

杨卓欣, 王夫运, 段永红, 张成科, 赵金仁, 张建狮, 刘宝峰. 2011. 川滇活动地块东南边界基底结构——盐源—西昌—昭觉—马湖深地震测深剖面结果. 地震学报, 33(4): 431-442.

Yang Zhuoxin, Wang Fuyun, Duan Yonghong, Zhang Chengke, Zhao Jinren, Zhang Jianshi, Liu Baofeng. 2011. Basement structure of southeastern boundary region of Sichuan-Yunnan active block: Analysis result of Yanyuan-Xichang-Zhaojue-Mahu deep seismic sounding profile. *Acta Seismologica Sinica*, 33(4): 431-442.

川滇活动地块东南边界基底结构

——盐源—西昌—昭觉—马湖深地震测深剖面结果^{*}

杨卓欣^{*} 王夫运 段永红 张成科
赵金仁 张建狮 刘宝峰

(中国郑州 450002 中国地震局地球物理勘探中心)

摘要 在川滇活动地块东南边界区域完成了盐源—西昌—昭觉—马湖深地震宽角反射/折射探测剖面。利用该剖面获得的 Pg 初至折射波走时, 采用走时特征分析、有限差分反演、时间项反演等方法, 获得了沿剖面的基底 P 波速度结构和基底界面构造图像。结果表明, 研究区基底结构呈现强烈的非均匀性, 不同构造区显示出不同的地壳变形特征。盐源盆地盖层表现为推覆逆冲变形, 基底为康滇地轴的基底, 表现为刚性。金河盆地—西昌中生代盆地盖层表现为褶皱、冲断和隆升变形, 基底断裂重新错断、破碎变形。大凉山地区以基底断裂重新错动、破碎变形为主。盐源推覆构造由盖层低速体、其下向西缓倾的基底面和高速基底构成, 它以向西缓倾的金河—箐河断裂为前峰向北东逆冲推覆, 推覆构造滑脱面则是向西缓倾的基底面, 深度为 2—3 km, 并在金河盆地西缘接近地表。金河、西昌中生代盆地基底起伏较大, 埋深明显大于两侧的盐源盆地和大凉山地区, 最大深度约 6 km。上地壳断裂被成像为低速条带或速度梯度带, 穿过断裂的走时曲线出现反向段特征, 断裂两侧基底埋深存在明显的变化。安宁河、则木河和大凉山断裂是研究区断裂特征明显的断裂。其中, 安宁河、则木河断裂表现为速度等值线强烈下凹的低速条带, 与两侧形成显著的速度差异, 倾向北东; 大凉山断裂表现为狭窄条带内速度结构急剧变化, 由两支组成: 西支倾向南西, 东支倾向北东; 磨盘山断裂倾向南西; 黑水河断裂分为两支: 西支倾向南西, 东支倾向北东; 西昌中生代盆地东缘断裂倾向南西。

关键词 川滇活动地块 深地震折射 基底结构

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.04.003 中图分类号: P315.2 文献标识码: A

Basement structure of southeastern boundary region of Sichuan-Yunnan active block: Analysis result of Yanyuan-Xichang-Zhaojue-Mahu deep seismic sounding profile

Yang Zhuoxin^{*} Wang Fuyun Duan Yonghong Zhang Chengke
Zhao Jinren Zhang Jianshi Liu Baofeng

(Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China)

* 基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(2004CB428400)和中国地震局国家科技攻关计划项目(2008BAC38B02)共同资助。中国地震局地球物理勘探中心科技论著 1001。

收稿日期 2010-05-08 收到初稿, 2011-02-09 决定采用修改稿。

[†] 通讯作者 e-mail: yzx531@yahoo.cn

Abstract: Yanyuan–Xichang–Zhaojue–Mahu wide-angle reflection/refraction deep seismic profile has been completed in the southeastern boundary region of Sichuan–Yunnan active block. The images of P-wave velocity structure and the basement interface along the profile are obtained by interpreting the arrival times of refracted Pg wave and using finite difference inversion and time-term inversion. The result shows that the basement structure is significantly inhomogeneous and different tectonic zones reveal different deformation features. The Yanyuan basin is characterized by caprock nappe thrust deformation, while its basement is the rigid base of Kangdian axis. In the range of Jinhe basin to Xichang Mesozoic basin, the caprock deformation is characterized by fold, thrust and uplift, while the basement reveals renewed dislocation and crush deformation of preexisting fault. In Daliang Mountain region deformation is mainly represented by renewed dislocation and crushing of basement fault. Yanyuan nappe structure is composed of caprock low-velocity body, gently west-dipping basement interface and deep high-velocity basement. It thrusts toward northeast with the west-dipping Jinhe–Qinghe fault zone as the nappe front. The detachment surface of the nappe structure is a gently west-dipping basement interface, which is 2–3 km deep and outcrops in the west margin of Jinhe basin. The basement depth varies generally and changes more significantly in the range from Jinhe basin to Xichang basin than in its western and eastern adjacent areas, with maximum depth being about 6 km there. The faults in the upper crust behave as the low velocity zones or velocity gradient zones, while the travel-time curves of Pg wave through the faults occur variation in negative slope and there is significant difference in the depth of basement on both sides of the faults. Faulting feature can be clearly seen on Anninghe fault, Zemuhe fault and Daliangshan fault. Anninghe fault and Zemuhe fault behave as low velocity belts, where strong concave velocity isolines appear and sharp velocity differences as compared with their two sides can be distinguished. The two faults both dip northeastward. Daliangshan fault is composed of two branches, with the west branch dipping southwestward and the east one northeastward, being characterized by rapid velocity variation structure in a narrow belt. Mopanshan fault dips toward southwest. Heishuihe fault is divided into two branches, with west one dipping toward southwest and east one dipping toward northeast. The east edge fault of Xichang Mesozoic basin dips toward southwest.

Key words: Sichuan–Yunnan active block; deep seismic refraction; basement structure

引言

川西南地区位于中国南北地震带中段。印度板块与欧亚板块的碰撞，青藏高原隆起，强大的东西向侧向挤压致使这一地区卷入褶皱、冲断和推覆构造中。该区历史上曾多次发生破坏性地震，现今构造变形仍十分强烈。多年来，众多学者对这一地区的活动构造、地壳运动与变形、地球物理场、地震活动性、地壳上地幔结构等进行了研究（李坪，汪良谋，1975；阚荣举等，1983；梁尚鸿等，1986；汪良谋，1982；袁学诚，1989；张培震等，2002；徐锡伟等，2003；吕江宁等，2003；江在森等，2005；闻学泽，2000；易桂喜等，2004；朱碚

定等, 1986; 孙克忠等, 1987; 滕吉文, 1987; 崔作舟等, 1987; 熊绍柏等, 1986; 尹周勋等, 1987; 尹周勋, 熊绍柏, 1992). 特别是采用主动源深地震测深方法探测其深部结构和构造, 提供地壳运动与地球动力学过程的壳幔深部地震学证据, 对该区强震预测研究具有重要价值(崔作舟等, 1987; 熊绍柏等, 1986; 尹周勋等, 1987; 尹周勋, 熊绍柏, 1992). 20世纪80年代, 横跨攀西构造带, 沿丽江—西昌—新市镇一线实施的深地震测深剖面给出了沿剖面的地壳分层结构(崔作舟等, 1987). 但限于当时的观测技术和条件, 其探测结果对异常结构和构造的细节分辨能力却十分有限. 随着地震测深观测技术和资料解释方法的快速发展, 近年来, 地壳精细结构探测研究方法已经得到广泛的应用(Vidale, 1990; Hole, 1992; Fuis *et al.*, 1996, 2001). 2005年, 中国地震局地球物理勘探中心在川西南沿盐源—西昌—昭觉—马湖一线布设了地震宽角反射/折射探测实验剖面(图1). 这次探测采用了密集炮距、密集观测点距和多重相遇追逐观测系统, 地下介质被地震波场密集充分采样, 获得了相对完备的数据集. 本文利用这次探测获得的初至折射波资料, 通过走时特征分析、有限差分速度成像(Vidale, 1990; Hole, 1992)、时间项反演(Scheidegger, Willmore, 1957)等方法, 获得了沿剖面的基底精细结构特征.

1 区域地质构造概况

研究区位于川西南川滇活动地块(张培震等, 2003)东南边界盐源—西昌—马湖一线, 在大地构造上处于青藏高原向扬子准地台的过渡带上. 以金河—箐河断裂带为界, 断裂带西北侧属青藏高原的松潘—甘孜褶皱带, 东南侧属扬子准地台的康滇古陆(图1), 两者接触区域以逆冲推覆构造为特征. 康滇古陆是一个晚古生代到中生代活动的古裂谷带, 具有先张后压的双重构造特征. 它由轴部地垒式基底隆起带和东西两侧中生代盆地带构成, 主要受控于南北向主干断裂带. 这些断裂带在裂谷发育早期是岩浆贯入和喷发活动的主要通道, 晚期转为控制裂谷盆地沉积的同生盆缘正断层. 古新世末期, 由于印度板块与欧亚板块的最终碰撞, 造成甘孜块体向康滇前陆的主动挤压作用, 康滇古陆转化为康滇南北向褶皱冲断带, 盆缘断裂和轴部基底隆起带上的断裂变为压扭性质. 同时在康滇古陆的西部边缘地带发生壳内滑脱构造, 形成木里、盐源两个相互叠覆的弧形冲断推覆构造. 新生代以来, 随着青藏高原的急剧隆起, 古陆基底断裂再次复活, 沿安宁河谷地带形成长条状或串珠状的断陷盆地带, 它是今日区内重要的活动构造和地震活动带(骆耀南, 1985; 唐若龙等, 1985). 金河—箐河断裂历来被认为是康滇地轴西缘边界的深断裂, 但实际上它是盐源推覆构造东翼的前锋断裂, 深部可能存在一个低缓角度的推覆构造滑移面, 沿此滑移面, 古生代海相沉积岩推覆到康滇古老基底之上(葛肖虹, 1984). 大凉山断裂由出露至地表的多条高角度逆冲断层组成, 是康滇地轴和凉山陷褶束的边界断裂, 也是二叠纪峨眉山玄武岩的喷溢中心(刘丽华等, 2003).

2 观测系统和数据

盐源—西昌—昭觉—马湖深地震测深剖面全长约300 km, 呈南西—北东向展布, 由西向东相继跨过属松潘—甘孜褶皱系的盐源弧形构造、属扬子准地台的康滇地轴和凉山陷褶束等构造单元. 穿越的主要断裂有: 金河—箐河断裂、安宁河断裂、则木河断裂、大凉山断裂和马边断裂(图1).

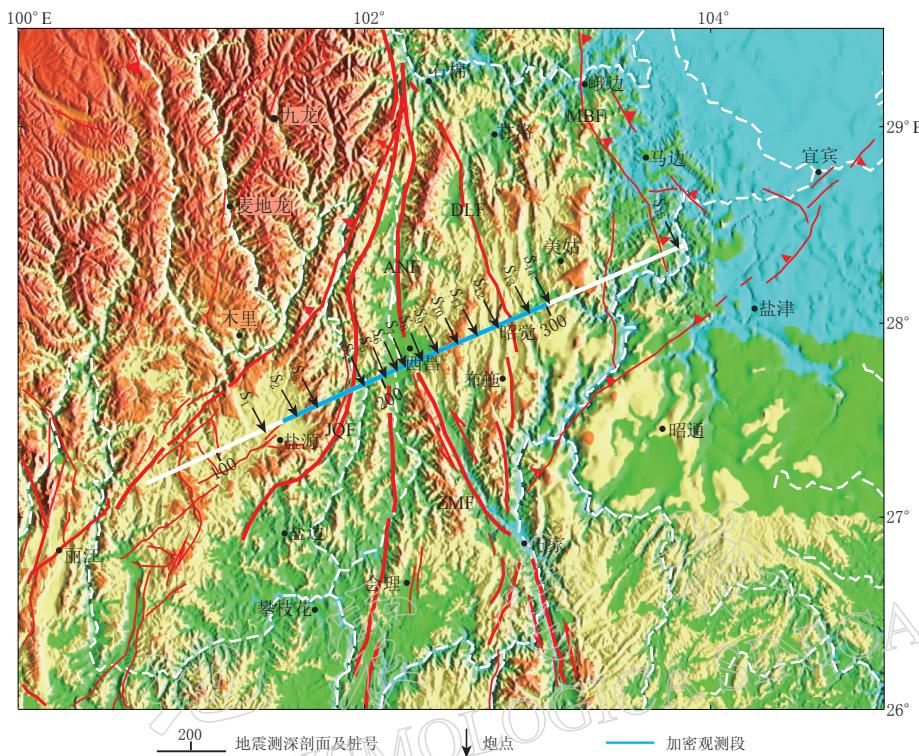


图 1 研究区主要地质构造和深地震测深剖面位置
 JQF: 金河—箐河断裂带; ANF: 安宁河断裂带; ZMF: 则木河断裂带;
 DLF: 大凉山断裂带; MBF: 马边断裂带

Fig. 1 Geological structure and location of the deep seismic sounding profile
 JQF: Jinhe—Qinghe fault; ANF: Anninghe fault; ZMF: Zemuhe fault;
 DLF: Daliangshan fault; MBF: Mabian fault

观测系统采用多重追逐和相遇观测系统(图 2). 沿剖面分别在 129 km(S_1)、148 km(S_2)、160 km(S_3)、192 km(S_4)、204 km(S_5)、209 km(S_6)、214 km(S_7)、224 km(S_8)、231 km(S_9)、246 km(S_{10})、256 km(S_{11})、270 km(S_{12})、290 km(S_{13})、301 km(S_{14})和 380 km(S_{15})桩号进行了 15 次组合激发爆破, 炸药量为 300—1725 kg, 平均炮间距约 20 km. 为了对川滇地块边界活动断裂进行重点控制, 在从盐源—昭觉以东约 180 km 观测段上进行了密集观测, 观测点距为 0.5—0.8 km, 其它地段观测点距为 1—2 km.

本次观测共获得 Pg 波走时数据 2321 个, 走时拾取精度 0.04 s 左右.

3 Pg 波走时特征

Pg 波是地震记录中的初至震相, 被认为是来自上地壳顶部覆盖层的回折波或首波, 其走时曲线特征的变化直观地反映了基底速度和界面特征的变化. 当速度或界面发生横向变化时, Pg 波走时常表现出超前或滞后. 高速隆起区走时相对超前, 低速凹陷区走时相对滞后, 走时曲线出现突然反向段变化特征则可能与断裂构造有关(Yan *et al*, 2005). 因此, 通过对 Pg 波走时特征进行分析, 可以获得对基底结构、构造的定性认识.

图 3 给出了剖面 129 km(S_1)、192 km(S_4)、246 km(S_{10})和 290 km(S_{13})桩号炮的 Pg

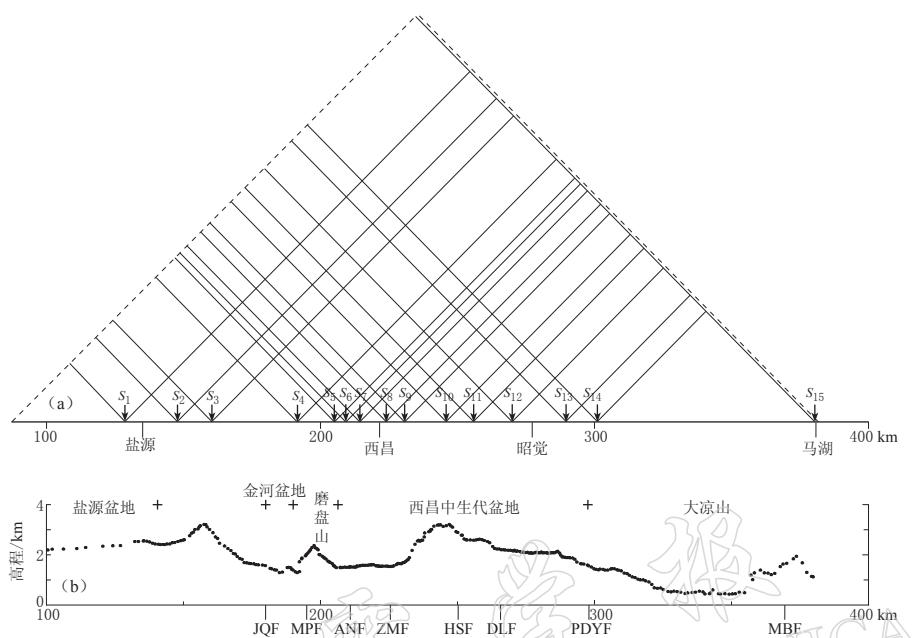


图 2 深地震测深剖面观测系统图. (a) 观测系统图; (b) 地表高程

JQF: 金河—箐河断裂带; MPF: 磨盘山断裂带; ANF: 安宁河断裂带; ZMF: 则木河断裂带;

HSF: 黑水河断裂带; DLF: 大凉山断裂带; PDYF: 西昌盆地东缘断裂带; MBF: 马边断裂带

Fig. 2 Layout of Yanyuan-Xichang-Zhaojue-Mahu wide angle reflection/refraction profile
(a) Observation layout; (b) Surface elevation.

JQF: Jinhe-Qinghe fault; MPF: Mopanshan fault; ANF: Anninghe fault; ZMF: Zemuhe fault;
HSF: Heishuihe fault; DLF: Daliangshan fault; PDYF: East margin fault
of Xichang Mesozoic basin; MBF: Mabian fault

波记录截面. 由图 3 可见, Pg 波走时曲线起伏不平, 上凸和下凹交替出现, 显示了沿剖面高速隆起和低速凹陷相间分布的基底结构特征.

S_1 炮右支 Pg 波组在炮检距 0—135 km 范围内可连续追踪(图 3a). Pg 波走时在 60 km 两侧存在明显的差异. 60 km 以西的盐源盆地主要是早、中三叠世地层露头, Pg 波走时相对超前, 反映了盐源盆地盖层速度相对较高, 基底相对较浅; 60 km 以东的金河盆地主要是晚三叠世地层露头, 西昌盆地主要是侏罗、白垩纪地层露头, Pg 波走时相对滞后, 反映了金河、西昌盆地盖层速度相对较低, 基底相对较深.

S_4 炮左支 Pg 波组可追踪距离约 60 km, 走时约在 15 km 以西显示出逐渐滞后的趋势(图 3b), 反映了盐源盆地盖层厚度由西向东减薄, 基底界面向西倾斜.

S_{10} 炮左支从炮检距 20—50 km, 在约 30 km 的距离内, Pg 波走时曲线呈现由上凸到下凹再到上凸的变化形式(图 3c), 不仅表明该范围内基底具有高、低速相间结构特征, 而且表明速度变化急剧, 暗示了基底的强烈变形.

S_{10} 炮右支炮检距 45 km 以东和 S_{13} 炮右支的 Pg 波组反映的是大凉山地区的基底结构特征. 大凉山地区主要是二叠、三叠纪地层露头, S_{10} 炮右支炮检距 45 km 以东走时显著超前(图 3c); S_{13} 炮右支在近炮点几乎没有回折波出现(图 3d). 这些走时特征都表明大凉山陷褶束盖层速度高, 相对其西侧的西昌盆地基底呈上隆状态.

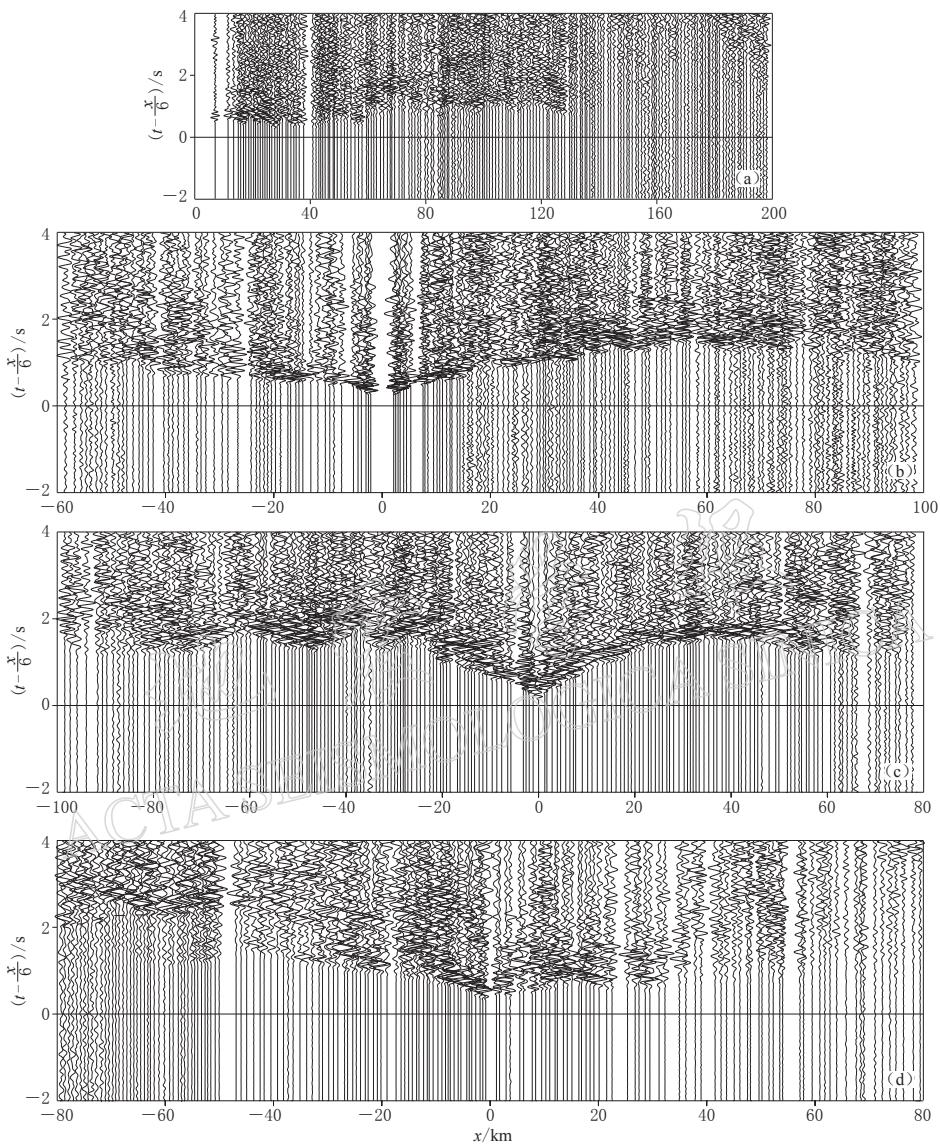


图 3 Pg 波地震记录截面图. (a) S_1 右支; (b) S_4 ; (c) S_{10} ; (d) S_{13}

Fig. 3 Seismic record sections of Pg wave. (a) Right part of S_1 ; (b) S_4 ; (c) S_{10} ; (d) S_{13}

走时曲线出现反向段特征可能暗示了断层存在的可能性(Yan *et al.*, 2005). 通过对 15 炮地震记录的 Pg 波走时曲线分析后发现, 穿过断裂的 Pg 波走时曲线在断裂存在的位置附近都出现不同程度的反向段特征. 图 4 是根据 Pg 波走时数据绘制的折合时距曲线图.

约在 180—190 km 桩号范围, 与磨盘山断裂对应, S_1 炮右支、 S_6 — S_{11} 炮左支走时曲线均出现反向段(图 4a). S_1 — S_3 炮右支、 S_6 — S_{11} 炮左支走时曲线约在 200—210 km 桩号范围均出现反向段(图 4b), 反映了安宁河断裂的存在. 约在 215—225 km 桩号范围, 则木河断裂位置, S_4 — S_6 炮右支、 S_9 — S_{12} 炮左支走时曲线均出现反向段(图 4c). 约在 240—255 km 桩号范围, S_4 — S_9 炮右支、 S_{12} — S_{13} 炮左支走时曲线均出现反向段, 反映了黑水河断裂的存在(图 4d). S_6 — S_{10} 炮右支走时曲线约在 265—270 km 桩号范围均出现反向段则是大凉

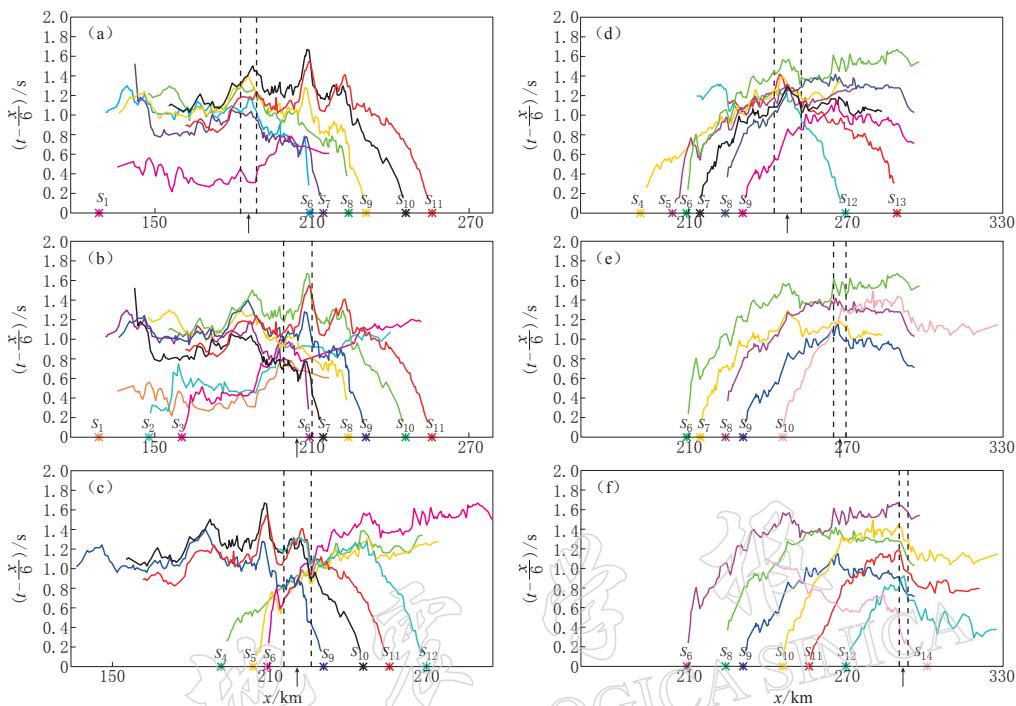


图 4 Pg 波折合时距曲线图

(a) S_1 右支, S_6 — S_{11} 左支; (b) S_1 — S_3 右支, S_6 — S_{11} 左支; (c) S_4 — S_6 右支, S_9 — S_{12} 左支;
 (d) S_4 — S_9 右支, S_{12} — S_{13} 左支; (e) S_6 — S_{10} 右支; (f) S_6 , S_8 — S_{12} 右支, S_{14} 左支

Fig. 4 Reduced travel-time curves of Pg wave

(a) Right part of S_1 , left part of S_6 — S_{11} ; (b) Right part of S_1 — S_3 , left part of S_6 — S_{11} ; (c) Right part of S_4 — S_6 , left part of S_9 — S_{12} ; (d) Right part of S_4 — S_9 , left part of S_{12} — S_{13} ;
 (e) Right part of S_6 — S_{10} ; (f) Right part of S_6 , S_8 — S_{12} , left part of S_{14}

山断裂存在的走时证据(图 4e). 约在 290—295 km 桩号范围, S_6 炮右支、 S_8 — S_{12} 炮右支、 S_{14} 炮左支走时曲线反向段的出现揭示了西昌盆地的东边界(图 4f).

4 基底速度结构

为了获得沿剖面的基底速度结构, 我们采用了 Pg 波走时的有限差分层析成像方法. 有限差分反演方法(Vidale, 1990; Hole, 1992)通过利用接收段所有的初至折射走时, 重建沿测线从地表到折射深度层之间的速度图像, 它特别适用于小尺度复杂结构的精细研究. 有限差分反演得到的是速度分布, 强速度变化带可能与构造边界相关.

参与反演的 Pg 走时数据有 1900 余个. 根据 Pg 波走时特征, 结合测区地球物理等资料建立反演的初始模型. 初始模型由速度梯度不同的两层组成. 第一层: 从地表至 10 km 深度, 速度从 4.5 km/s 递增到 6.0 km/s; 第二层: 从 10—16 km 深度, 速度从 6.0 km/s 递增到 6.2 km/s(图 4a). 模型网格大小为 1 km×1 km. 经过 100 次反演迭代后, 均方根走时残差从初始的 0.57 s 下降到 0.06 s.

图 5a 给出了 P 波速度结构图像和一维初始模型, 图 5b 是相应的射线数分布图. 根据射线数分布情况, 可以圈定反演结果的可靠区域. 图 5a 中白色虚线之上区域的射线覆盖密度和交叉程度较高, 反演结果可靠; 白色虚线之下区域的反演结果只作参考.

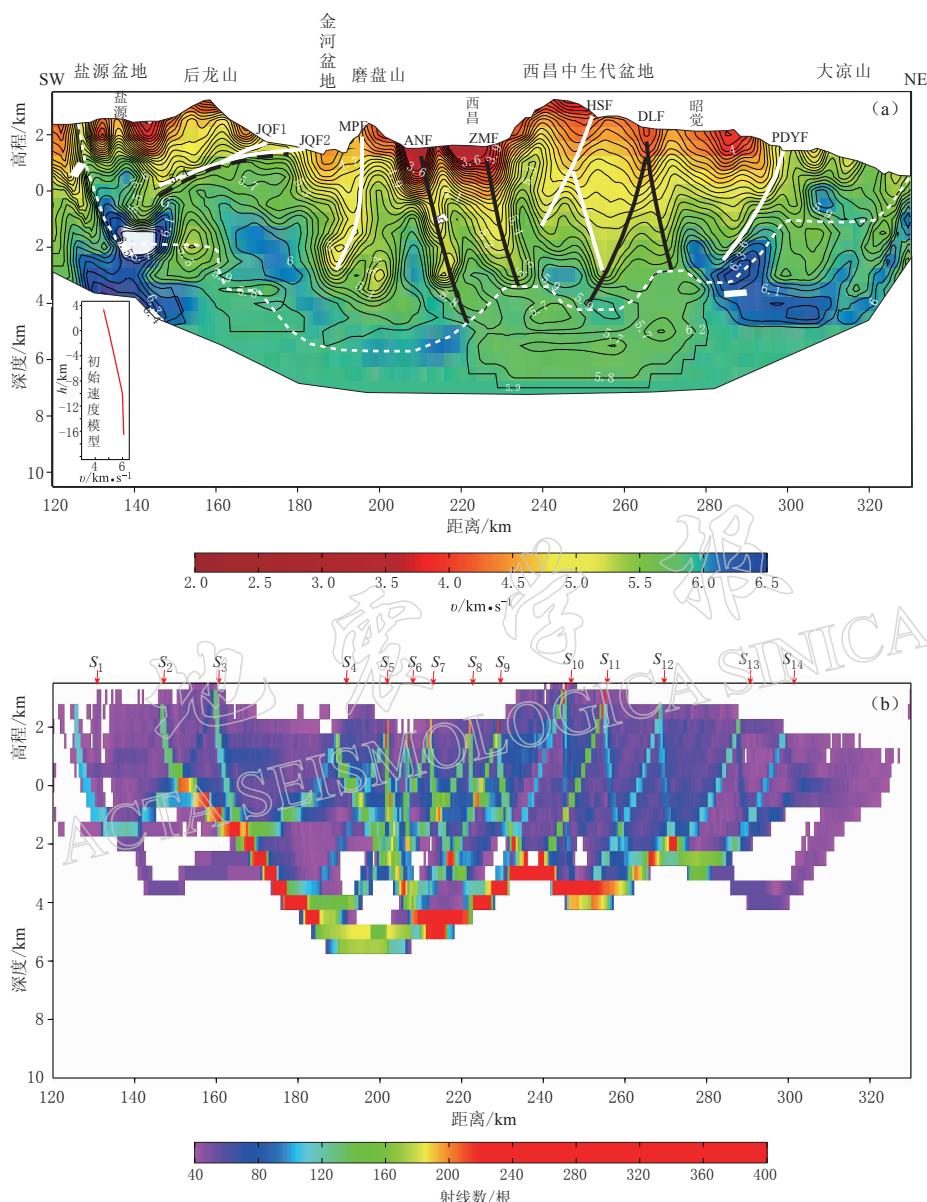


图 5 Pg 波有限差分反演结果. (a) P 波速度结构; (b) 射线数分布

JQF1, JQF2: 金河—箐河断裂带; MPF: 磨盘山断裂带; ANF: 安宁河断裂带; ZMF: 则木河断裂带;

HSF: 黑水河断裂带; DLF: 大凉山断裂带; PDYF: 西昌盆地东缘断裂带

Fig. 5 P wave velocity structure (a) obtained by inverting DSS data and associated seismic rays (b).

JQF1, JQF2: Jinhe–Qinghe fault; MPF: Mopanshan fault; ANF: Anninghe fault;

ZMF: Zemuhe fault; HSF: Heishuihe fault; DLF: Daliangshan fault;

PDYF: East margin fault of Xichang Mesozoic basin

剖面 120—180 km 桩号大致对应于盐源盆地. 由图 5a 可见, 盐源盆地地表速度约在 3.7—4.7 km/s 之间. 随着深度的加深, 速度等值线密度大约在 5.5 km/s 等值线附近发生显著的变化, 自上而下, 速度由等值线密集的强梯度结构变为相对缓变的弱梯度结构, 表

明该区域基底界面大约在 5.5 km/s 速度等值线附近。如图 5a 中 G 所示, 约 140—170 km 桩号, 以后龙山为中心的低速体, 其厚度由南西向北东减薄, 并尖灭于金河盆地西缘, 其下的基底高速在金河盆地西缘几乎出露。基底面总体由南西向北东抬升, 其东端在金河盆地西缘接近地表。这一速度影像形象地呈现了盐源推覆构造。图 5a 显示, 在 140 km 桩号西侧, 可见明显的高速条带自地表向下延伸, 它与位于深度坐标 2 km、速度高达 6.5 km/s 的高速块体相连。本研究推测 140 km 桩号西侧可能曾经存在峨眉山玄武岩浆喷溢的通道。实际上在后龙山东坡沿山脉走向出露有条带状海相喷发玄武岩。

剖面 180—300 km 桩号大致对应于金河—西昌盆地。该区域速度等值线呈现波状起伏, 速度结构以高、低速相间分布为特点。由图 5a 可见, 金河、西昌盆地地表速度约 3.5—4.6 km/s。在磨盘山西侧, 约 180—200 km 桩号范围存在一个总体略向南西倾斜的低速条带。该条带自地表向下延伸约 5 km, 倾向南西, 是磨盘山断裂(MPF)的构造影像。在约 200—240 km 桩号, 安宁河、则木河断裂存在的区域, 速度等值线起伏急剧, 表明该区域非均匀性强烈, 基底遭受强烈变形。在该区域可见两个北东倾向、向下延伸 6—7 km 的低速条带。在这两个低速带内, 速度等值线自近地表就表现出强烈的下凹形态, 低速特征明显, 与周围形成较大的速度差异, 显示了安宁河断裂(ANF)和则木河断裂(ZMF)基底被挤压改造的破碎结构特征。约 240—300 km 桩号, 速度等值线起伏变化总体相对缓慢, 疏密分布较为均匀, 低速盖层较厚, 最厚处约 6 km, 显示了沉积盆地特征。该范围内可见 3 个速度异常带, 大约位于 240—255 km 桩号的黑水河断裂(HSF)表现为相对宽缓的低速带, 呈南西倾向向下延伸约 4 km, 约在地表下 2 km 深处产生一个与其倾向相背的低速条带, 向下延伸约 4 km; 约在 260—270 km 桩号之间, 大凉山断裂(DLF)由两支组成, 表现为狭窄条带内速度结构的强烈变化, 东支北东倾向, 向下延伸约 5 km, 西支南西倾向, 向下延伸约 6 km; 约 280—300 km 桩号, 深度坐标 2 km 之下存在的高速异常体, 可能与大凉山断裂曾经是岩浆上涌的通道有关。

剖面 300 km 桩号以东的大凉山陷褶束为相对高速区, 速度在 5.0 km/s 以上, 且不均匀。地表速度高达 5.0 km/s, 与其西侧的西昌盆地存在明显的速度差异。大约在 290—300 km 桩号形成一个强速度梯度带, 总体倾向南西, 自地表向下延伸 4 km 左右, 反映了西昌盆地的东边界(PDYF)。

5 基底界面构造

沿剖面 Pg 波在远炮点视速度相对稳定, 接近 6.0 km/s, 表明上地壳上部可能存在速度或速度梯度界面。为了获得基底界面构造形态, 对 Pg 波远炮点走时资料(约 1900 多个数据), 采用时间项方法(Scheidegger, Willmore, 1957)进行了反演。

有限差分像是利用初至波走时反演获得纵横向非均匀构造条件下的速度结构, 在反演中并不考虑界面的存在。因此, 该方法不是通过反演直接得到界面的构造形态, 而是通过分析速度等值线的梯度变化来对界面进行判断。时间项方法是利用沿界面滑行的首波走时, 结合上覆介质的平均速度获得界面形态和埋深。因此, 在有较准确的上覆介质速度信息的前提下, 时间项方法能够更准确、更直观地反映界面构造形态。

利用有限差分反演确定基底速度结构, 为时间项方法进行界面成像提供较准确的速度参数, 而时间项所得结果则可以进一步印证有限差分得到的界面构造。

图 6 给出了由时间项反演得到的基底界面形态。上覆介质平均速度参考有限差分反演结果和各炮一维速度-深度函数反演结果分段确定。P 波沿基底面的滑行速度也由反演同时得到, 约为 5.8 km/s。

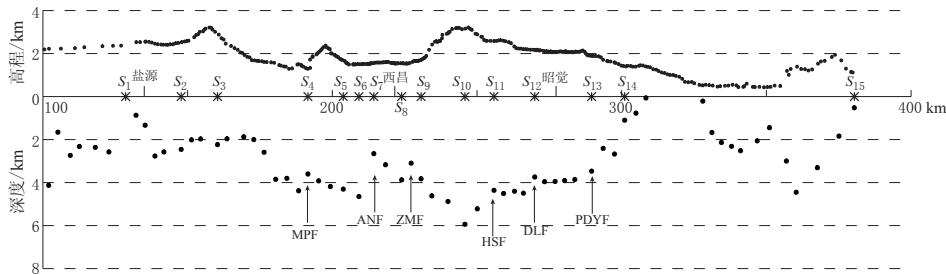


图 6 Pg 波时间项反演结果

MPF: 磨盘山断裂带; ANF: 安宁河断裂带; ZMF: 则木河断裂带; HSF: 黑水河断裂带;
DLF: 大凉山断裂带; PDYF: 西昌盆地东缘断裂带

Fig. 6 Basement depth obtained by inverting Pg wave time-terms

MPF: Mopanshan fault; ANF: Anninghe fault; ZMF: Zemuhe fault; HSF: Heishuihe fault;
DLF: Daliangshan fault; PDYF: East margin fault of Xichang Mesozoic basin

由图 6 可见, 沿剖面基底界面变化强烈。在约 120—180 km 桩号, 盐源盆地范围内, 基底界面埋深在 1—3 km 之间变化。其中, 约在 140—170 km 桩号, 基底自西向东从 3 km 抬升至 2 km, 呈现向南西倾斜的界面构造形态, 显示了盐源推覆构造滑移面的形态和埋深。180 km 桩号以东, 进入金河、西昌盆地, 基底埋深明显加深, 最深处位于西昌盆地中部, 约达 6 km 之深。大约在 191, 214, 227, 255, 270 km 和 290 km 桩号处可见不同程度基底深度的突变, 预示了断裂的存在。它们依次对应于磨盘山断裂(MPF)、安宁河断裂(ANF)、则木河断裂(ZMF)、黑水河断裂(HSF)、大凉山断裂(DLF)和西昌中生代盆地东缘断裂(PDYF)。约至 290 km 桩号, 基底明显抬升进入大凉山陷褶带, 至 300 km 桩号, 基底深度浅至 1 km 以上。

综上可见, 时间项方法根据基底界面的起伏变化来推测基底断裂, 其解释结果与有限差分速度成像的断层解释结果具有较好的一致性。

时间项反演得到的是基底界面特征, 有限差分反演得到的是基底速度分布特征。利用时间项方法对构造界面的敏感和有限差分方法对速度的敏感, 对同一资料采用两种不同的解释方法, 可以更可靠地确定基底断裂的位置、空间展布特征及延伸状态。

6 讨论与结论

研究区上地壳强烈变形, 基底速度、界面结构呈现强烈的非均匀性。当强大的挤压力作用于刚性阻体时, 一方面是塑性较大的块体压缩变形, 产生大规模的逆冲和逆掩作用, 这是阻体前缘的特征构造; 另一方面是刚性阻体产生缓慢位移或发生裂错, 常表现为盖层褶皱, 阻体边界或内部断裂重新活动(汪良谋, 1982)。

3 种方法的分析结果给出了在挤压构造体系下不同构造区上地壳顶部的变形特征以及断裂构造的平面位置、深部形态和特征。

盐源盆地盖层表现为推覆逆冲变形, 基底则是康滇地轴的基底, 表现为刚性。地表地

质考察发现, 盐源弧形构造是发生于喜山期、规模巨大的推覆构造, 它以低缓角度的金河—箐河断裂为前锋断裂向东逆冲, 深部可能存在一个低缓角度的构造滑移面(葛肖虹, 1984). 本文结果证实了这一结论. 由 140—170 km 桩号范围的速度结构图像可见, 盐源推覆构造由盖层低速体、其下向西缓倾的基底面和高速基底构成. 古生代海相沉积岩逆冲推覆到康滇地轴古老基底之上, 金河—箐河断裂向西缓倾, 是推覆构造的前锋断裂. 推覆构造滑移面则是向西缓倾的基底面, 走时曲线和时间项反演也显示了这个滑移面的存在及形态, 并由时间项反演得到其深度为 2—3 km.

西昌盆地较厚的低速盖层、波状起伏的速度等值线以及隆升的地貌特征表明, 西昌盆地中生代时期处在长期和稳定的沉积环境中. 新生代以来, 在甘孜块体侧向挤压作用下, 其盖层发生褶皱, 冲断和隆升变形, 基底断裂重新错断、破碎变形. 本研究揭示该区域上地壳顶部存在 6 条断裂. 这些断裂被成像为低速条带或速度梯度带, 穿过断裂的走时曲线出现反向段特征, 断裂两侧基底埋深存在明显的变化. 安宁河、则木河断裂低速特征明显, 基底强烈下陷, 表明在东西向侧向挤压下, 该处结晶基底承受了更大的构造应力及结构改造. 大凉山断裂曾经是峨眉山玄武岩浆喷溢的通道, 断裂两侧地表较大范围内可见玄武岩体分布. 速度成像结果显示该断裂由两个分支组成, 处在速度横向变化急剧的位置, 尤其是东支较明显地表现了这一结构特征, 这可能是古老的岩浆喷发通道, 现今被冷凝的岩浆充填的结果. 推测西支断裂可能是喜山期西昌中生代盆地在强烈的区域压扭力作用下形成的新生断层. 青藏高原物质的东向挤出造成川滇地块东移, 在东部相对稳定的华南块体阻挡下, 川滇地块向南东侧向滑移, 由此导致其东边界的安宁河、则木河和大凉山断裂左旋走滑以及产生挤压构造变形, 断裂重新活动和更加破碎. 丽江—新市镇主动源地震测深剖面揭示了安宁河、大凉山断裂都是切割莫霍面的超壳断裂(崔作舟等, 1987). 王夫运等(2008)研究结果表明, 7—15 km 深度的数条小震密集带分别与安宁河、则木河和大凉山断裂的下延趋势吻合, 这 3 条断裂是切穿基底、规模较大的异常构造, 是可能发生强震的场所. 而磨盘山、黑水河和西昌盆地东缘断裂仅延伸至基底顶面, 它们没有发生较大地震的可能.

速度结构图像中所显示的研究区基底深处局部异常高速体的存在, 则表明康滇地轴在发展演化过程中经受了张性构造形变, 控制其发育的断裂曾以拉张作用为主.

本研究揭示的研究区上地壳顶部结构及变形特征记录着康滇南北构造带的发展和演变历史. 晚古生代时期, 由于地幔上涌, 地壳成穹, 引张, 康滇古陆基底老断裂在地壳成穹的东西两端复活为边缘断裂, 喷发了强碱性玄武岩, 形成了东部凉山和西部后龙山玄武岩. 之后, 康滇古陆强烈隆升剥蚀, 东西两侧下降沉积. 晚三叠世, 由差异运动形成以磨盘山断裂和安宁河断裂所挟持的轴部基底隆起带为地垒, 东西两侧为地堑盆地的构造格局. 喜马拉雅造山运动期间, 甘孜块体向南南东方向运动, 受到古老刚性康滇地轴的阻挡, 其盖层逆冲推覆到康滇地轴基底之上, 形成了著名的盐源推覆构造体. 同时, 康滇裂谷盆地发生强烈的褶皱和冲断, 转化为康滇南北向褶皱冲断带, 控制裂谷发育的断裂发生性质上的转变, 成为现今压扭性质的断裂.

参 考 文 献

崔作舟, 卢德源, 陈纪平, 张之英, 黄立言. 1987. 攀西地区的深部地壳结构与构造[J]. 地球物理学报, 30(2): 566-

580.

- 葛肖虹. 1984. 川西盐源推覆构造的探讨[J]. 长春地质学院学报, **35**(1): 36-43.
- 江在森, 牛安福, 王敏, 黎凯武, 方颖, 张希, 张晓亮. 2005. 活动断裂带构造变形定量分析[J]. 地震学报, **27**(6): 610-619.
- 阚荣举, 王绍晋, 黄琨, 宋文. 1983. 中国西南地区现代构造应力场与板内断块相对运动[J]. 地震地质, **5**(2): 79-90.
- 李坪, 汪良谋. 1975. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨[J]. 地质科学, (4): 308-325.
- 梁尚鸿, 束沛鎰, 李幼铭, 朱碚定, 张立敏. 1986. 攀西地区地震分布和构造应力场特征[J]. 地球物理学报, **29**(6): 557-566.
- 刘丽华, 徐强, 范明祥. 2003. 西昌盆地构造特征和含油气条件分析[J]. 天然气工业, **23**(5): 34-38.
- 骆耀南. 1985. 中国攀枝花—西昌古裂谷带[G]//张云湘主编. 中国攀西裂谷文集(1). 北京: 地质出版社: 1-25.
- 吕江宁, 沈正康, 王敏. 2003. 川滇地区现代地壳运动速度场和活动块体模型研究[J]. 地震地质, **25**(4): 543-552.
- 孙克忠, 滕吉文, 金东敏, 郑晔. 1987. 攀西构造带 Q 值及其横向不均匀性[J]. 地球物理学报, **30**(1): 102-104.
- 唐若龙, 杨登文, 刘述前, 王中伟, 叶秀华, 陈忠禹. 1985. 攀西裂谷先张后压的双重构造特征[G]//张云湘主编. 中国攀西裂谷文集(1). 北京: 地质出版社: 71-82.
- 滕吉文. 1987. 攀枝花—西昌古裂谷与“活化”的地球物理特征[J]. 地球物理学报, **30**(6): 581-593.
- 汪良谋. 1982. 康滇活动构造带的形成机制及其强震活动[G]//中国地震学会地震地质专业委员会主编. 中国活动断裂. 北京: 地震出版社: 242-250.
- 王夫运, 段永红, 杨卓欣, 张成科, 赵金仁, 张建狮, 张先康, 刘启元, 朱艾斓, 徐锡伟, 刘宝峰. 2008. 川西盐源—马边地震带上地壳速度结构和活动断裂研究—高分辨率地震折射实验结果[J]. 中国科学: D辑, **38**(5): 611-621.
- 闻学泽. 2000. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征[J]. 地震地质, **22**(3): 239-249.
- 熊绍柏, 滕吉文, 尹周勋, 赖明惠, 黄一平. 1986. 攀西构造带南部地壳与上地幔结构的爆炸地震学研究[J]. 地球物理学报, **29**(3): 235-244.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 马文涛, 宋方敏, 于贵华. 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动式样及其动力来源[J]. 中国科学: D辑, **33**(增刊): 151-161.
- 易桂喜, 闻学泽, 范军, 王思维. 2004. 由地震活动参数分析安宁河—则木河断裂带的现今活动习性及地震危险性[J]. 地震学报, **26**(3): 294-303.
- 尹周勋, 滕吉文, 熊绍柏. 1987. 渡口及其邻近地区地壳浅层结构的研究[J]. 地球物理学报, **30**(2): 22-30.
- 尹周勋, 熊绍柏. 1992. 西昌—渡口—牟定地带二维地壳结构的爆炸地震研究[J]. 地球物理学报, **35**(4): 451-458.
- 袁学诚. 1989. 论康滇地轴的深部构造[J]. 地质学报, **63**(1): 1-13.
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场和活动地块[J]. 地学前缘, **9**(2): 430-440.
- 张培震, 邓启东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D辑, **33**(增刊): 12-20.
- 朱碚定, 李幼铭, 张立敏, 束沛鎰, 梁尚鸿. 1986. 川南、滇北地震台网区域壳幔介质分层结构的初步研究[J]. 地球物理学报, **29**(3): 245-253.
- Fuis G S, Okaya D A, Clayton R W, Lutter W J, Ryberg T, Brocher T M, Henyey T L, Benthien M L, Davis P M, Mori J, Catchings R D, tenBrink U S, Kohler M D, Klitgord K D, Bohannon R G. 1996. Images of crust beneath southern California will aid study of earthquakes and their effects[J]. *Eos Agu*, **77**(18): 173-176.
- Fuis G S, Ryberg T, Lutter W J, Ehlig P L. 2001. Seismic mapping of shallow fault zones in the San Gabriel Mountains from the Los Angeles region seismic experiment, Southern California[J]. *J Geophys Res*, **106** (B4): 6549-6568.
- Hole J A. 1992. Nonlinear high-resolution three-dimensional seismic travel time tomography[J]. *J Geophys Res*, **97**(B5): 6553-6562.
- Scheidegger A E, Willmore P L. 1957. The use of a least square method for the interpretation of data from seismic surveys[J]. *Geophysics*, **22**(1): 9-22.
- Vidale J E. 1990. Finite-difference calculation of travel times in three-dimensions[J]. *Geophysics*, **55**(5): 521-526.
- Yan Z M, Robert W C, Jason S. 2005. Seismic refraction evidence for steep faults cutting highly attenuated continental basement in the central Transverse ranges, California[J]. *Geophys J Int*, **160**(2): 651-666.