冲火山区的地下结构研究已经取得了一些进展。地球化学研究通过对腾冲火山岩石、矿物及同位素的分析, 认为腾冲火山的岩浆源区主要来自上地幔, 并且受到了地壳物质的明显混染(Tian et al., 2018)。地热研究发现腾冲火山区高地热异常明显, 推测与该区的深部熔融作用和浅部构造活动密切相关(赵慈平等, 2011)。断裂构造、地壳变形及应力场研究发现, 腾冲火山区处于印度板块和欧亚板块碰撞挤压的复杂构造背

* 收稿日期: 2024-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金(42474094, 42306084); 湖北省自然科学基金(2023AFB1076).

第一作者简介: 范心甜(2000-), 硕士研究生在读, 主要从事地震学壳幔结构研究.

E-mail: Fanxintian23@mail.ucas.ac.cn.

✉ 通信作者简介: 危自根(1984-), 副研究员, 主要从事地震学壳幔结构研究. E-mail: weizigen@apm.ac.cn.

景, 岩浆上升通道受控于断裂系统 (季灵运等, 2011)。地震学研究发现腾冲火山区地壳具有低的 P 波和 S 波速度、高的 V_p/V_s 、横向变化强烈的 30 ~ 40 km 地壳厚度, 显示了地壳与地幔的分界面和壳内熔融区 (胡家富等, 2008; Shen *et al.*, 2022; 马永等, 2023; Liu *et al.*, 2023; 范心甜等, 2024)。这些研究成果为我们提供了腾冲火山区深部结构的重要信息, 但关于该火山区壳幔结构特征以及岩浆运移规律仍有许多细节和深部机制有待进一步研究。

大陆岩石圈的下地壳 - 上地幔边界是物质和能量交换的重要区域。深入理解地壳 - 地幔过渡带的结构和性质对于分析火山地区岩浆的上涌通道和运移特征至关重要。现有研究成果为我们理解腾冲火山内部结构和岩浆活动提供了宝贵的参考, 但尚缺乏对该区域壳幔过渡带结构的系统分析。地震学中常用的接收函数记录了地震波在穿过地壳和地幔时的转换和反射过程, 为探索地壳和地幔结构提供了重要信息。研究表明, Moho 面的 Ps 转换波和 PpPs 多次反射波与直达 P 波的振幅比, 以及由接收函数 $H - \kappa$ 叠加方法得到的地壳厚度随频率变化的特征, 能有效约束壳幔过渡带的特性, 如其是否尖锐或渐变等。鉴于此, 本文基于腾冲火山区密集的地震台站远震接收函数, 分析壳幔过渡带的 Ps/P 和 PpPs/P 振幅比, 以及地壳厚度随频率的变化关系, 并结合该地区的地壳厚度、 V_p/V_s 和 S 波速度特征, 共同约束该地区壳幔过渡带的结构特性, 进一步探索火山区下方岩浆运移及相关上涌通道的信息。

1 理论分析与数据来源

1.1 壳幔过渡带类型对接收函数振幅以及 $H - \kappa$ 叠加结果影响

壳幔过渡带是壳幔物质及能量交换的重要动力学界面, 对地壳和地幔的形成、演化以及深层动力过程起着关键作用。Davydova 等 (1972) 和滕吉文 (2006) 研究显示, 壳幔过渡带通常可分为 3 种类型: 一级间断面型 (尖锐型)、速度梯度连续或不连续的带型 (渐变型) 以及高、低速交

替的薄层束型 (倒转型)。接收函数 $H - \kappa$ 叠加方法 (Zhu, Kanamori, 2000) 利用来自 Moho 面的 Ps、PpPs 以及 PsPs/PpPs 震相与直达 P 波到时差, 能同时获取地壳厚度与平均 V_p/V_s 比值。复杂的壳幔过渡带会影响 Moho 面震相的接收函数到时和波形信息, 从而使接收函数 $H - \kappa$ 叠加结果偏离实际值 (Mansour *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2020)。Ps/P 振幅比可反映地震波在 Moho 面上由 P 波转换成 S 波的效率及界面性质, PpPs/P 振幅比反映了 P 波在 Moho 面反射后再转换成 S 波的效率。较高的比值往往意味着 Moho 面较为尖锐, 存在明显的速度对比, 反射和转换效率高; 较低的比值则可能指示 Moho 面不明显或具有渐变性质。

本文通过理论正演计算和分析了不同频率下不同性质的壳幔过渡带对接收函数振幅及 $H - \kappa$ 叠加结果的影响 (图 1)。参考前人在腾冲火山区得到的平均 $H - \kappa$ 结果 (范心甜等, 2025), 分别设置了地壳厚度为 38 km, 波速比为 1.78 的尖锐型壳幔结构模型, 以及从 30 km 开始的厚度为 8 km 壳幔过渡带的渐变型和倒转型壳幔结构模型 (图 1a), 并利用反射率法 (Levin, Park, 1997) 计算了高斯系数为 1.0 (大致对应 0.48 Hz) 和 3.0 (大致对应 1.44 Hz) 的理论径向接收函数 (图 1b、c)。

图 1b、c 中接收函数波形显示, 两种频率下, 尖锐型壳幔过渡带得到的接收函数 Ps 和多次反射波 PpPs 震相都十分明显, 且对应震相的到时一样; 相较之下, 渐变型壳幔过渡带的接收函数 Ps 及 PpPs 震相更为平缓, PpPs 多次波能量明显较低且波列宽度更宽; 倒转型过渡带的接收函数的震相则更为复杂, 壳幔过渡带内有不同间断面的多个震相, 尤其是当 $G = 3.0$ 时, Ps 转换波能量更低, PpPs 震相已经变得不易识别。值得注意的是, 当 $G = 3.0$ 时, 渐变型过渡带 PpPs 振幅要比另外两种类型低许多, 这主要是由过渡带相邻层速度差异只有其他类型的约 1/10, 使其 P - S 转换系数明显偏低。

笔者进一步计算了接收函数 Moho 面 Ps 转换震相与直达 P 波振幅比值 (Ps/P 振幅比) 以及 PpPs 多次波震相与直达 P 波振幅比值 (PpPs/P 振幅比) (表 1)。结果表明, 在不同频率下尖锐型壳幔过渡

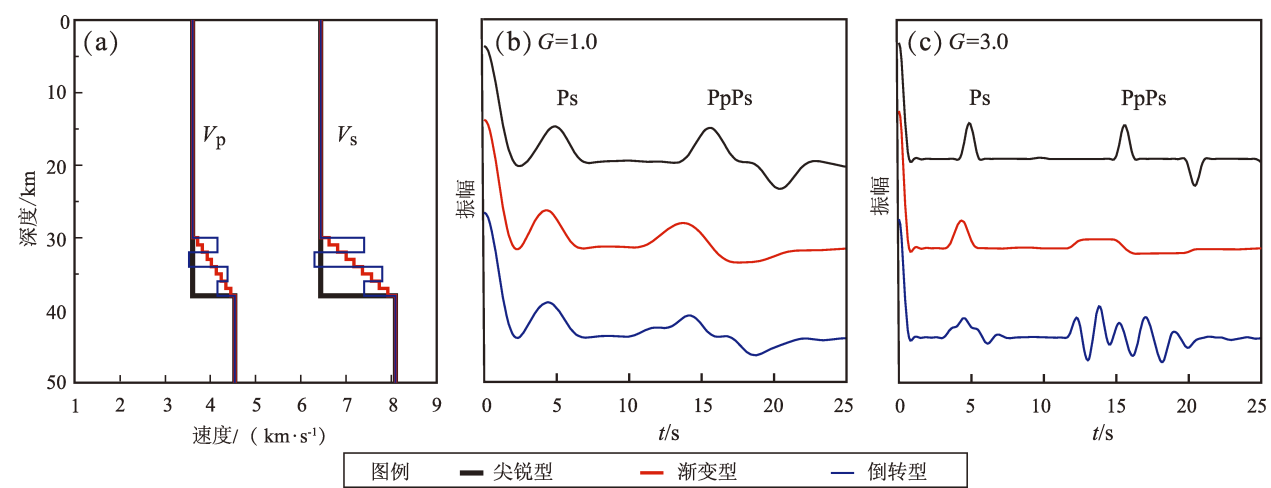


图 1 不同类型的壳幔过渡带地壳模型 (a) 及对应的不同高斯系数下的理论接收函数 (b, c)

Fig. 1 Different Crust – Mantle transition zone models (a) and corresponding theoretical receive functions with different Gaussian coefficients (b, c)

带接收函数的 Ps/P、PpPs/P 振幅比均差别不大，且都比其他两种壳幔过渡带高。当 $G = 1.0$ 时，3 种类型的壳幔过渡带对应的接收函数的 Ps/P 振幅比差别不大，而渐变型和倒转型壳幔过渡带过渡带对应接收函数的 PpPs/P 振幅比明显低于尖锐型；当 $G = 3.0$ 时，渐变型和倒转型壳幔过渡带的接收函数 Ps/P 振幅比明显低于尖锐型壳幔过渡带，而此时渐变型壳幔过渡带所对应接收函数的 PpPs/P 振幅比明显低于其他两种壳幔过渡带。

通过对不同类型壳幔过渡带在不同频率下的

理论接收函数进行 $H - \kappa$ 叠加（表 1），结果发现：尖锐型壳幔过渡带接收函数得到的地壳厚度和 V_p/V_s 与给定的真实地壳厚度（厚度为 38 km，波速比为 1.78）一样，且不受频率变化的影响；渐变型和倒转型壳幔过渡带接收函数的 V_p/V_s 和真实地壳 V_p/V_s 差别不大，但地壳厚度差异明显，且低于给定的真实地壳厚度。其中，渐变型壳幔过渡带经 $H - \kappa$ 叠加获得的地壳厚度随频率升高逐渐接近过渡带底部；而倒转型过渡带得到的地壳厚度随频率的升高逐渐接近过渡带顶部。

表 1 壳幔过渡带对接收函数 $H - \kappa$ 叠加结果和震相振幅比的影响

Tab. 1 Impact of the Crust – Mantle transition zone on the receiver functions $H - \kappa$ stacking results and phase amplitude ratios

速度模型（高斯系数）	H/km	V_p/V_s	dH/km	$d(V_p/V_s)$	Ps/P 振幅比	PpPs/P 振幅比
尖锐型 ($G = 1.0$)	38.0	1.78	0	0	0.304	0.296
渐变型 ($G = 1.0$)	34.46	1.77	-3.54	-0.01	0.29	0.191
倒转型 ($G = 1.0$)	35.53	1.77	-2.47	-0.01	0.276	0.17
尖锐型 ($G = 3.0$)	38.0	1.78	0	0	0.307	0.29
渐变型 ($G = 3.0$)	35.25	1.76	-2.75	-0.02	0.2	0.066
倒转型 ($G = 3.0$)	33.92	1.83	-4.08	0.05	0.163	0.263

1.2 腾冲火山接收函数 Ps/P 及 PpPs/P 振幅比及地壳厚度随频率的变化

本文选用布设于腾冲火山区的 31 个固定和流动地震台的远震三分量数据，包括腾冲火山地震台网布设的 11 个宽频带台站记录到的 2017—2020

年的数据、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院于 2018—2020 年先后布设的 12 个流动地震台记录到的数据以及中国科学院地质与地球物理研究所布设的 8 个宽频带地震台记录到的 2018—2019 年的数据（图 2）。基于上述数据，截取震级

大于 5.5 级,震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 的地震事件 (图 3a), 采用时间域迭代反褶积方法在直达 P 波之前 20 s 和之后 100 s 内提取了不同频率的接收函数。在人工删除 Moho 面主要震相不清晰等低质量的波形之后, 对保留的 4 978 条接收函数进行振幅归一化, 然后再分单台各自叠加成一条接收函数, 便于后续数据处理。图 3b 展示了不同高斯系数下, 单台所有接收函数叠加后的波形。

针对单台叠加后接收函数波形, 参考范心甜等 (2025) 采用多频接收函数 $H-\kappa$ 叠加方法获得的地壳厚度与 V_p/V_s 结果, 确定转换波 P_s 以及 $PpPs$ 多次波的大致走时范围, 然后再分别选取走时范围内对应的最大振幅值。由于此前已对接收函数进行了振幅归一化, 故将此时提取的最大振幅值分别直接作为接收函数 Moho 面 P_s 转换震相与直达 P 波振幅比值 (P_s/P 振幅比) 以及 $PpPs$ 多次波震相与直达 P 波振幅比值 ($PpPs/P$ 振幅比)。本文进一步计算了 3 个高斯系数 ($G=1、2、3$) 条件下获取的地壳厚度之间的最大差值, 用于表征地壳厚度随频率的变化。

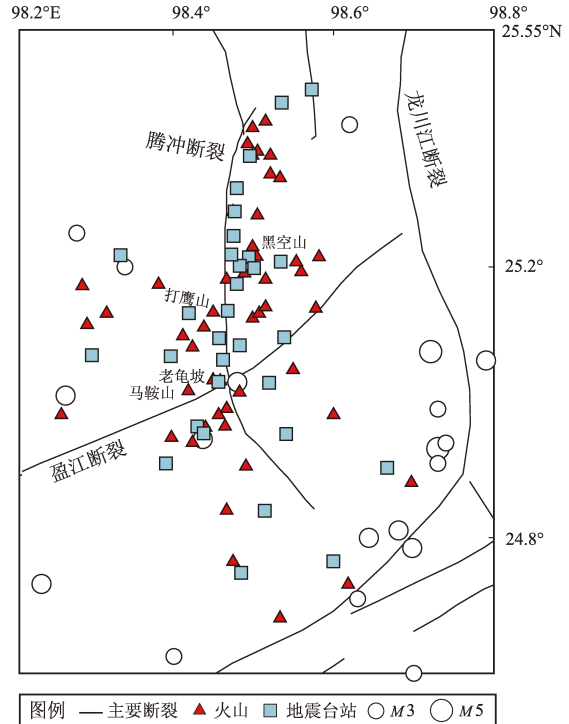


图 2 腾冲火山区地震台站、火山及地震分布

Fig. 2 Seismic stations, volcanoes and the earthquake distribution in Tengchong volcanic area

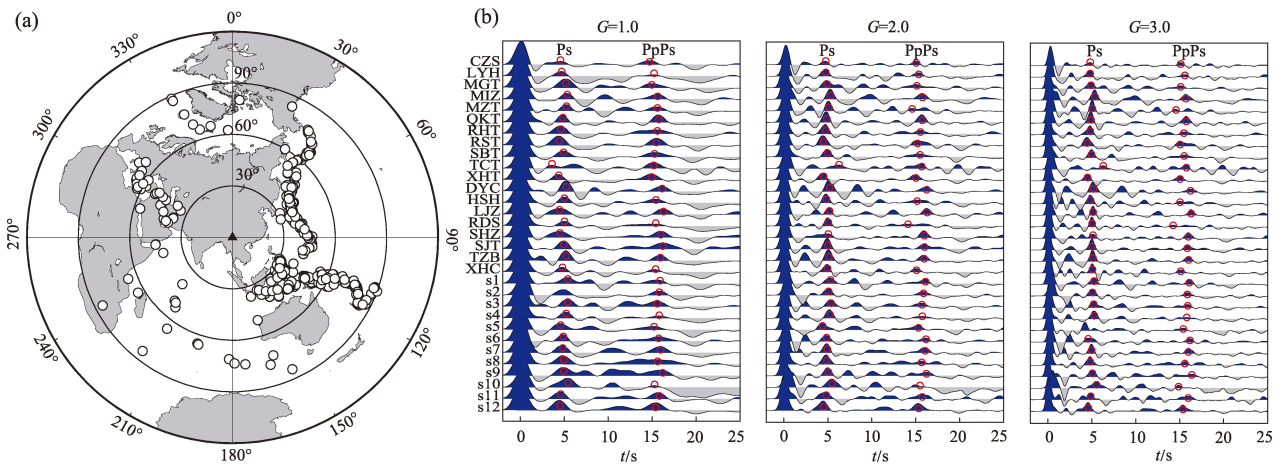


图 3 本文用到的远震事件的震中分布 (a) 和不同高斯系数下单台接收函数叠加后的波形 (b)

Fig. 3 Epicenter distribution of teleseismic events used in this study (a) and stacked receiver functions for each station with different Gaussian coefficients (b)

2 结果与讨论

由图 1 和表 1 可见, 不同壳幔过渡带接收函数波形、 P_s/P 和 $PpPs/P$ 振幅比以及不同频率 $H-\kappa$ 叠加得到的地壳厚度变化特征存在差异。尖锐型

壳幔过渡带 $H-\kappa$ 叠加得到的地壳厚度不依赖于频率, 而渐变型和倒转型壳幔过渡带的存在会导致 $H-\kappa$ 搜索得出偏低的地壳厚度, 且随频率变化较大。尖锐型壳幔过渡带得到的 P_s/P 和 $PpPs/P$ 振幅相较其他两种类型壳幔过渡带结构的比值要大。当有岩浆从地幔经过 Moho 面进入地壳时, 不仅可

能会导致地壳厚度和 V_p/V_s 比值发生变化(Ji *et al.*, 2009), 还会导致原本可能的尖锐壳幔过渡带转变为厚的壳幔过渡带。因此, 联合分析地壳厚度、

V_p/V_s 比值、多频率 $H-\kappa$ 叠加得到的地壳厚度特征、 P_s/P 和 P_pP_s/P 振幅比能用来约束腾冲火山区壳幔过渡带的结构特征。

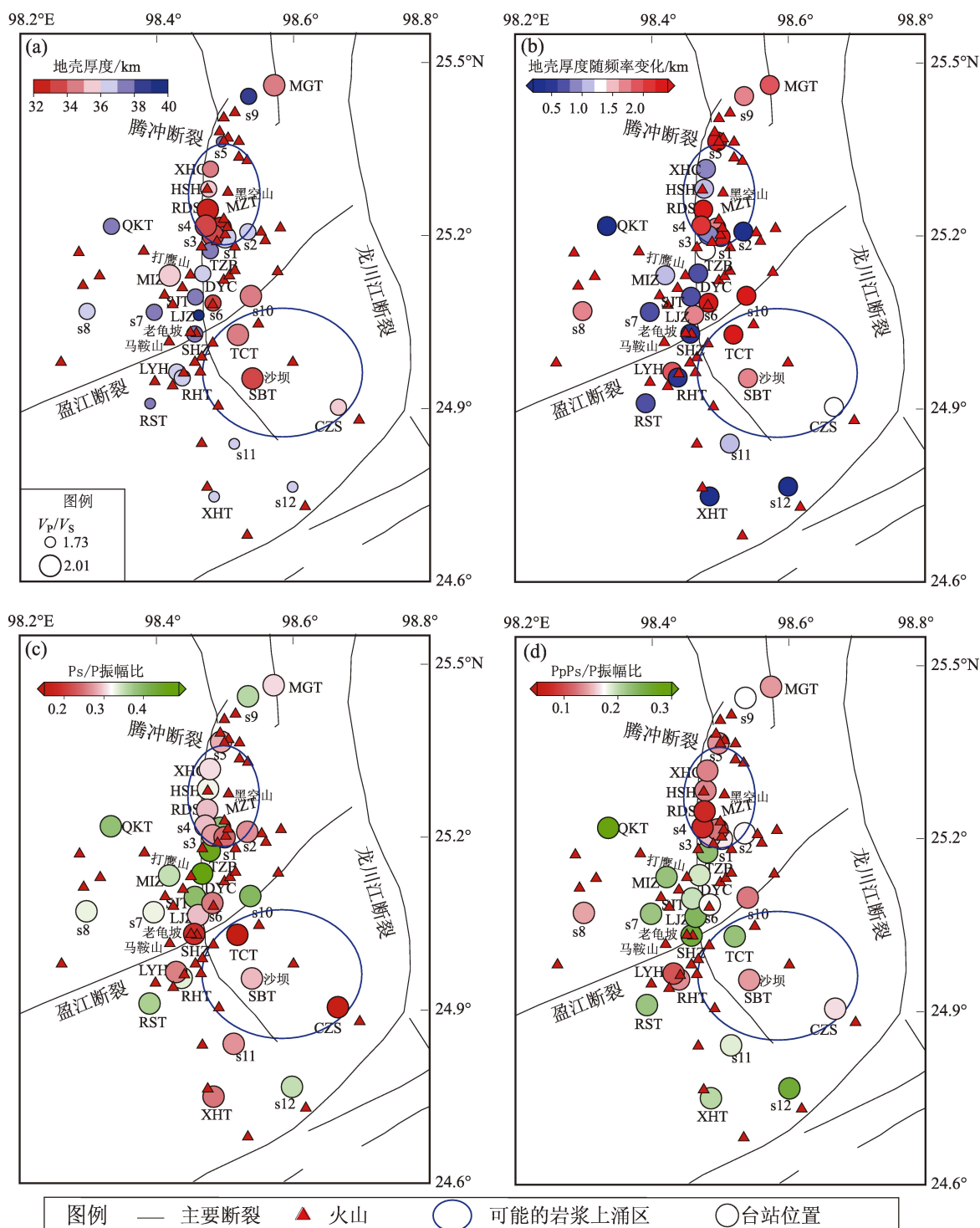


图4 腾冲火山区地壳厚度和 V_p/V_s 比值 (a)、地壳厚度随频率变化 (b) 以及 P_s/P 和 P_pP_s/P 振幅比分布特征 (c、d)

Fig. 4 Crustal thickness and V_p/V_s ratio (a), variations in Crustal thickness with frequency (b), distribution characteristics of P_s/P and P_pP_s/P amplitude ratios (c, d)

赵慈平等 (2011) 和李雪垒等 (2017) 分别基于地热和 S 波速度研究提出盈江断裂北部的黑空山—燃灯寺 (RDS) 周边区域可能是地幔物质上涌通道。近年来越来越多学者发现该区域壳内存在明显比周边偏低的 P 波和 S 波速度 (Li *et al.*, 2018; 华雨淋, 吕彦, 2019; Peng *et al.*, 2021; Shen *et al.*, 2022)。范心甜等 (2025) 基于更加密集的地震观测资料获得的地壳厚度、 V_p/V_s 以及 S 波速度也支持前人的推测 (图 4a)。本文进一步提取了该区 31 个台站不同频率 $H-\kappa$ 叠加得到的地壳厚度差异 (图 4b), 发现在黑空山区域 (椭圆) 大致表现出地壳厚度随频率变化相对较大的特点, 最大地壳厚度差异超过 2 km。笔者还发现该区域接收函数 P_s/P 以及 P_pP_s/P 振幅比整体偏低 (图 4c、d), 尤其是相较于南侧的打鹰山和老龟山区域。本文获得的地壳厚度随频率变化大的特点以及周边相比 P/P_s 及 P_pP_s/P 振幅比, 为前人推测的黑空山—燃灯寺 (RDS) 区域可能是地幔物质上涌通道提供了新的证据。

从图 4b ~ d 可看出, 在盈江断裂南侧沙坝台 (SBT) 附近也存在一个地壳厚度差异较大以及 P_s/P 振幅比相对偏低的区域, 该区地壳厚度随频率变化的差异达到 2.7 km, P_s/P 振幅比大致是周边区域的一半。这种特征与前人研究的该区与部分熔融相关的地壳 V_p/V_s 以及可能已经改造减薄的地壳厚度一致 (图 4a)。值得注意的是, 该区台站 TCT 和 s11 的 P_pP_s/P 振幅比较高。在接收函数中, P_pP_s 震相横向采样范围是 P_s 震相的 3 倍以上, 因此 P_s/P 振幅比对壳幔过渡带具有更高的约束力, 推测这两个台站 P_pP_s/P 振幅比较高可能反映了沙坝区周边下方的结构信息。将本文观测结果, 结合双差地震层析成像获得的该区中下地壳偏低的 P 波速度 (马永等, 2023)、接收函数和面波联合反演获得的偏低的 S 波速度 (范心甜等, 2025) 以及相对较高的地温梯度 (赵慈平等, 2011), 可以支持沙坝台附近区域地壳过渡带也具有相对厚的特征, 并且认为其可能也是一个岩浆上涌通道区。

范心甜等 (2025) 通过反演腾冲火山区 S 波速度结构发现地壳内 10 km、约 20 km、约 30 km 和约 50 km 深度附近存在大尺度的低速异常特征, 部分不同深度的低速体相互联通。基于这一结果

和本文 $H-\kappa$ 叠加获得的地壳厚度随频率变化特征和 P_s/P 以及 P_pP_s/P 振幅比分布, 笔者认为来自地幔的岩浆通过盈江断裂北部的黑空山—燃灯寺 (RDS) 区域以及南侧沙坝台 (SBT) 区域上涌到地壳底部, 然后横向展布并经过富集后沿不同通道上升到中地壳并持续富集以及横向展布, 接着进一步上涌到上地壳并持续富集和展布, 部分岩浆在早、晚更新世和全新世沿着多个通道喷出腾冲火山区地表 (图 5)。

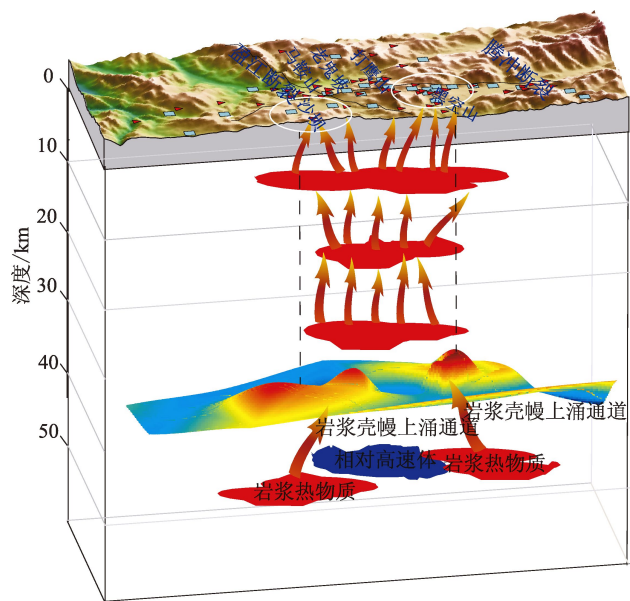


图 5 腾冲火山区岩浆上涌通道示意图

Fig. 5 Schematic model of magma upwelling channel in the Tengchong volcanic area

3 结论

本文提取了腾冲火山区 31 个固定和流动地震台的远震接收函数, 计算了单台接收函数 P_s/P 和 P_pP_s/P 振幅比以及 $H-\kappa$ 叠加方法获得的地壳厚度随频率变化特征, 结合前人获得的该区地壳厚度、 V_p/V_s 比值以及 S 波和 P 波速度分布, 研究了火山区壳幔过渡带结构, 所得结论如下:

(1) 腾冲火山区盈江断裂北部的黑空山—燃灯寺和南侧沙坝台区域具有低的接收函数 P_s/P 和 P_pP_s/P 振幅比和大的地壳厚度随频率变化的差异。

(2) 黑空山—燃灯寺和沙坝台区域的壳幔过渡带比周边区域相对较厚, 推测该区可能是地幔

物质涌入地壳的上涌通道。

(3) 地幔岩浆沿着黑空山—燃灯寺和沙坝台区域上涌到地壳, 并依次在下、中和上地壳展布和富集, 最终沿多个通道喷出腾冲火山区地表。

感谢中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 云南省地震局和中国科学院地质与地球物理研究所提供数据。

参考文献:

- 范心甜, 危自根, 储日升, 等. 2025. 腾冲火山壳幔结构及其对岩浆系统的启示[J]. 地球物理学报, doi:10.6038/cjg2023R0631.
- Fan X T, Wei Z G, Chu R S, *et al.* 2025. Crust – mantle structure of Tengchong volcanic area and its implication for magmatic systems[J]. Chinese Journal of Geophysics, doi: 10.6038/cjg2023R0631. (in Chinese)
- 胡家富, 胡毅力, 夏静瑜, 等. 2008. 缅甸弧及邻区的壳幔 S 波速度结构与动力学过程[J]. 地球物理学报, 51(1): 140 – 148.
- Hu J F, Hu Y L, Xia J Y, *et al.* 2008. Crust – mantle velocity structure of S wave and dynamic process beneath Burma Arc and its adjacent regions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(1): 140 – 148. (in Chinese)
- 华雨淋, 吕彦. 2019. 腾冲火山及周边地区双差层析成像[J]. 地球物理学报, 62(8): 2982 – 2990.
- Hua Y L, Lyu Y. 2019. Double differential tomography of the Tengchong volcano and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(8): 2982 – 2990. (in Chinese)
- 皇甫岗. 1997. 腾冲火山研究综述[J]. 地震研究, 20(4): 431 – 437.
- Huangfu G. 1997. Review of studies on Tengchong volcanoes[J]. Journal of Seismological Research, 20(4): 431 – 437. (in Chinese)
- 季灵运, 王庆良, 崔笃信, 等. 2011. 利用 SBAS – DInSAR 技术提取腾冲火山区形变时间序列[J]. 大地测量与地球动力学, 31(4): 149 – 153.
- Ji L Y, Wang Q L, Cui D X, *et al.* 2011. Time series of deformation in tengchong volcanic area extracted by SBAS – DInSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 31(4): 149 – 153. (in Chinese)
- 李霓, 张柳毅. 2011. 云南腾冲新期火山岩矿物及其熔体包裹体研究[J]. 岩石学报, 27(10): 2842 – 2854.
- Li N, Zhang L Y. 2011. A study on volcanic minerals and hosted melt inclusions in newly – erupted Tengchong volcanicrocks, Yunnan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 2842 – 2854. (in Chinese)
- 李雪垒, 胥颢, 汪晟. 2017. 腾冲火山区 S 波速度结构与岩浆活动特征[J]. 科学通报, 62(26): 3067 – 3077.
- Li X L, Xu Y, Wang S. 2017. Evidence of magma activity from S-wave velocity structure of the Tengchong volcanic area[J]. Chinese Science Bulletin, 62(26): 3067 – 3077. (in Chinese)
- 马永, 张海江, 高磊, 等. 2023. 滇西地区地壳三维精细结构成像与构造特征研究[J]. 地球物理学报, 66(9): 3674 – 691.
- Ma Y, Zhang H J, Gao L, *et al.* 2023. Three-dimensional fine structure imaging and tectonic characteristics of the crust in western Yunnan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(9): 3674 – 3691. (in Chinese)
- 滕吉文. 2006. 地球深部壳 – 幔边界的层束精细结构与物理属性研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 36(1): 1 – 23.
- Teng J W. 2006. Research on layer – bundle fine structures and physical [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 36(1): 1 – 23. (in Chinese)
- 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 2011. 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[J]. 岩石学报, 27(10): 2883 – 2897.
- Zhao C P, Ran H, Chen K H. 2011. 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[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 2883 – 2897. (in Chinese)
- Davydova N I, Kosminskaya I P, Kapustian N K, *et al.* 1972. Models of the earth's crust and *m* – boundary [J]. Geophys, 38(3): 369 – 393.
- Ji S C, Wang Q, Salisbury M H. 2009. Composition and tectonic evolution of the Chinese continental crust constrained by Poisson's ratio[J]. Tectonophysics, 463 15 – 30.
- Levin V, Park J. 1997. Crustal anisotropy in the Ural Mountains foredeep from teleseismic receiver functions[J]. Geophysical Research Letters, 24(11): 1283 – 1286.
- Li M K, Zhang S X, Wu T, *et al.* 2018. Fine crustal and uppermost Mantle S-wave velocity structure beneath the Tengchong volcanic area inferred from receiver function and surface – wave dispersion: constraints on magma chamber distribution[J]. Bulletin of Volcanology, 80(3): 25.
- Liu Y, Yu Z, Zhang Z, *et al.* 2023. The high-resolution community velocity model V2.0 of southwest China, constructed by joint body and surface wave tomography of data recorded at temporary dense arrays [J]. Science China Earth Sciences, 66(10): 2368 – 2385.
- Mansour W B, England R W, Fishwick S, *et al.* 2018. Crustal properties of the northern Scandinavian mountains and Fennoscandian shield from analysis of teleseismic Receiver Functions[J]. Geophysical Journal International, 214(1): doi:10.1093/gji/ggy140.
- Peng H C, J Badal, Hu J F, *et al.* 2021. Lithospheric dynamics in the vicinity of the Tengchong volcanic field(southeastern margin of Tibet): an investigation using P receiver functions[J]. Geophysical Journal International, 224(2): 1326 – 1343.
- Shen W H, Liu S L, Yang D H, *et al.* 2022. The crustal and uppermost Mantle dynamics of the Tengchong – Baoshan region revealed by P wave velocity and azimuthal anisotropic tomography[J]. Geophysical

- Journal International, 230(2):1092–1105.
- Tian H, Yang W, Li S, *et al.* 2018. Low $\delta^{26}\text{Mg}$ volcanic rocks of Tengchong in southwestern China: A deep carbon cycle induced by supercritical liquids [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 240: 191–219.
- Wei Z G, Li Z W, Chen L, *et al.* 2020. Crustal structure underneath central China across the Tibetan Plateau, the North China Craton, the South China Block and the Qinling – Dabie Orogen constrained by multifrequency receiver function and surface wave data[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 202, doi: org/10.1016/j.jseas.2020.104535.
- Zhu L P, Kanamori H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B2):2969–2980.

Study of the Crust – Mantle Transition Zone and Magma Upwelling Conduits Beneath the Tengchong Volcano Area

FAN Xintian^{1,2}, WEI Zigen¹, XIE Jun¹, CHENG Zhiwei³, LING Yuan⁴, LI Xuelei⁵, LIU Yiwei^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, Hubei, China*)

(2. *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3. *School of Earth Sciences and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China*)

(4. *Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

(5. *School of Microelectronics and Physics, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, Hunan, China*)

Abstract

The Crust – Mantle transition zone serves as a critical interface for the exchange of material and energy between the Earth's Crust and Mantle, closely tied to deep processes and tectonic evolution in the region. This study extracts characteristics of crustal thickness variation with frequency from receiver functions $H - \kappa$ stacking beneath 31 seismic stations in the Tengchong volcanic area, as well as the Ps/P and PpPs/P amplitude ratios of the receiver functions. It reveals that the Heikongshan – Randengsi area to the north of the Yingjiang fault and the Shabatai area to the south exhibit lower amplitude ratios and a crustal thickness difference of approximately 2 km compared to surrounding regions. Combining these observations with previous findings of relatively thin Crust and high V_p/V_s ratios in these two areas suggests a thick Crust – Mantle transition zone, hypothesized as conduits for Mantle material into the Crust. Building on previous findings of extensive low – velocity features in the upper, middle, and lower Crust of the region, this paper postulates that magma from the Mantle likely ascends through the Crust along the Tengchong volcanic area, specifically through the regions of Heikongshan – Randengsi and Shabatai. Subsequently, it enriches and laterally spreads within the lower, middle, and upper Crust, eventually erupting onto the surface through multiple channels.

Keywords: Tengchong volcano area; amplitude ratios of receiver functions; crustal thickness; Crust – Mantle transition zone; Mantle upwelling conduits