

邓晓果,王夫运,马策军,等. 2022. 人工地震测深揭示云南中部地区不同构造单元地壳结构特征[J]. 地震研究, 45(4): 517–525, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0056.

Deng X G, Wang F Y, Ma C J, et al. 2022. The crustal structure characteristics of different tectonic units in central Yunnan revealed by artificial seismic sounding [J]. *Journal of Seismological Research*, 45 (4): 517–525, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0056.

人工地震测深揭示云南中部地区 不同构造单元地壳结构特征*

邓晓果, 王夫运, 马策军, 杨卓欣

(中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450003)

摘要: 基于 24°N 线一带横穿云南中部地区的人工地震测线镇康—泸西剖面的 11 次人工地震爆破记录, 利用震相追踪分析方法, 拾取了沿剖面的壳内主要折射和反射震相, 结合一维地壳分层模型对这些震相到时进行了走时拟合, 获得了沿镇康—泸西剖面的地壳—地幔速度结构模型。结果表明: 沿剖面地壳各界面形态由西向东呈现逐渐增厚的特征, 中下地壳厚度变化与莫霍面基本一致, 三江褶皱系以东的扬子地台和华南褶皱系上地壳逐渐减薄, 扬子地台内部玉溪至弥勒一带上地壳增厚。

关键词: 云南中部; 人工地震; 地壳速度结构; Moho 面

中图分类号: P315.24

文献标识码: A

文章编号: 1000–0666(2022)04–0517–09

doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2022. 0056

0 引言

云南地区位于青藏高原东南缘, 是特提斯—喜马拉雅构造域东南段构造线明显转折的部位, 也是我国主要地震活动构造带——南北地震带的南段, 是我国大陆强震频度最高的地区之一。在印度板块与欧亚板块碰撞的构造背景下, 由于青藏高原北面受西伯利亚地台阻挡, 物质东流又受高强度块体四川盆地的阻挡, 低强度的三江(云南)地区成为青藏高原东南向流转向近南向的通道(熊熊, 裴顺平, 2001; 张中杰等, 2005; 崔仲雄, 裴顺平, 2009)。由于自晚元古代以来古大洋向其北部和东部地台的长期挤压和俯冲, 特别是 45 Ma 以来印度板块与欧亚板块的碰撞, 使得云南及其邻区产生了强烈的地壳变形, 而上新世以来的高原大幅隆升对其边缘又产生了完全不同的

影响(黄汲清, 陈炳蔚, 1987; 陈炳蔚等, 1987; 从柏林, 吴根耀, 1993; 邓起东等, 1994; Yin, Harrison, 2000; 张培震等, 2003)。2008 年以来, 瑞丽、姚安、盈江、彝良、巧家先后发生 4.9 级以上地震, 2014 年先后发生了鲁甸 6.5 级地震和景谷 6.6 级地震, 2021 年发生了漾濞 6.4 级地震, 显示位于青藏高原东南缘的云南地区进入了地震活跃期。

为探明云南地区地震、火山等活动的深部构造背景, 20 世纪 80 年代以来, 以中国地震局为代表的一些单位先后实施了滇深 82 工程、滇深 86 工程、腾深 99 工程等野外人工地震测深工作, 获得了较丰富的人工地震测深资料。许多研究者依据地震测深资料的传统解释方法, 先后对这些资料作出了解释(胡鸿翔等, 1986; 胡鸿翔, 冯永革, 1998; 阚荣举, 林中洋, 1986; 林中洋等, 1993; 白志明, 王椿镛, 2003, 2004; 张中

* 收稿日期: 2022–01–07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41774071)资助.

第一作者简介: 邓晓果(1987–), 工程师, 主要从事地震测深资料处理研究. E-mail: dengyisai@163.com.

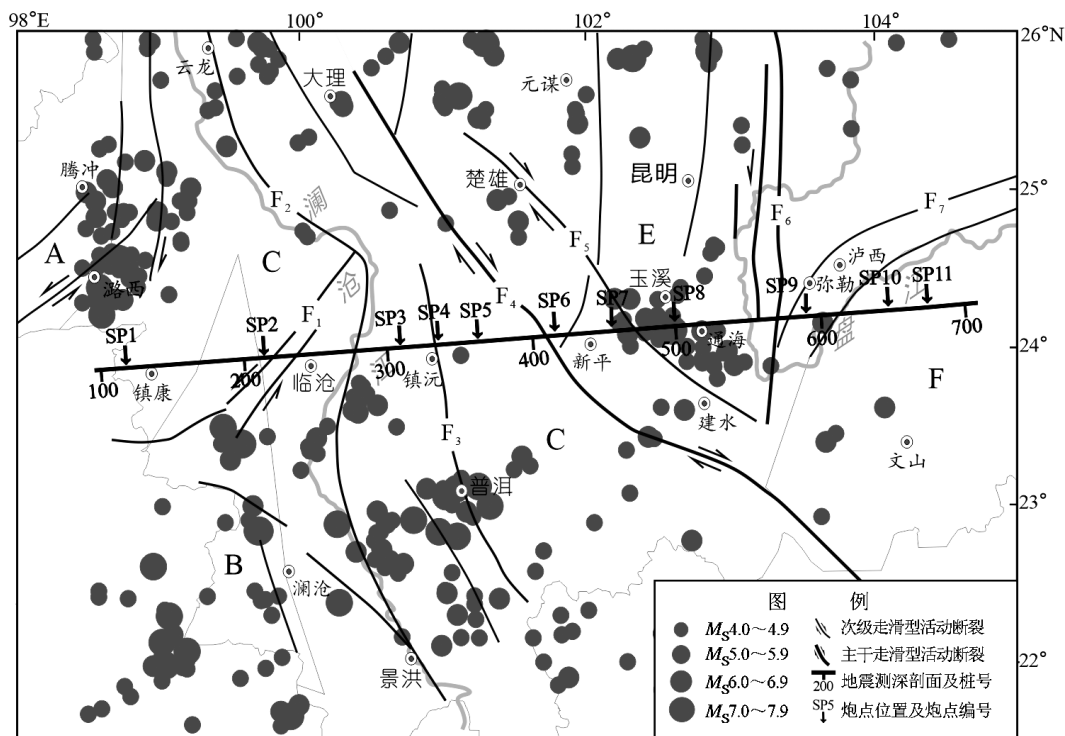
杰等, 2005), 揭示出云南地区地壳结构的一些重要特征。然而, 这些历史剖面多数集中在滇西和滇西北地区, 云南中部地区存在较大的观测空白。2011 年, 在中国地震局喜马拉雅计划专项的资助下, 中国地震局地球物理勘探中心沿 24°N 线一带横穿云南中部完成了一条人工地震测深剖面, 获得了良好的观测记录, 为深入研究云南中部地壳结构提供了良好的观测基础。本文利用该地震测深剖面获得的 P 波地震记录截面, 使用一维走时分析方法, 构建了云南中部地区不同地质单元的地壳速度结构模型, 为深入理解该地区深部结构与强震关系提供了基础模型。

1 区域地质构造背景与剖面位置

1.1 地质构造背景

自晚元古代以来, 由于古大洋向其北部和东部地台的长期挤压和俯冲以及各时期主应力方向的不变化, 云南地区形成极其复杂的构造格

局, 区域内众多大断裂纵横交错。云南及其邻区又可分为西藏—云南褶皱系、印支褶皱系、中部的松潘—甘孜褶皱系、北部的扬子地台以及东部的华南褶皱区 5 个构造单元。云南及其邻区处在这 5 个不同块体俯冲、碰撞、缝合、迭覆及地壳强烈增生的接合部位, 因此该区域岩石圈结构横向变化十分显著, 晚古生代以来的构造变动异常强烈。特别是燕山—喜山期构造活动, 促使 4 个块体聚敛、迭置与缝合。云南地区强震发生带常受控于规模较大的断裂带, 主要断裂有: 龙陵断裂、元谋断裂、普渡河断裂、南定河断裂、澜沧江断裂、无量山断裂、哀牢山断裂、红河断裂、楚雄—通海断裂、小江断裂及弥勒—师宗断裂等。本文主要研究云南中部地区, 该区域穿过 6 个构造单元: 波密—腾冲褶皱系 (早加里东褶皱带)、左贡—耿马褶皱系 (华里西褶皱带)、三江褶皱系 (印支褶皱带)、松潘—甘孜褶皱系 (印支褶皱带)、扬子地台和华南褶皱系 (印支褶皱带), 如图 1 所示。



F₁: 南定河断裂; F₂: 澜沧江断裂; F₃: 无量山断裂; F₄: 红河断裂; F₅: 楚雄—建水断裂; F₆: 小江断裂; F₇: 弥勒—师宗断裂; A: 波密—腾冲褶皱系; B: 左贡—耿马褶皱系; C: 三江褶皱系; E: 扬子地台; F: 华南褶皱系

图 1 研究区主要地震、地质构造与镇康—泸西地震测深剖面位置 (据马杏垣, 1989 修改)

Fig. 1 Main earthquakes, geological structures, and the Zhenkang - Luxi seismic sounding profile in the study area (according to Ma, 1989)

长期以来,云南地区的地震活动具有频度高、强度大的特点,中小地震几乎遍及各地,是中国大陆内部地震活动最强的地区之一。尤其是近30年以来,相继发生了一系列强震,如1970年通海7.8级地震、1974年昭通7.1级地震、1988年澜沧7.6级—耿马7.2级地震、1996年丽江7.0级地震。

云南地区强震主要分布在以下区域:剑川—丽江地震带、红河地震带、小江地震带、腾冲—龙陵地震带、普洱—思茅地震带以及澜沧—耿马地震带。大多数地震都是沿着第三纪以来一直活动的断裂带分布,这些地震带显示出区域地震活动性所涉及的不规则块体轮廓。自1970年以来研究区 $M_s \geq 4.0$ 地震活动的分布情况见图1。由图可见,菱形块体边界和内部一些地区发生的强震数量占整个川滇地区强震的大部分,而块体外围的地震活动水平相对较低。

1.2 剖面位置

镇康—泸西人工测深地震探测剖面(图1中地震测深剖面,以下简称为镇康—泸西剖面),穿过了南定河、红河、小江、楚雄—建水、弥勒—师宗等主要断裂构造带。该剖面位于云南省的中南部地区,涉及临沧、普洱、玉溪、红河、文山5个州(市)、10余个县的部分区域。剖面西起中缅边界的镇康附近($98^{\circ}42'00''N$, $23^{\circ}52'10''E$;剖面桩号100 km),经永德、临沧、镇沅、新平、通海等地,终止于丘北县东北45 km左右($104^{\circ}34'40''N$, $24^{\circ}20'38''E$;剖面桩号700 km),探测剖面的走向基本呈东西向展布,全长600 km,如图1所示。沿镇康—泸西剖面自西向东横跨4个地质构造单元:左贡—耿马褶皱系、三江褶皱系、扬子地台及华南褶皱系。同时该测线有多条深大断裂带穿过:南定河断裂、澜沧江断裂、无量山断裂、红河断裂、楚雄—建水断裂、小江断裂带及弥勒—师宗断裂等。

为了获得该地区地壳深部速度结构,2011年底研究人员沿镇康—泸西剖面共设计了11个炮点,进行了11次吨级爆破激发观测。这11个炮点的位置分别在116.598 km (SP1)、212.518 km (SP2)、305.063 km (SP3)、332.103 km (SP4)、354.244 km (SP5)、423.997 km (SP6)、463.056 km (SP7)、498.35 km (SP8)、582.429 km (SP9)、643.345 km (SP10)及675.23 km

(SP11)桩号处,构成了满足宽角反射/折射探测、高分辨折射探测技术要求的地震探测系统(图1)。根据区域构造特点,在不同的区段采取密疏不同的接收观测,平均观测点距2 km,沉积盆地和断裂带附近加密观测到1 km左右。

2 震相分析与特征

按照震相对比原则,对本剖面获得的11次爆破激发地震记录资料的P波震相进行识别对比,采用6.00 km/s的折合速度并选择适当的频率范围进行滤波,根据不同属性的地震波组综合考虑其动力学与运动学的不同特征以及综合其它因素进行震相(波组)的识别、对比。此次地震资料识别对比的主要P波震相有:Pg、 P_1 、 P_2 、 P_3 、Pm和Pn等,该剖面获取的典型地震记录截面如图2所示(图中横坐标为炮点到检波器之间的“距离”或“炮检距”;纵坐标($T - X/6.0$)为地震波记录折合走时,其中 T 为地震波走时, X 为炮检距, $X/6.0$ 为折合速度为6.0 km/s的折合零时,即图中的零线位置)。对上述11次爆破激发地震记录识别对比出的6组震相分别定名为:基底折射波(首波)Pg、壳内反射波 P_1 、壳内反射波 P_2 、壳内反射波 P_3 、Moho面反射波Pm以及穿透到上地幔顶部的折射波Pn。其中Pg、Pm波组为该研究区内的优势波组,可以连续对比追踪,并且震相明显、稳定、可靠、连续性较好;而地壳内部中间层的反射波组 P_1 、 P_2 、 P_3 震相在大部分区段表现出连续性和振幅较强的特征,但在部分区段却表现出能量较弱或是连续性差的特点。

Pg波震相是来自基底顶部的折射波组(首波)。一般而言,Pg波显示为清晰的强震相,该波作为初至波,震相清晰可靠,并且可连续对比追踪,通常可追踪至距炮点90~120 km处,部分炮的观测记录在距炮点140 km以内仍可辨认。由于沿剖面不同地质构造单元基底埋藏深度的不同,在各炮记录截面上的折合走时显示出了较大的差异。Pg波在各炮记录截面上的折合时间最小为0.2 s,最大达2.0 s。该波的视速度在不同区段,由于基底界面倾斜方向的不同其视速度亦有巨大的变化,当基底界面起伏变化特征不明显时,其视速度一般为6.00 km/s。沿剖面Pg波到时的超

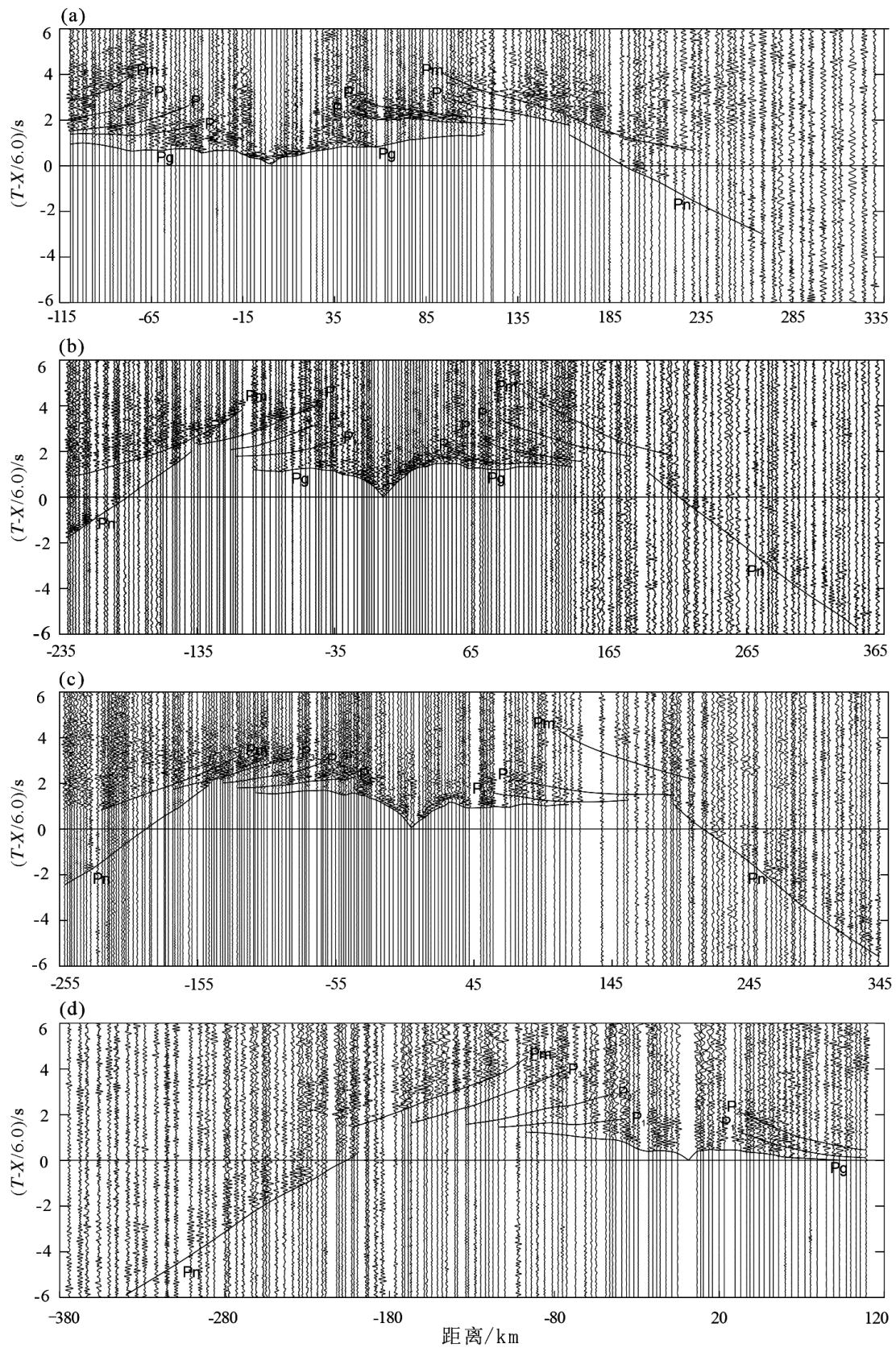


图2 镇康—泸西剖面 SP2 炮 (a)、SP4 炮 (b)、SP5 炮 (c) 和 SP9 炮 (d) 记录截面图
 Fig.2 Records of the typical seismic phases excited by Shot 2 (a), Shot 4 (b),
 Shot 5 (c) and Shot 9 (d) along the Zhenkang - Luxi profile

前与滞后、视速度的变化在一定程度上反映了沿剖面基底的起伏变化、构造特征和介质性质的差异。Pn波是来自上地幔顶部的折射波震相，该波主要体现该区域上地幔顶部介质速度及速度梯度结构特征。沿剖面在大部分炮点记录截面上都识别对比出了Pn波组。由于Moho面的起伏变化，

使得该组进入初至区的距离远近不一，Pn波一般在距炮点170.0 km进入初至区，可以连续追踪对比至350.0 km，该波组的视速度约为8.00 km/s。该波组在各炮记录截面表现的振幅强弱不一，表明上地幔顶部沿测线速度结构的不均匀特征以及研究区壳幔过渡带复杂的结构特征。

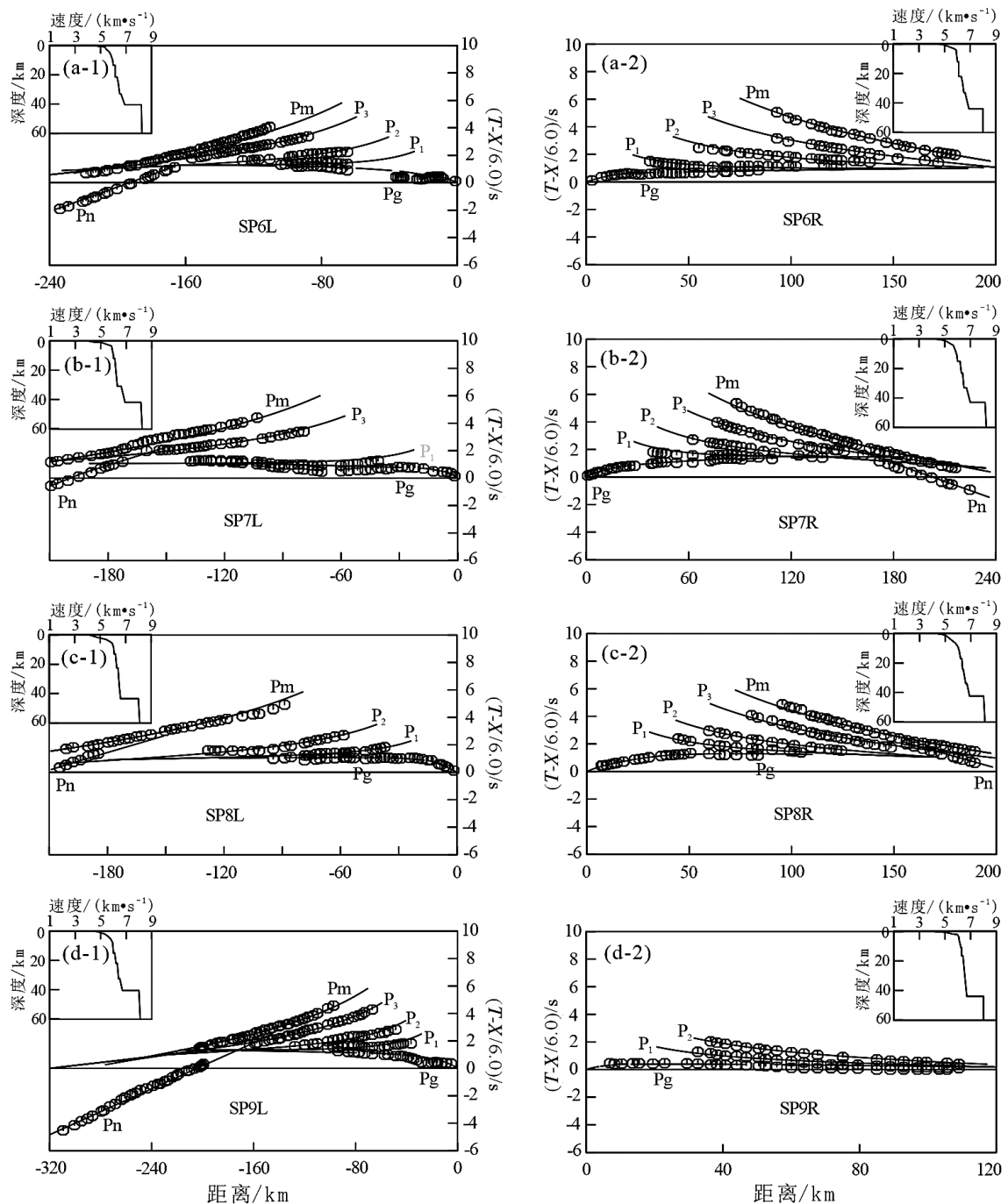


图3 镇康—泸西剖面部分炮左、右支一维走时拟合图及其对应的速度结构图

Fig. 3 The fitted one - dimensional, travel - time diagram and the corresponding velocity - structure diagram of some shots along the Zhenkang - Luxi profile

3 资料处理与计算

本文采用一维垂向非均匀介质中走时拟合方法 (朱介寿等, 1988), 对所获得的各炮地震走时记录进行正演拟合, 利用试错法反复修改地壳结构模型, 实现实测资料与理论模型的最佳拟合, 得到沿剖面的一维地壳分层速度结构模型, 并综合分析各炮点获得的一维速度结构, 分析沿剖面不同块体间的速度结构变化。

对于水平分层设计的一维壳幔速度结构模型, 不同震相在其内部传播的到时, 可以利用以下方法进行处理计算。即假定波的传播速度在水平方向上的变化比垂直方向上的变化要小得多, 则可认为速度是深度的函数 $V(Z)$, 且速度随深度呈线性变化, 具体算法如下:

$$V = V_0 + KZ = V_0(1 + \beta Z) \quad (1)$$

这时, 可得到速度随深度线性变化的射线方程:

$$x = \int_0^z \frac{PV_0(1 + \beta Z)dZ}{\sqrt{1 - [(PV_0(1 + \beta Z))]^2}} = \frac{1}{P\beta V_0} \left\{ \sqrt{1 - (PV_0)^2} - \sqrt{1 - [(PV_0(1 + \beta Z))]^2} \right\} \quad (2)$$

$$T = \int_0^z \frac{dZ}{V_0(1 + \beta Z)\sqrt{1 - [PV_0(1 + \beta Z)]^2}} = \frac{(1 + \beta Z)(1 + \sqrt{1 - (PV_0)^2})}{\beta V_0 \ln 1 + \sqrt{1 - [PV_0(1 + \beta Z)]^2}} \quad (3)$$

利用这种方法可以得到地壳一维速度结构模型的理论走时, 将其与实测地震记录走时 (共 2 915 个实测数据, 其中 Pg 波走时 666 个、P1 波走时 435 个、P2 波走时 400 个、P3 波走时 374 个、Pm 波走时 643 个、Pn 波走时 397 个, 见表 1) 进行对比拟合, 当理论计算走时与观测走时拟合较好时, 即认为输入的地壳一维速度模型为该区域一维平均速度模型。利用上述方法的一维计算程序对, 沿剖面各炮建立的初始模型与实测资料进行正演拟合, 采用试错法反复修改地壳速度结构模型, 实现了理论走时曲线与实测资料的最佳拟合 (图 3), 最终得到了镇康—泸西剖面的一维地

表 1 镇康—泸西剖面各炮点不同震相实测数据

Tab. 1 Number of seismic phases excited by 11 shots along the Zhenkang – Luxi profile

炮点编号 及分支		各波组实测数据数量					
		Pg	P ₁	P ₂	P ₃	Pm	Pn
SP1	左支	8	—	—	—	—	—
	右支	41	38	39	33	64	43
SP2	左支	39	25	25	18	16	
	右支	49	32	35	18	45	27
SP3	左支	31	20	26	13	31	12
	右支	33	27	28	26	26	—
SP4	左支	31	18	14	25	46	37
	右支	42	30	23	17	26	26
SP5	左支	45	36	26	41	49	41
	右支	37	20	22	—	19	34
SP6	左支	29	14	17	29	43	25
	右支	30	25	20	15	22	—
SP7	左支	35	27	—	24	36	18
	右支	29	16	14	19	39	12
SP8	左支	30	18	17	—	28	23
	右支	24	13	14	21	31	11
SP9	左支	23	18	18	27	35	35
	右支	30	23	19	—	6	—
SP10	左支	26	17	24	22	37	29
	右支	15	—	—	—	—	—
SP11	左支	30	18	19	26	44	24
	右支	9	—	—	—	—	—

壳速度结构模型 (图 4)。沿剖面横向变化较小的走时资料的拟合误差相对较小, 误差范围为 0 ~ 100 ms; 横向变化较大的走时资料的拟合误差基本上都大于 100 ms, 甚至更大。

由图 4 可见研究区地壳具有很好的分层特征, 基底以下地壳结构大致分为 4 层: C₁、C₂、C₃ 及 Moho 面。在深度 0.0 ~ 5.0 km 的上地壳是一个速度随深度加深而增大的梯度层, 其速度自上而下一一般为 3.50 ~ 5.50 km/s, 呈正速度梯度变化, 速度梯度随深度增加逐渐减弱。壳内界面 C₁ 和 C₂ 的深度分别为 11.0 ~ 17.0 km 和 17.0 ~ 26.0 km, 这 2 个界面的整体变化趋势比较相似。C₁ 和 C₂ 界面自西向东在 SP2 和 SP3 之间有明显下凹的趋势, 而后在 SP5 到 SP7 之间上隆, 其中 C₁ 界面较 C₂ 界面上隆特征更加明显, 在 SP8 附近界面又快速加深,

到了测线的东端 (SP9 附近), 这 2 个界面又呈现逐渐变浅的变化特征。 C_3 界面和前 2 个界面相比, 界面连续性稍差, 但壳幔分界面 Moho 面的连续性很好, 壳内界面 C_3 和 Moho 面的深度分别为:

26.0 ~ 34.0 km 和 34.0 ~ 46.0 km。 C_3 界面和 Moho 面的形态比较近似, 整体上呈现自西向东逐渐加深, 在 SP3 到 SP4 之间和 SP6 到 SP7 之间存在明显变化的特征。

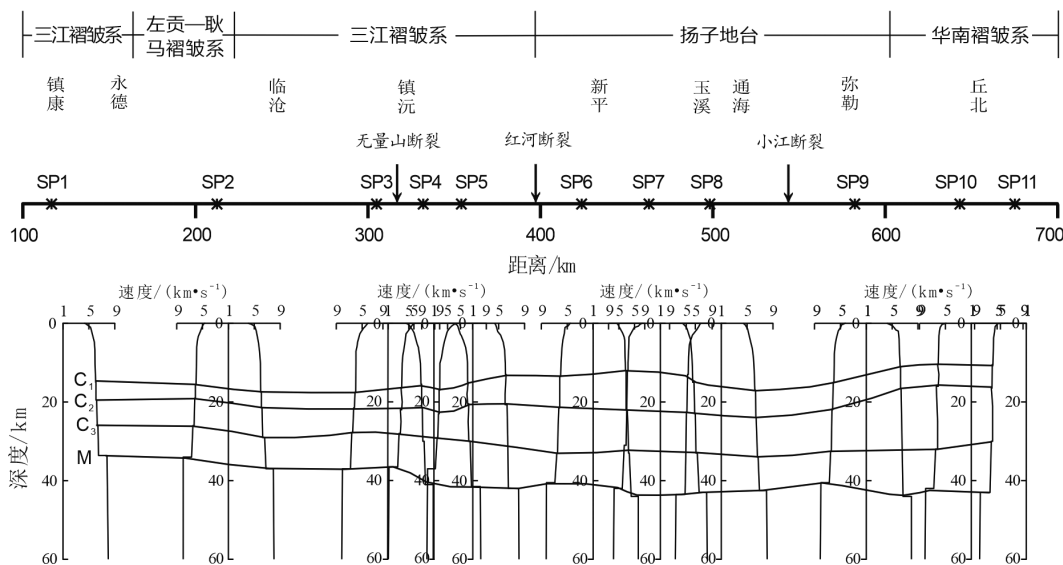


图4 镇康—泸西剖面速度—深度图

Fig. 4 Velocity - depth diagram along the Zhenkang - Luxi profile

4 讨论

镇康—泸西剖面跨越了云南中部地区多个地质构造单元及多条重要活动断裂带, 小江断裂带与红河断裂带是该区十分重要的活动断裂带, 且断裂带两侧速度及地壳厚度均发生明显变化 (虎雄林等, 2006; 钱晓东, 秦嘉政, 2008; 吴建平, 2013; 王夫运等, 2014)。吴建平等 (2013) 获取的小江断裂周边地区三维 P 波速度结构中, 24°N 的 Moho 面深度范围为 35 ~ 40 km, 测线附近 Moho 面埋深约为 38 km。

王夫运等 (2014) 获得的该区域的 Moho 面深度以红河断裂为界产生了较大的变化, 红河断裂以西地壳厚度约 34 km, 以东地壳厚度约 44 km。多项研究成果认为红河断裂可能已经穿透 Moho 面 (张超等, 2001; 张秉良等, 2008a, b), 但均无明显的地球物理学证据来支持。而从该剖面得到的人工地震测深结果可以发现, 在 SP9 到 SP10 之间的 600 km 桩号附近, 出现明显的中上地壳变薄和 Moho 面加厚, 显示了强烈的切穿地壳的断裂特

点, 因此本文结果支持这一观点的成立。

镇康—泸西剖面速度—深度图 (图 4) 显示: C_1 界面在新平附近和剖面东端下方明显上隆, 埋深 10.0 ~ 12.0 km; 小江断裂附近下方 C_1 界面明显下拗, 最大埋深为 17.0 km。在测线西端地壳厚度约 37.0 km, 当进入三江褶皱系无量山断裂以东 Moho 面明显增厚, 形成山根结构特征, 地壳厚度约 43.0 km, 与白志明和王椿镛 (2004) 研究成果有较好的对应, 这些特征充分说明不同块体之间介质属性的差异性以及研究区超壳断裂存在的证据。以红河断裂为界以西为三江褶皱系, 以东为扬子地台, 沿测线跨越红河断裂后地壳厚度加厚, 到了测线东端的华南块体, Moho 面厚约 45.0 km, 与该区其他研究结果存在较好对应 (李永华等, 2009)。

5 结论

本文通过镇康—泸西人工地震测深剖面 11 炮的地震走时记录, 拟合获得了一维地壳速度结构模型, 主要得出以下结论:

(1) 镇康—泸西人工地震测深剖面横跨了 4 个不同的地质构造单元, 自西向东分别为左贡—耿马褶皱系, 三江褶皱系, 扬子地台及华南块体。从该剖面的一维速度结构结果上可以看出, 速度结构和界面形态沿测线有明显的分块特征。

(2) 沿测线各界面形态自西向东起伏变化明显, 地壳厚度自西向东呈现出逐渐增厚的特征, 中下地壳的厚度变化基本与 Moho 面一致。

(3) 沿剖面上地壳厚度变化比较明显, 三江褶皱系以东的扬子地台和华南褶皱系上地壳逐渐减薄, 扬子地台内部玉溪至弥勒一带上地壳增厚。

参考文献:

- 白志明, 王椿镛. 2003. 云南地区上部地壳结构和地震构造环境的层析成像研究[J]. 地震学报, 25(2): 117-127.
- 白志明, 王椿镛. 2004. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 47(2): 258-267.
- 陈炳蔚, 王铠元, 刘万熹, 等. 1987. 怒江—澜沧江—金沙江地区大地构造[M]. 北京: 地质出版社.
- 从柏林, 吴根耀. 1993. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化[J]. 中国科学: 化学, 23(11): 1201-1207.
- 崔仲雄, 裴顺平. 2009. 青藏高原东构造结及周边地区上地幔顶部速度结构和各向异性研究[J]. 地球物理学报, 52(9): 2245-2254.
- 邓起东, 徐锡伟, 于贵华. 1994. 中国大陆活动断裂的分段特征及其成因[M]//中国活动断层研究. 北京: 地震出版社, 1-14.
- 胡鸿翔, 冯永革. 1998. 云南扬子准地台区地壳浅部速度构造特征[J]. 西北地震学报, 20(4): 12-17.
- 胡鸿翔, 陆涵行, 王椿镛, 等. 1986. 滇西地区地壳结构的爆破地震研究[J]. 地球物理学报, 29(2): 133-144.
- 黄汲清, 陈炳蔚. 1987. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 阚荣举, 林中洋. 1986. 云南地壳上地幔构造的初步研究[J]. 中国地震, 2(4): 50-61.
- 李永华, 吴庆举, 田小波, 等. 2009. 用接收函数方法研究云南及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 52(1): 67-80.
- 林中洋, 胡鸿翔, 张文彬, 等. 1993. 滇西地区地壳上地幔速度结构特征的研究[J]. 地震学报, 15(4): 427-440.
- 马杏垣. 1989. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社.
- 虎雄林, 张建国, 李朝才, 等. 2006. 云南红河断裂带中小地震重定位及其与地质构造的关系[J]. 地震研究, 29(4): 349-354.
- 潘素珍, 王夫运, 段永红, 等. 2015. 滇南及临近地区基底结构——镇康—泸西深地震测深剖面结果[J]. 地球物理学报, 58(11): 3917-3927.
- 钱晓东, 秦嘉政. 2008. 小江断裂带及周边地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 31(4): 354-361.
- 王夫运, 潘素珍, 刘兰, 等. 2014. 玉溪—临沧剖面宽角地震探测——红河断裂带及滇南地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 57(10): 3247-3258.
- 吴建平, 杨婷, 王未来, 等. 2013. 小江断裂带周边地区三维 P 波速度结构及其构造意义[J]. 地球物理学报, 56(7): 2257-2267.
- 熊熊, 许厚泽, 滕吉文. 2001. 青藏高原物质东流的岩石层力学背景探讨[J]. 地壳形变与地震, 21(2): 1-7.
- 张秉良, 刘瑞珣, 向宏发, 等. 2008a. 红河断裂带中南段糜棱岩分形特征及主要流变参数的估算[J]. 地震地质, 30(2): 473-483.
- 张秉良, 刘瑞珣, 向宏发, 等. 2008b. 红河断裂带中南段断层活动转换构造岩特征及应力场演化[J]. 岩石矿物学杂志, 27(6): 529-537.
- 张超, 谢富仁, 张世民. 2001. 震源分布和强度指标控制因素的模型研究——红河断裂地震环境因素的实例分析[J]. 地震学报, 23(2): 125-135.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: 地球科学, 33(增刊1): 12-20.
- 张中杰, 白志明, 王椿镛, 等. 2005. 三江地区地壳结构及动力学意义: 云南遮放—宾川地震反射 P 折射剖面的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 48(9): 314-319.
- 朱介寿, 刘福田, 王椿镛, 等. 1988. 研究地壳上地幔结构的体波计算方法[M]. 北京: 科学出版社.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 211-280.

The Crustal Structure Characteristics of Different Tectonic Units in Central Yunnan Revealed by Artificial Seismic Sounding

DENG Xiaoguo, WANG Fuyun, MA Cejun, YANG Zhuoxin

(*Geophysical Exploration Center of China Earthquake Administration, Zhengzhou 450003, Henan, China*)

Abstract

We analyse the data from the artificial seismic sources on a wide-angle, reflection/refraction profile, the Zhenkang-Luxi seismic sounding profile along the 24°N latitude line in central Yunnan Province, and pick Pg and Pn phases of the refracted wave, P_1 , P_2 , P_m of the reflected wave. On the basis of the one-dimensional, velocity-structure model, we use the trial-and-error method to fit all the travel-time curves of the seismic phases, then we obtain the one-dimensional, velocity-structure model of the Crust along the Zhenkang-Luxi profile. The results show that the Crust obviously thickens along the profile from west to east, the intra-discontinuity of the mid-and lower-Crust is coincident with the variation of the Moho. The upper Crust of the South China fold system and the Yangtze Block located to the east of the Sanjiang fold system is becoming thin. The upper Crust from Yuxi to Mile in the Yangtze Block is thickening.

Keywords: central Yunnan Province; artificial seismic source; crustal velocity structure; the Moho discontinuity