

川滇地区三维 P 波速度结构反演与构造分析

马宏生^{1,2}, 张国民¹, 闻学泽³, 周龙泉⁴, 邵志刚¹

1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

3. 四川省地震局, 四川成都 610041

4. 中国地震台网中心, 北京 100036

摘要: 根据 205 个区域台站记录的近 60 000 条地震初至 P 波走时资料, 采用层析成像理论与伪弯曲射线追踪方法, 反演了川滇地区地壳上地幔的三维 P 波速度结构. 结合区域地质构造以及地球物理背景, 分析和解释了三维速度结构图像反映的川滇地区不同深度的介质结构与构造特征. 结果表明: (1) 沉积盆地、高山山地等主要表现出速度负异常的特征, 有的高山山体负异常可深达下地壳与上地幔, 反映了新造山带的强烈构造隆升与相伴的重力均衡作用; (2) 川滇块体周缘大型活动断裂带附近的中下地壳内普遍存在低速层, 它们的存在为调节断裂和块体运动提供了深部解耦条件; (3) 根据对 P 波速度结构图像的分析, 识别和推断出川滇地区若干主要活动断裂的深部构造特征及它们倾向与下延深度.

关键词: 川滇地区; P 波; 三维速度结构; 构造解释.

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2008)05-0591-12

收稿日期: 2008-05-10

3-D P Wave Velocity Structure Tomographic Inversion and Its Tectonic Interpretation in Southwest China

MA Hong-sheng^{1,2}, ZHANG Guo-min¹, WEN Xue-ze³, ZHOU Long-quan⁴, SHAO Zhi-gang¹

1. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

3. Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

4. China Earthquake Network Center, Beijing 100036, China

Abstract: We have selected about 60 000 arrival times recorded by 205 regional stations, with the seismic tomography theory and three dimensional ray tracing method, to determine a detailed three-dimensional (3-D) P wave velocity structure of the lithosphere in southwest China. Then we present the medium structure and tectonic characteristics of different depth which are reflected by the 3-D P wave velocity image in this area, integrated with the previous geological features and geophysical data. The results suggest that deposit basins and alpine mountainous regions present as negative anomaly, with some montage negative anomalies even extending to the deep crust or the upper mantle, which reflects the sharp rising of the new orogens and the concomitant gravity equilibrium; low-velocity layers exist far and wide in the middle and deep crust under the large fault zones around the Sichuan-Yunnan block, which can be taken as the decoupling layer adjusting the faults and blocks movement; some deep structures related with the main active faults, and the trends and extending depths can be distinguished from the P wave velocity image.

Key words: Sichuan-Yunnan area; P wave; 3-D velocity structure; tectonic interpretation.

20 世纪地球科学的重要进展之一是对地球内部各圈层的观测、探测能力及其图像获取能力的显著提高. 20 世纪 70 年代首次用体波反演地幔三维速度结构, 初步揭示了地幔速度结构与全球板块构

造的关系;20 世纪 80 年代以来利用全球数字地震台网对地球内部进行三维层析成像的工作极大地推动了地球内部各圈层横向不均匀性及其动力学的研究(刘福田,1991; Zhao and Kayal,2000;傅容珊等,2001;Zhao,2001),这对于了解大陆及海洋的构造运动、探测源于深部的超大型矿产资源、防止和减轻地震、地质灾害以及改善地球环境等问题具有重大意义(朱介寿等,2003)。

川滇地区位于青藏高原的东南缘,与扬子地台和东南亚板块邻接,地质构造活动和 65 Ma 以来印度板块与欧亚板块的强烈碰撞密切相关,且两大板块的碰撞引起的川滇地区的强烈构造活动至今仍在继续(李坪和汪良谋,1975;马杏垣,1989;丁国瑜,1991;邓起东等,2002)。该区不仅活动断裂发育,强震与大地震活动也十分频繁;其西南部的云南腾冲还是我国近代的活动火山区之一。近几年来,层析成像在川滇地区强震与火山孕育环境的研究方面已取得一些新的成果(秦嘉政等,2000;Huang *et al.*,2002;Wang *et al.*,2003)。

在前人研究的基础上,本文进一步根据云南和四川 205 个地震台站在 2000 年 4 月至 2006 年 3 月期间记录的 7 259 次地震的近 60 000 条初至 P 波走时资料,用层析成像理论与伪弯曲射线追踪方法反演川滇地区地壳上地幔的三维 P 波速度结构。在对反演结果的解释方面,本文将重点放在紧密结合区域地质构造与地球物理背景分析不同深度的介质结构以及深浅构造的耦合关系上,同时,拟基于速度结构的分析初步揭示与区域活动块体和地震有关的深部构造背景与动力作用环境。

1 三维 P 波速度结构的反演

1.1 地震数据

在活动构造上,川滇地区被一系列规模不等、力学性质不同的活动断裂带切割成不同级别的活动块体(Zhang *et al.*,2003)。本文研究的范围为 $21^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$ (图 1),主要参照徐锡伟等(2003)研究结果归纳的研究区活动断裂的分布与块体划分简图,其中的地形取自分辨率 30 m 的 SRTM 数据(<http://glcf. umiacs. umd. edu/data/srtm>)。

使用的地震 P 波走时资料来自云南、四川的区域地震台网的观测报告以及中国地震局 2004—2005 年在南北地震带新建的若干数字地震台所给出的观测报

告。为确保反演中有足够多射线的均匀覆盖和高精度的数据,采用了以下原则对数据进行筛选:(1)定位精度为 1 类的地震;(2)所选用的地震至少被 3 个台站记录到;(3)最大走时残差不超过 3.0 s。最后挑出 2000 年 4 月至 2006 年 3 月由 205 个台站(图 2b)记录的 7 529 次地震(图 2a)的 58 828 条 P 波射线数据。

1.2 初始速度模型

本研究采用网格方法(Thurber,1983)对速度模型进行模型参数化,在平面上将研究区划分成 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的均匀网格,模型中的速度分布用连续函数表示,网格内任意一点的速度用内插方式计算(Thurber,1983;Zhao,1992)。综合已发表的研究区及其邻近区域的地壳速度结构研究成果(Huang *et al.*,2002;Wang *et al.*,2003),选定本研究成果的一维参考速度模型如表 1 所示。

表 1 采用的西南地区初始速度模型

Table 1 Initial model of P wave velocity in southwest China

深度 (km)	0	5	15	25	35	45	65	85
$v_P(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	5.5	5.9	6.1	6.4	6.8	7.5	7.8	7.9

1.3 反演方法

Aki and Lee(1976)首先提出了利用地震台网记录到的地震波到时反演地球内部的三维速度结构,随后该方法得到不断发展和改进(Thurber,1983;刘福田等,1989;Zhao *et al.*,1992)。为了使反演的解具有稳定性,本研究采用了阻尼最小二乘反演法(Aki and Richards,1980;Lutter and Nowack,1990)。此外,为了减少内存需求和降低计算量,反演前针对走时对速度的偏导数系数矩阵的顺序进行正交三角化,即先进行 QR 分解,转为一个上三角方阵,然后对上三角矩阵进行阻尼最小二乘反演(刘福田等,1989)。该方法可以大大减少内存占用量,降低计算量。本研究在成像过程中采用了伪弯曲射线追踪法(Um and Thurber,1987)来确定射线路径以及计算理论走时。

1.4 解的分辨分析

本文采用检测板方法(Humphreys and Clayton,1988;Inoue *et al.*,1990)来估计解的分辨率。其基本原理是,在给定速度模型参数的基础上,对各节点正负相间进行扰动,然后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随机误差后作为观测数据进行反演,要求反演方

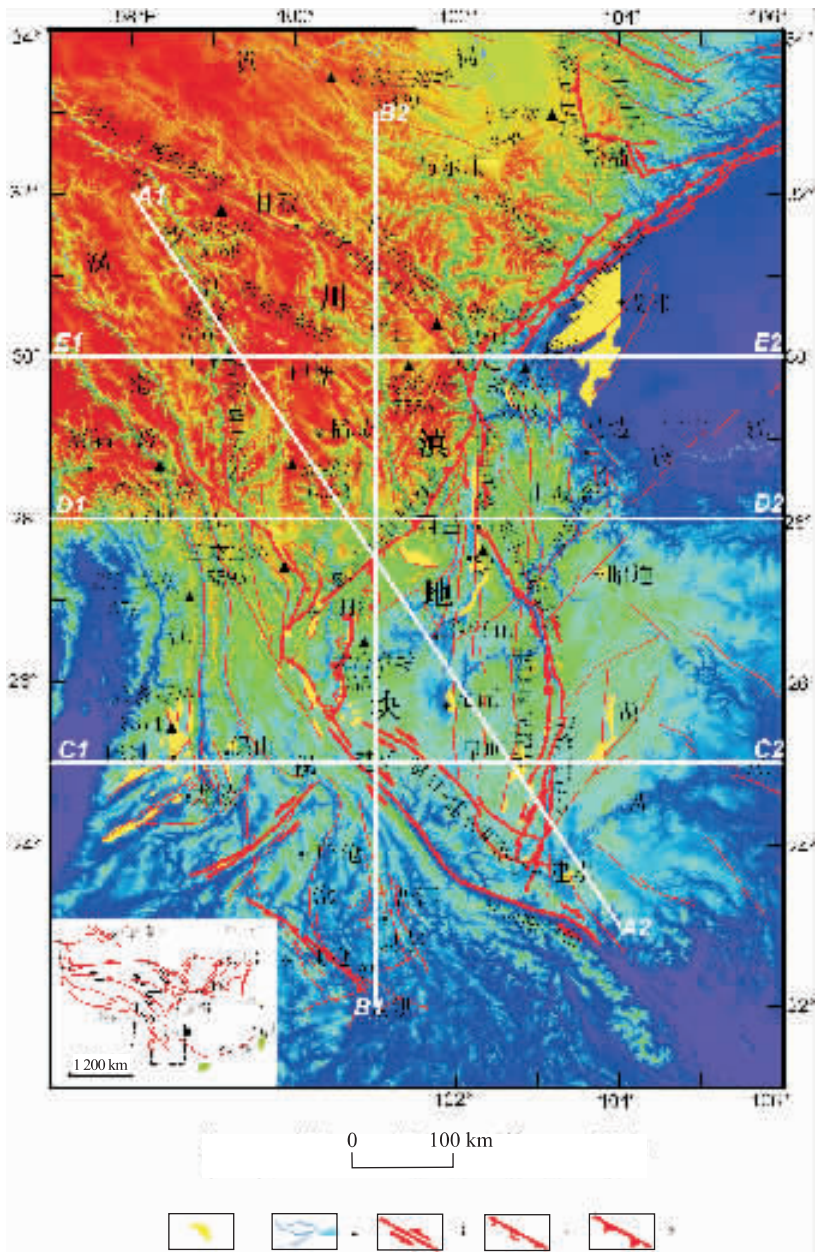


图 1 川滇地区活动断裂分布与活动块体划分图

Fig. 1 Sketch map showing active faults and blocks in southwest China

1. 第四纪沉积盆地;2. 湖泊水系;3. 走滑断层;4. 正断层;5. 逆断层. 活动块体编号与名称: I 为马尔康块体; II 为川滇菱形块体, 可进一步划分成 II₁ (川西北) 和 II₂ (滇中) 2 个次级块体; III 为保山-普洱块体; IV 为密支那一西盟块体. P 波速度结构垂直剖面线说明: 北西向 A1A2 剖面两个端点为 (32°N, 98°E) 和 (23°N, 104°E), 经向剖面 B1B2 的两个端点为 (22°N, 101°E) 和 (33°N, 101°E); 3 条纬向剖面的 C1C2 端点为 (25°N, 97°E) 和 (25°N, 106°E), D1D2 端点为 (28°N, 97°E) 和 (28°N, 106°E), E1E2 端点为 (30°N, 97°E) 和 (30°N, 106°E)

法与实际成像过程中的方法一致, 最后比较反演结果和检测板的相似程度, 作为解的可靠性的估计. 文中扰动值取为正常值的 ±3%. 由图 3 可见, 在 45 km 及其以上不同深度的大部分节点上, 解的分辨率是令人满意的; 65 km 深度上主要部分 (川滇地块及其周边) 的解的分辨率也是可以接受的; 而 85 km 深度上只有

部分节点 (川滇地块内部) 的解仍有一定分辨.

2 反演结果及其构造分析与解释

2.1 不同深度切面的速度结构

对川滇地区地壳上地幔顶部 P 波速度模型进

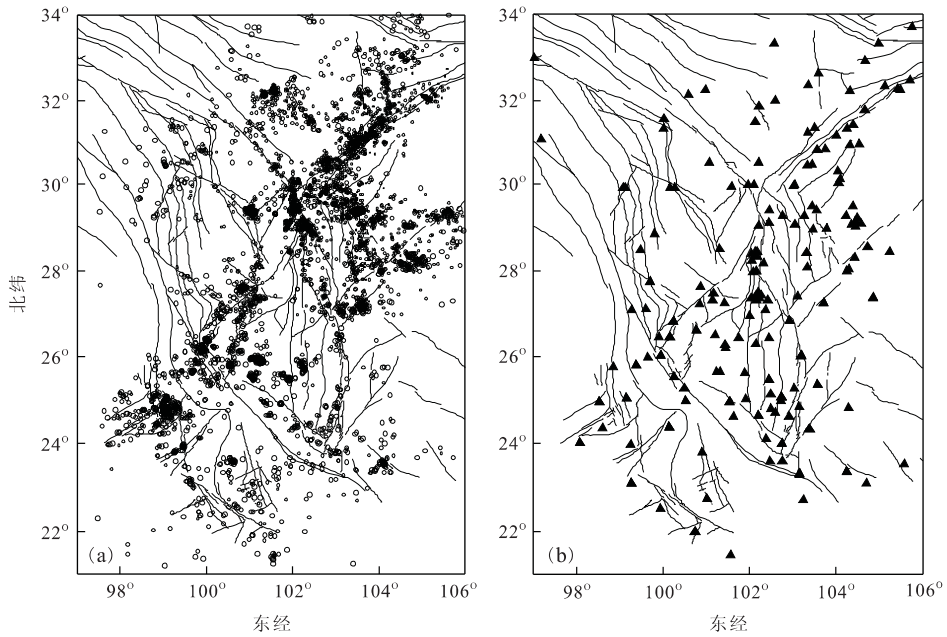


图 2 川滇地区 2000—2006 年区域地震分布(a)与台站分布(b)

Fig. 2 Distribution of epicenters (a) and seismic stations (b) in southwest China from 2000 to 2006

○表示地震震中;▲表示地震台站

行 4 次迭代反演. 初始走时残差平方和为 62 410. 63, RMS 残差为 1. 03 s; 经过 4 次迭代后, 初始走时残差平方和减为 22 613. 48, RMS 残差减为 0. 62 s. 与前人的研究(Wang *et al.*, 2003)相比, 这一误差情况是可以接受的. 反演得到的地壳上地幔顶部 5、15、25、45、65 和 85 km 等不同深度切面的 P 波速度分布如图 4 所示, 其中, 5、15 和 25 km 深度的图像主要反映上地壳和中地壳的速度横向变化特征, 45 km 深度的图像反映下地壳的速度横向变化, 而 65 km 和 85 km 深度的图像则反映下地壳底部至上地幔顶部的速度横向变化.

川滇地区地形起伏很大. 对比图 1 与图 4 可以看出, 上地壳 5 km 深度的速度负异常分布主要与中—新生代盆地、现代高山区密切相关. 至 15 km 深度时, 速度负异常的高值分布仍然与主要中、新生代造山带、现代高山区以及变形后深陷的沉积盆地有关. 如川西的大雪山(马尔康南)、雀儿山—沙鲁里山系的东南段(甘孜西和南)、大炮南山和贡嘎山(康定 NW 和 SW)、峨眉山、大凉山北段和螺髻山(西昌 NE 和以南)等地均表现为负异常, 反映这些高山体(根)至少影响 15 km 深. 云南大理及其以南和楚雄—昆明之间的偏低异常反映了新生代隆起的点苍山山体及其两侧的中生代盆地—哀牢山的前陆和后陆盆地(张志斌和曹德斌, 2002)的底界也大体到达这

一深度. 云南思茅以北的局部低速异常区正好与兰坪—思茅中生代盆地深拗陷区(朱创业等, 1997; 廖宗延和陈跃昆, 2005)、以及新生代的镇沅盆地(马丽芳, 2001)的位置相符. 另外, 云南保山以西的腾冲地区在 5~15 km 深处表现为局部低速异常, 反映那里与现代火山作用有关的岩浆囊可能分布在地壳浅部.

到了中地壳 25 km 的深度上, 川西的雀儿山、沙鲁里山系东南段、贡嘎山、大雪山、峨眉山等地的负异常仍然清楚. 云南地区的 P 波速度的横向变化幅度已较小, 但绿汁江断裂(元谋附近)与小江断裂之间的滇中地区呈现较大面积负异常, 反映在此深度上壳内可能存在相对低速层(熊绍柏等, 1993).

在 45 km 深度上, 前述川西的若干高山之下仍然存在速度负异常分布, 且在岷山、邛崃山、大凉山等山体之下也出现负异常; 而滇中块体出现较大面积的负异常分布. 值得注意的是: 在此深度上, 速度负异常区的面积在整个研究区占有相当大的比例, 特别是沿大型活动断裂带, 如 NW 向鲜水河断裂带、近 SN 向安宁河断裂带和大凉山断裂带、以及 NE 向龙门山断裂带的 NW 侧(主动运动块体一侧)等, 反映出沿这些活动地块边界断裂带在中下地壳普遍存在低速层.

到了 65 km 深度的切面上, 速度负异常的分布反映川西贡嘎山、雀儿山、邛崃山等有深入到上地

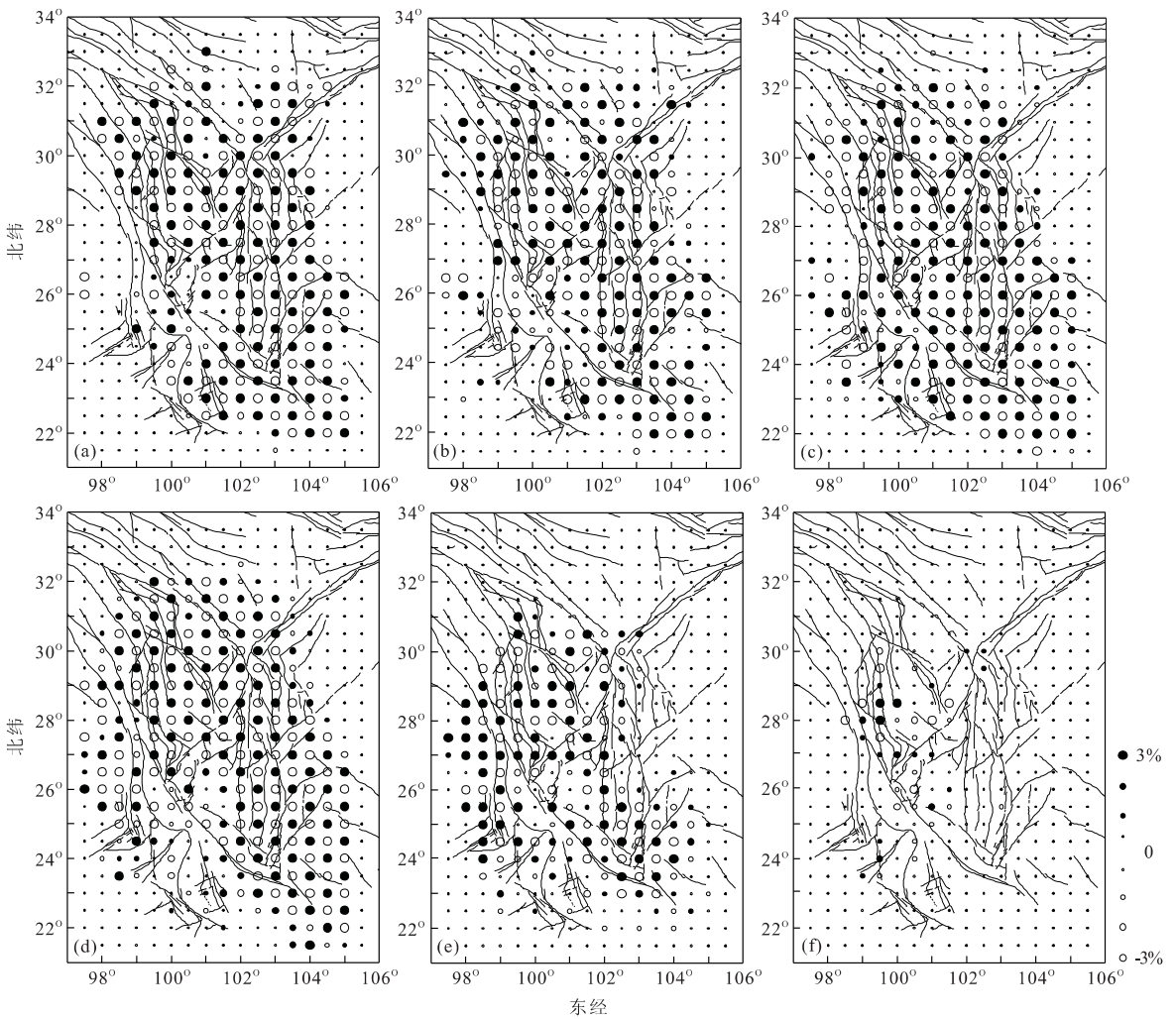


图 3 不同深度 P 波检测板分辨检测结果

Fig. 3 Diagrams showing results of checkerboard resolution test at different depth

a. 深度为 5 km; b. 深度为 15 km; c. 深度为 25 km; d. 深度为 45 km; e. 深度为 65 km; f. 深度为 85 km

慢的山根,同时,沿 NW 向鲜水河断裂带的 NE 侧以及近 SN 向安宁河断裂带与 NNW 向则木河断裂带之间存在低速层,云南腾冲地区的速度负异常更明显,可能反映那里上地幔顶部的重熔作用与热源.在此深度上,四川盆地、滇中及滇东、大理地区、密支那一西盟块体主要表现为速度的正异常分布.此外,滇西南地区较大面积正异常分布可能与具有板块碰撞带成因的临沧花岗岩岩基(马丽芳,2001)有关.在上地幔 85 km 深度上,研究区 P 波速度结构的横向差异已不显著.

另外,据人工地震勘探结果, Moho 面的深度在四川盆地西北缘和龙门山断裂带地区约达 40~45 km,而该断裂带 NW 侧增加到 50~60 km(Wang *et al.*, 2003; 朱介寿等, 2005). 笔者注意到沿 NE 向

龙门山断裂带从 5~15 km 深度上均无明显的速度负异常,且局部显示偏高的 P 波速度正异常;但在 25~45 km 的深度上,龙门山断裂带 NW 侧的负异常显示渐强(图 4). 这反映出龙门山断裂带正下方并无山根,但在该断裂带的 NW 侧,由于水平构造侧压致使地壳的缩短和增厚作用,有伸入上地幔、深达 65 km 的山根(邛崃山脉和岷山山脉之下). 这一地带也是第四纪构造运动与现代地震活动强烈的地区.

2.2 垂直剖面的速度结构

为进一步揭示川滇地区地壳上地幔速度结构所反映的构造含义,笔者绘制了位置如图 1 所示的 5 条 P 波速度垂直剖面.

(1) A1A2 剖面. 沿北西向 A1A2 剖面的速度及其扰动分布如图 5 所示,在离西北端点 100 km 附近

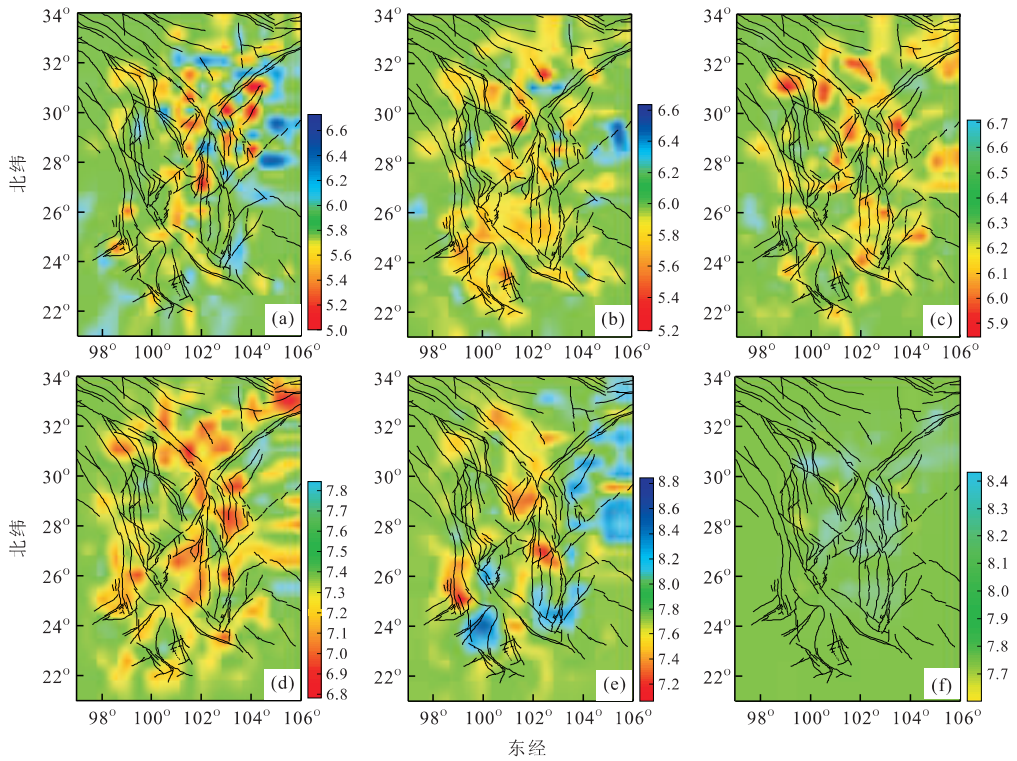


图 4 川滇地区 6 个不同深度水平切面的 P 波速度($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)结构图像(主要断裂带参见图 1)

Fig. 4 Images of P wave velocity structure at different depth in southwest China

a. 深度为 5 km; b. 深度为 15 km; c. 深度为 25 km; d. 深度为 45 km; e. 深度为 65 km; f. 深度为 85 km

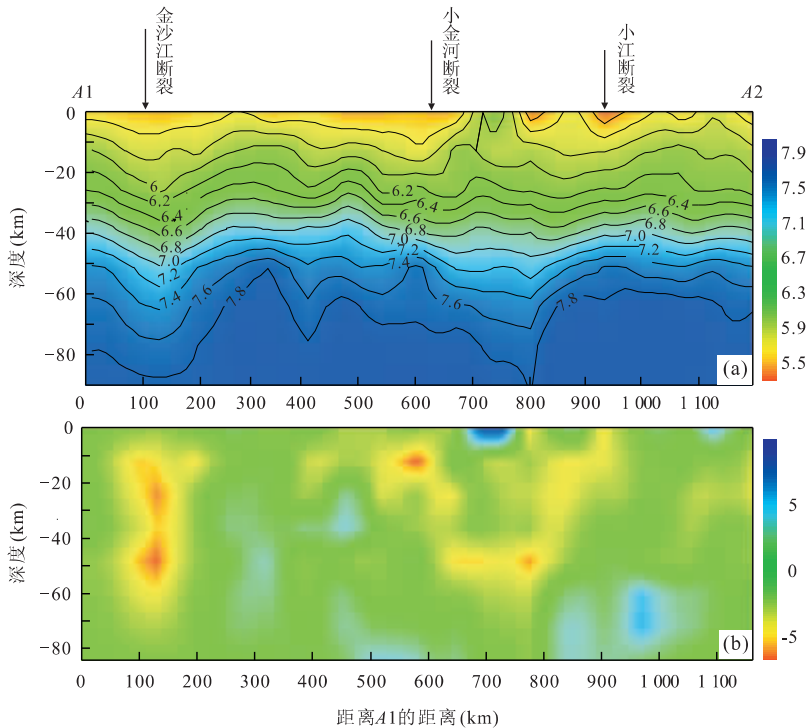


图 5 北西向 A1A2 剖面的 P 波速度($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)分布(a)及其扰动(b)图像

Fig. 5 Images of P wave velocity structure (a) and perturbation (b) along the vertical cross section A1A2

的理塘断裂与巴塘断裂结合部位,可见一向东陡倾的显著速度负异常带,深度达 60~70 km,位置上相当于金沙江古板块缝合带(许志琴等,1992),且与 Sun *et al.* (2003)发现的电性结构异常体的位置基本一致.沿剖面线在离西北端 A1 点 300~500 km 之间,速度结构呈现一陡立的、深达 60~70 km 的正异常、且向东南有局部分岔的特征;其主体在地质图上对应了四川甘孜—稻城之间近 SN 向的印支期花岗岩岩基,应属于中生代时期位于古特提斯洋壳俯冲带上方(东侧)的古陆块或古岛弧的核心,而向东南分岔的正异常上方约 20 km 厚的负异常对应了稻城—木里之间、由海相地层组成的晚古生代 NE 向断褶带.在剖面线 500~600 km 处,剖面跨过 NE 向小金河断裂带,速度负异常体向西北倾斜,且随深度增加,倾角变缓,在 25 km 深度上消失;反映了小金河断裂带属于倾向 NW 的冲断带,且可以很好地解释该带在地表由两条大型冲断层组成、冲断席主要由古生代和中生代沉积岩组成的结构.在 650~950 km 之间的滇中地区整体呈现为负异常,且在

40~55 km 深度上存在水平状的局部负异常或低速层.在 800~950 km 之间出现的西倾的正、负异常界面则应是扬子古陆与滇中块体的分界带,也反映了近 SN 向的小江断裂带应是向西倾斜的,并可能深入到上地幔.

(2) B1B2 剖面.沿东经 101°的 B1B2 剖面 P 波速度及其扰动分布如图 6 所示.据已有研究,自南而北,在北纬 22°~25°之间,剖面线经过昌宁—孟连古板块缝合线、临沧古陆块和思茅盆地、以及哀牢山板块碰撞造山带等多个大型的古大地构造边界或单元(朱创业等,1997).因此,这里地壳内(40 km 之上)的陡立低速体可能反映了古生代晚期至中生代初期挤夹于缝合带或碰撞带内的沉积变质岩系.北纬 23.5°附近的中上地壳低速体应对应已挤压变形的思茅盆地,可能属于碰撞后裂谷型盆地(朱创业等,1997)或者造山带后陆盆地(张志斌和曹德斌,2002),沉积有厚度较大的中生代碎屑岩.北纬 24.5°~25.0°之下的高速体对应了哀牢山双变质带(马丽芳,2001),而北纬 23°和 24°附近的上地幔物

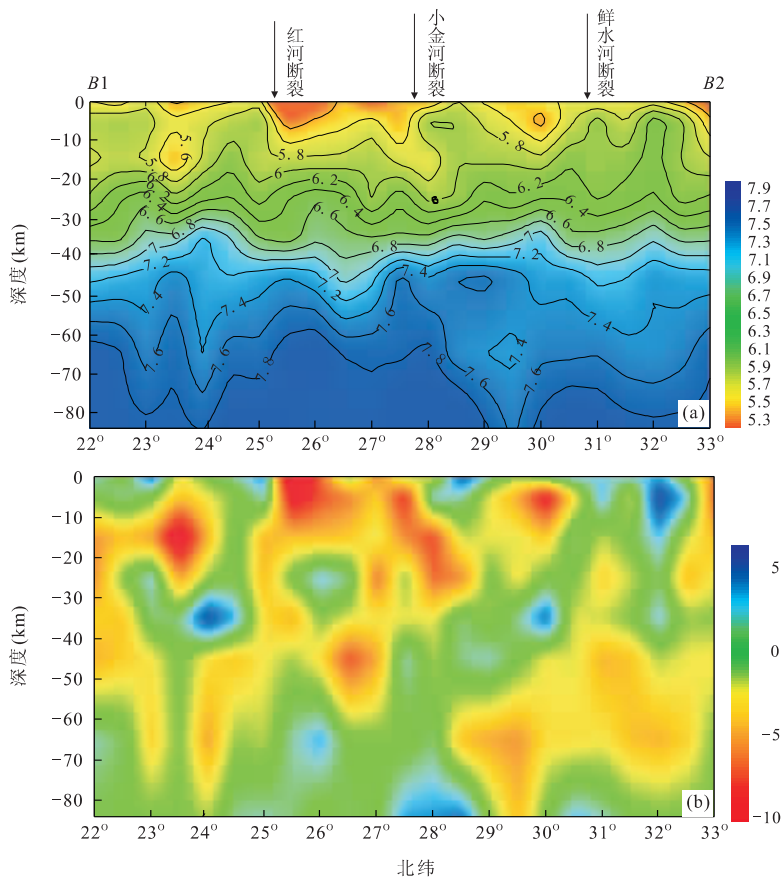


图 6 沿东经 101°线 B1B2 剖面的 P 波速度(km · s⁻¹)分布(a)及其扰动(b)

Fig. 6 Images of P wave velocity structure (a) and perturbation (b) along the vertical cross section B1B2

质上涌较为明显。北纬 25.2°至 26.5°的上地壳低速体对应中生代的楚雄盆地,其速度分布有反山根特征;壳内速度分布以负异常为主,盆地底部的上地幔正异常体局部上隆。

在北纬 27°至 28°之间,中上地壳有北西倾的负异常分布,深达 30 km,应是 NE 向小金河冲断带的表现。小金河冲断带在地表是青藏高原与云贵高原的分界,而在速度分布上不仅表现出冲断带之下的上地幔有局部上隆,而且以该带为界,以北青藏高原的负异常底界加深至 70~80 km,反映了地壳厚度的陡增。30°附近地壳浅部的速度负异常应反映以雅江为中心的中生代松潘—甘孜边缘海盆地的沉积建造。在北纬 31°附近,本剖面穿越强活动的 NW 向鲜水河断裂带,显示出该断裂带附近普遍在 40~70 km 深度上存在厚的低速层,且该断裂带正下方的低速层明显变浅至 30 km。这种速度结构反映鲜水河断裂带水平左旋运动的底部解耦带在断裂带的正下方较浅,远离断裂带较深。

(3)EW 向剖面。沿北纬 25°的 C1C2 剖面的 P 波速度分布如图 7a、7b 所示。自西向东,在东经 97.5°~99.5°之间的深部负异常揭示与腾冲火山有关的深部大岩浆囊应分布在 45~75 km 的深度上。剖面上浅部从东经 99°至 102°之间、深部在 101.5°达到最深的大型低速体可能反映了挤夹于昌宁—孟连和哀牢山古板块缝合带(朱创业等,1997)内的沉积变质岩系,而该低速体的浅部部分对应了已变形和深陷的兰坪—思茅盆地(廖宗延和陈跃昆,2005)的建造。剖面在东经 100.5°和 101.5°附近分别横跨 NW 向的红河断裂带和楚雄—建水断裂带,速度负异常高角度东倾(视倾向)可能反映了两条断裂主断面均倾向 NE。剖面在东经 103°附近穿越近 SN 向强活动的小江断裂带中段,该断裂带之下上地幔高速物质表现出上隆,断裂带两侧分别存在深度为 10~20 km(西侧)和 20~30 km(东侧)的壳内低速层,而断裂带本身在浅部也表现为相对低速。整条剖面 P 波速度由西向东下降趋势明显,表明地壳厚度由西向东逐渐增厚。

沿北纬 28°的 D1D2 剖面 P 波速度分布如图 7c、7d 所示。自西向东,在东经 99°附近中上地壳内的近直立速度负异常体与图 5 左边缘的陡立负异常体一样,可能是局部拼贴于金沙江古板块消减带上的古生代—中生代早期海相沉积层和火山堆积,同时,反映川滇块体的西边界(金沙江—中甸断裂带)

至少深达 50 km。在东经 102°~103°之间,一条东倾的速度负异常带反映这里在早中元古代时随大洋板块向东消减形成的古老褶皱变质岩系—康滇古陆块(胥德恩,1992)—可能局部被挤入到中地壳的深度,同时清楚地揭示出相同位置的近 SN 向安宁河断裂带—川滇块体东边界—也应是向东倾的、且属于切入上地幔的深大断裂带。安宁河断裂带两侧于中上地壳深度上的局部正异常则可能是元古代古岛弧的残块。D1D2 剖面在东经 99°~102°之间的川滇块体内,存在一向西倾斜的(视倾向)、断续的负异常带。可判定为一条深达上地幔的大断裂带,可能属于中生代时期扬子板块向西俯冲于龙门山—木里—哀牢山古岛弧之下时(罗志立,2000)的古消减带残余体的反映,在地表与之对应的是 NE 向丽江—小金河冲断带。因此,丽江—小金河冲断带将川滇块体一分为二,是以深部存在的 NE 向深大断裂为背景的。另外,此剖面还显示在川滇块体的北半部(NE 向深大断裂北西侧)于 10~30 km 和 40~50 km 深度分别存在近水平的低速层,它们可在不同深度上分别对川滇块体北半部的水平运动起到底部解耦作用。103°~104°之间上地壳的速度负异常对应中生代的西昌沉积盆地(大凉山地区),其在壳幔边界深度上也出现地壳厚度的陡变。104°以东的中上地壳的高速异常反映四川盆地西部由坚固古陆块构成的结晶基底,而中—下地壳则存在厚的低速层。从此剖面上可见到 104°附近、四川盆地与大凉山地区之间的上地壳表现为西倾的高—低速体的清晰边界,应属大型逆冲断裂带,对应了四川马边—雷波的活动断裂带和强震发生带。

沿北纬 30°线 E1E2 剖面的 P 波速度分布如图 7e、7f 所示。自西向东,在东经 98.0°~100.5°之间,两条陡立的高速扰动体及其向东的分支对应了西藏芒康、四川巴塘义敦和理塘等近 SN 向的长条状花岗岩岩基,它们属于中生代时期与古岛弧俯冲带(许志琴等,1992)伴生的侵入岩体。需要一提的是,作为川滇块体西边界的金沙江断裂带,在此剖面上已不很清晰。在东经 101°~102°附近,自上地壳开始的速度负异常向下延伸达 70~80 km,反映贡嘎山及其余脉等强烈隆升高山区的山根效应。鲜水河断裂带在东经 102°附近通过。另在东经 103°~104°之间,浅表 10 km 存在两个低速异常体,对应了四川盆地西缘两处晚中生代的凹陷沉积中心。103°~104°附近的壳幔边界明显向西倾斜,反映那里存在速度分布

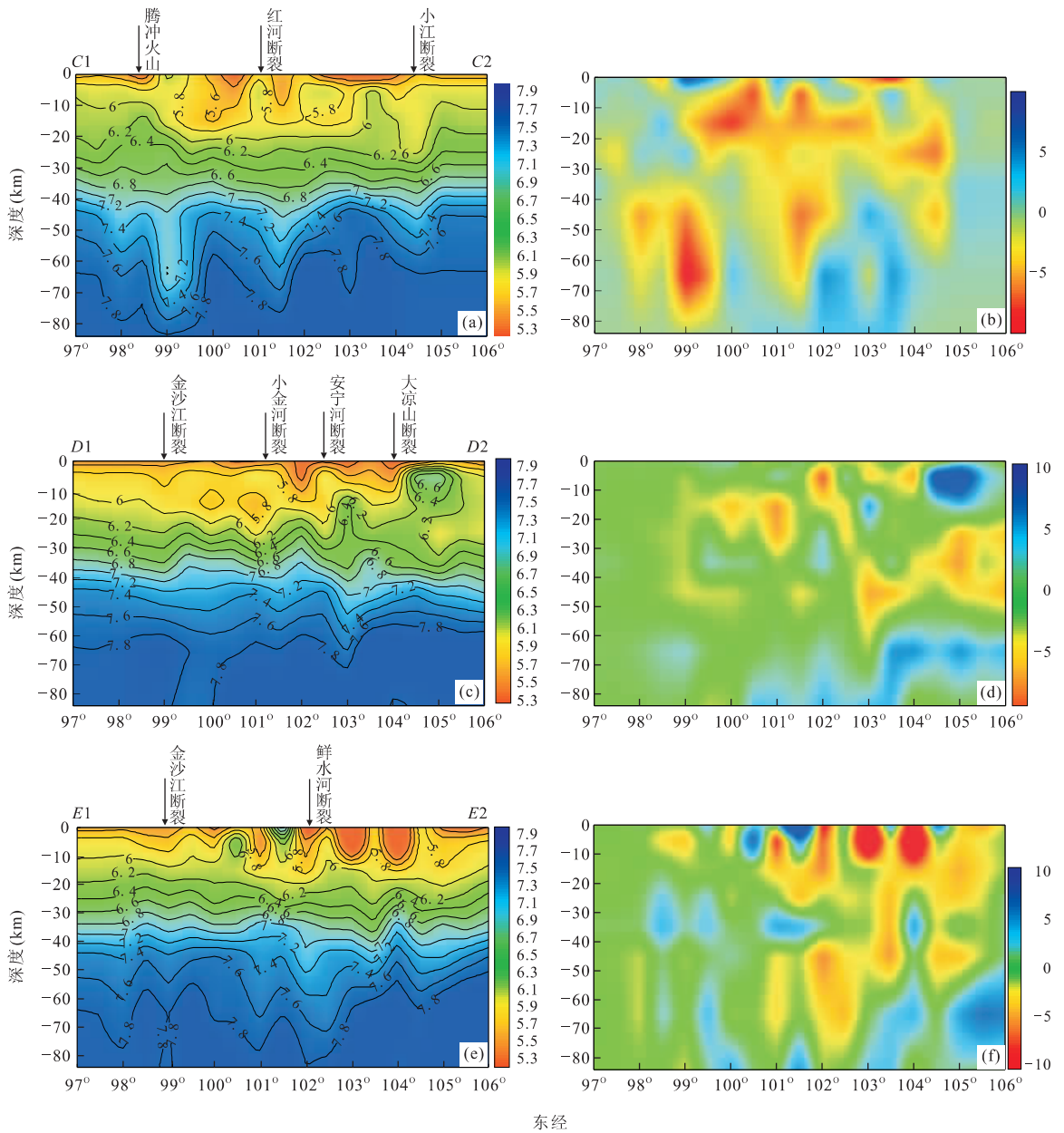


图 7 纬向剖面 P 波速度($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)分布及其扰动

Fig. 7 Images showing P wave velocity structures and perturbations along the latitudinal vertical cross sections (a)北纬 25°C1C2 剖面 P 波速度分布;(b)北纬 25°C1C2 剖面 P 波速度扰动;(c)北纬 28°D1D2 剖面 P 波速度分布;(d)北纬 28°D1D2 剖面 P 波速度扰动;(e)北纬 30°E1E2 剖面 P 波速度分布;(f)北纬 30°E1E2 剖面 P 波速度扰动

和地壳厚度的陡变带,也是四川盆地与青藏高原的分界地带。

3 讨论与结论

Huang *et al.* (2002)用 1981—1998 年的 25 752 条 P 波走时数据反演得到了川滇地区岩石圈 0~85 km 深度内几个截面 P 波速度图像;结果认为地

壳上地幔速度横向不均匀明显,上地壳速度图像与地表地质特征明显相关,中地壳存在大范围低速层,大型活动断裂两侧存在明显速度差异,强震位置与活动断裂及速度结构三者之间存在一定的关联性。Wang *et al.* (2003)用 1982—1999 年的 65 170 条 P 波、47 120 条 S 波走时数据,结合其他深部地球物理资料,确定了川滇地区地壳上地幔的三维速度结构;结果发现川滇地区是典型的构造活动区,地壳厚度

变化幅度接近 30 km, 速度异常图像与断裂相关, 且地壳上地幔平均速度低, 中下地壳的负速度异常与地震活动性相关。

本研究采用近 60 000 条初至 P 波走时资料获得川滇地区新的地壳上地幔的三维速度结构图像(图 4、6、7、8)。尽管采用的资料时段不同、反演方法也有一定的差异, 本文获得的速度结构分布总体上与 Huang *et al.* (2002)、Wang *et al.* (2003) 等的成果相近。然而, 本研究在分析和解释了三维速度结构图像时, 更加注重所得的速度结构图像与区域大地构造特征、地质环境的发展与演化关系的分析, 从而获得如下的新认识:

(1) 川滇的沉积盆地与高山山地主要表现出速度负异常的特征, 且部分高山的负异常可深达下地壳与上地幔, 反映出这些新生代造山带的强烈构造隆升与相伴的岩石圈重力均衡作用。NE 向龙门山断裂带的正下方在上地壳深度显示出速度正异常, 直到中、下地壳深度才在断裂带的 NW 侧出现负异常。这可解释为该断裂带的中—上地壳主要由推覆而来的古老变质花岗岩体组成, 推覆作用的持续使得该断裂带的正下方并无山根, 但使得断裂带 NW 侧地壳缩短和增厚, 出现由速度负异常显示的山根。

(2) 大陆动力学研究的深入已认识到岩石圈的层间耦合作用由两个主要因素决定: 一是力的作用状态或动力来源, 另一个是岩石圈流变结构(Fuchs, 1997; Ning *et al.*, 2003)。本研究发现川滇地区的大型活动断裂带附近在中下地壳普遍存在低速层, 可作为调节断裂和断块运动的底界或深部解耦的条件。不同地点壳内低速层的深度和层数不同, 其中, 沿川滇活动块体东边界, NW 向鲜水河断裂带中部正下方的低速层深 30 km, 断裂带两侧逐渐加深至 40~70 km; 安宁河、则木河断裂带附近的低速层深度为 15~20 km 和 45~65 km; 小江断裂带两侧的壳内低速层深度分别为 10~20 km (西侧) 和 20~30 km (东侧)。川滇活动块体西边界的近 SN 向金沙江断裂带中南段也分别在 10~20 km 和 40~50 km 深度存在壳内低速层。另外, 这些大型活动断裂带本身在中—上地壳深度也往往表现为相对低速体。

(3) 本研究结合速度结构图像与区域大地构造演化, 揭示和推断了与川滇地区古大地构造有关的深部构造特征。其中较重要的如已发现在川西金沙江地区存在一向东陡倾的显著速度负异常带, 深度

达 60~70 km, 并推断其属于中生代古特提斯洋壳向东和东北俯冲时、局部拼贴于消减带上的古生代—中生代早期的海相地层和混杂堆积体; 又如, 速度结构揭示川滇块体中部存在一北西倾斜的、深达上地幔的负异常带, 笔者判断它是中生代时期扬子板块向西俯冲的古消减带的残留体, 也是目前地表 NE 向丽江—小金河冲断带的深部构造背景。

(4) 本研究获得的速度结构剖面还显示出川滇主要活动断裂带的倾向与向下延伸的深度。其中, 鲜水河断裂带向 SW 陡倾, 深达壳幔边界; 安宁河断裂带向东倾、小江断裂带向西倾, 均属于切入上地幔的深大断裂带。红河断裂带倾向 NE, 金沙江断裂带高角度向东倾, 两者也深达上地幔。NE 向小金河断裂带属于倾向 NW 的冲断带, 四川盆地西南缘马边—雷波断裂带属于向西倾的、深度可能仅达中上地壳的冲断带。

致谢: 作者衷心感谢刘桂萍研究员、刘杰研究员对本研究工作给予的帮助, 感谢中国地震局地球物理研究所南北带项目组、云南省地震遥测台网中心、四川省地震局监测研究所给予的多方支持与协助。

References

- Aki, K., Lee, W. H. K., 1976. Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes 1: A homogeneous initial model. *J. Geophys. Res.*, 81(23): 4381—4399.
- Aki, K., Richards, P. G., 1980. *Quantitative Seismology*, Vol. 2. San Francisco: Freeman.
- Deng, Q. D., Zhang, P. Z., Ran, Y. K., et al., 2002. Basic characteristics of active faults in China. *Science in China (Ser. D)*, 32(12): 1020—1030 (in Chinese).
- Ding, G. Y., 1991. Relative motions of sub-plates and active blocks. In: Ding, G. Y., Introduction to Lithospheric Dynamics of China. Seismological Press, Beijing, 142—153 (in Chinese).
- Fuchs, K., 1997. Synopsis SFB 108—stress and stress release in the lithosphere. *Tectonophysics*, 275(1—3): 1—13.
- Fu, R. S., Zheng, Y., Chang, X. H., et al., 2001. Seismic tomography and the evaluation of the earth's mantle. *Progress in Geophysics*, 16(4): 85—95 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J. L., Zhao, D. P., Zheng, S. H., 2002. Lithospheric structure and its relationship to seismic and volcanic activity in southwest China. *J. Geophys. Res.*, 107(B10):

- doi:10.1029/2000JB000137.
- Humphreys, E., Clayton, R. W., 1988. Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems. *J. Geophys. Res.*, 93(B2):1073—1085.
- Inoue, H., Fukao, Y., Tanabe, K., et al., 1990. Whole mantle P-wave travel time tomography. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 59:294—328.
- Li, P., Wang, L. M., 1975. Research on basic seismological characteristics of Yunnan and western Sichuan region. *Scientia Geologica Sinica*, (4):308—325 (in Chinese with English abstract).
- Liao, Z. Y., Chen, Y. K., 2005. Nature and evolution of Lanping-Simao basin prototype. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 33(11):1527—1531 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. T., 1991. The research situation and a prespect on the three dimensional velocity structure. *Chinese J. Geophys.*, 34(6):788—796 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. T., Li, Q., Wu, H., et al., 1989. On the tomographic inverse method used in velocity image reconstruction. *Chinese J. Geophys.*, 32(1):46—61 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Z. L., 2000. Study on the perspective of petroleum deposits in the carbonate from the plate tectonic evolution in South China. *Marine Origin Petroleum Geology*, 5(3—4):1—19 (in Chinese with English abstract).
- Lutter, W. J., Nowack, R. L., 1990. Inversion for crustal structure using reflections from the PASSCAL Ouachita experiment. *J. Geophys. Res.*, 95(B4):4623—4646.
- Ma, L. F., 2001. Geological atlas of China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ma, X. Y., 1989. Lithospheric dynamics atlas of China. China Cartographic Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ning, J. Y., Zang, S. X., Wang, S. G., et al., 2003. Coupling between different layers of the lithosphere under horizontal drag underneath. *Science in China (Ser. D)*, 46(Suppl.):41—55.
- Qin, J. Z., Huangfu, G., Li, Q., et al., 2000. 3-D chromatography of velocity structure in Tengchong volcano areas and nearby. *Journal of Seismological Research*, 23(2):157—164 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J., Jin, G. W., Bai, D. H., et al., 2003. Sounding of electrical structure of the crust and upper mantle along the eastern border of Qinghai-Tibet plateau and its tectonic significance. *Science in China (Ser. D)*, 46(Suppl.):243—253.
- Thurber, C. H., 1983. Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote late area, Central California. *J. Geophys. Res.*, 88(B10):8226—8236.
- Um, J., Thurber, C., 1987. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 77:972—986.
- Wang, C. Y., Chan, W. W., Mooney, W. D., 2003. Three-dimensional velocity structure of crust and upper mantle in southwestern China and its tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 108(B9), 2442, doi:10.1029/2002JB001973.
- Wang, C. Y., Wu, J. P., Lou, H., et al., 2003. P-wave crustal velocity structure in western Sichuan and eastern Tibetan region. *Science in China (Ser. D)*, 46(Suppl.):254—265.
- Xiong, S. B., Zheng, Y., Yin, Z. X., et al., 1993. The 2-D structure and its tectonic implications of the crust in the Lijiang-Panzhuhua-Zhejiang region. *Chinese J. Geophys.*, 36(4):434—444 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. E., 1992. Discussion on the crustal evolution and uranium mineralization of the Xikang-Yunnan axis. *Uranium Geology*, 8(6):348—353, 378 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Zheng, R. Z., et al., 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China (Ser. D)*, 33(Suppl.):151—162 (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Hou, L. W., Wang, Z. X., et al., 1992. The orogenic evolution of Songpan-Ganze orogenic belt. Geological Press, Beijing, 53—62 (in Chinese).
- Zhang, P. Z., Deng, Q. D., Zhang, G. M., et al., 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China (Ser. D)*, 46(Suppl.):13—24.
- Zhang, Z. B., Cao, D. B., 2002. The relationship of the formation and evolution of Mesozoic Chuxiong basin to Ailaoshan Orogenic belt in central Yunnan—Exemplified by regional geological integrated section from Xishelu of Chuxiong to Bichengzhen of Lufeng. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2):129—134 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, D. P., Hasegawa, A., Horiuchi, S., 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, 97(B13):19 909—19 928.
- Zhao, D. P., Kayal, J. R., 2000. Impact of seismic tomography on earth sciences. *Current Science*, 79(9):1208

-1214.

Zhao, D. P., 2001. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 192(3): 251-265.

Zhu, J. S., 1996. The recent development of three-dimensional models and geodynamics of the earth's mantle. *Advance in Earth Sciences*, 11(5): 421-429.

Zhu, C. Y., Xia, W. J., Yi, H. S., et al., 1997. The tectonic nature and evolution of Mesozoic Lanping-Simaoping basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 24(4): 23-30 (in Chinese with English abstract).

Zhu, J. S., Cao, J. M., Cai, X. L., et al., 2003. Study for three dimensional structure of earth interior and geodynamics in China and adjacent land and sea regions. *Advance in Earth Sciences*, 18(4): 497-503 (in Chinese with English abstract).

Zhu, J. S., Cai, X. L., Cao, J. M., et al., 2005. Tectonic evolution and the 3-D structure of the lithosphere of the South China and the East Sea. The 7th of the 3-D structure of the lithosphere of China. Geological Publishing House, Beijing, 1-308 (in Chinese).

附中文参考文献

邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2002. 中国活动构造基本特征. *中国科学(D辑)*, 32(12): 1020-1030.

丁国瑜, 1991. 活动亚板块、构造块体相对运动. 见: 丁国瑜主编, *中国岩石圈动力学概论*. 北京: 地震出版社, 142-153.

傅容珊, 郑勇, 常筱华, 等, 2001. 地震层析成像板块构造及地幔演化动力学. *地球物理学进展*, 16(4): 85-95.

李坪, 汪良谋, 1975. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨. *地质科学*, (4): 308-325.

廖宗延, 陈跃昆, 2005. 兰坪—思茅盆地原型的性质及演化. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(11): 1527-1531.

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, 1991. 三维速度结构的研究现状和展望. *地球物理学报*, 34(6): 788-796.

罗志立, 2000. 从华南板块构造演化探讨中国南方碳酸盐岩含油气远景. *海相油气地质*, 5(3-4): 1-19.

马丽芳, 2001. *中国地质图集*. 北京: 地质出版社.

马杏垣, 1989. *中国岩石圈动力学图集*. 北京: 地图出版社.

秦嘉政, 皇甫岗, 李强, 等, 2000. 腾冲火山及邻区速度结构的三维层析成像. *地震研究*, 23(2): 157-163.

熊绍柏, 郑晔, 尹周勋, 等, 1993. 丽江—攀枝花—者海地带二维地壳结构及其构造意义. *地球物理学报*, 36(4): 434-443.

胥德恩, 1992. 康滇地轴地壳演化与铀成矿作用探讨. *铀矿地质*, 8(6): 348-353, 378.

徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等, 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源. *中国科学(D辑)*, 33(增刊): 151-162.

许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等, 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 53-62.

张志斌, 曹德斌, 2002. 滇中楚雄中生代盆地的形成、演化及其与哀牢山造山带的关系——以楚雄西舍路至禄丰碧城镇区域地质综合剖面为例. *地球学报*, 23(2): 129-134.

朱创业, 夏文杰, 伊海生, 等, 1997. 兰坪—思茅中生代盆地性质及构造演化. *成都理工学院学报*, 24(4): 23-30.

朱介寿, 1996. 全球地幔三维结构模型及动力学研究新进展. *地球科学进展*, 11(5): 421-429.

朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等, 2003. 中国及邻近陆域海域地球内部三维结构及动力学研究. *地球科学进展*, 18(4): 497-503.

朱介寿, 蔡学林, 曹家敏, 等, 2005. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化. *中国岩石圈三维结构丛书之七*. 北京: 地质出版社, 1-308.