

张平川, 于常青, 瞿辰, 邱隆君, 李恒强. 2021. 基于地震探测的盐源盆地构造特征及动力学意义. 地震学报, 43(5): 569-583. doi: 10.11939/jass.20200119.
Zhang P C, Yu C Q, Qu C, Qiu L J, Li H Q. 2021. Structural characteristics of Yanyuan basin deduced from seismic survey and its dynamic implication. *Acta Seismologica Sinica*, 43(5): 569-583. doi: 10.11939/jass.20200119.

基于地震探测的盐源盆地构造 特征及动力学意义*

张平川^{1,2)} 于常青^{2), †} 瞿辰²⁾ 邱隆君^{1,2)} 李恒强^{1,2)}

1) 中国北京 100083 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院
2) 中国北京 100037 中国地质科学院地质研究所

摘要 基于覆盖盐源盆地的短周期天然地震台阵和布设的一条人工地震测线所获得的地震数据, 从中提取地震能量属性, 并通过地震层析成像获得该地区的浅部地震速度结构, 继而对短周期地震台阵一个月的噪声数据进行互相关得到经验格林函数, 再通过时频分析获得相速度频散曲线, 反演获得不同深度的 S 波速度分布. 研究结果显示, 盐源盆地地震特征主要分为三层: 浅部为低速新生代沉积地层, P 波速度为 1.0—2.1 km/s, 反射轴明显、连续性好, 反射能量强, S 波速度为中高南低, 南部低速体与盐源断裂走向一致, 新生代盆地整体呈南深北浅, 沉积发育和构造形态受盐源断裂控制; 中部为中低速三叠系地层, P 波速度为 3.5—4.5 km/s, 反射轴不连续, 反射能量较弱, S 波速度逐渐变大, 整体变化变小; 深部为高速古生代地层, 地震反射较为杂乱, 反射能量弱; 上地壳存在滑脱面, 该界面为沉积盖层与结晶基底的分界面, 且向浅部发育一系列断层, 其中金河—箐河断裂为盐源盆地与康滇地块的分界线, 这些断裂带也是盐源盆地地震频发的部位.

关键词 盐源盆地 地球物理特征 地质构造 反射地震 断裂性质
doi: 10.11939/jass.20200119 **中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A

Structural characteristics of Yanyuan basin deduced from seismic survey and its dynamic implication

Zhang Pingchuan^{1,2)} Yu Changqing^{2), †} Qu Chen²⁾ Qiu Longjun^{1,2)} Li Hengqiang^{1,2)}

1) School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: In this paper, an artificial seismic line and a short period natural seismic array covering Yanyuan basin are set up. The seismic energy attribute is extracted from the artificial seismic data, and the seismic velocity structure is obtained by seismic tomography. Meanwhile the S-wave velocity distribution at different depths is obtained by inverting the empirical Green's

* 基金项目 国家自然科学基金项目(41761134096)和国家重点研发计划(2016YFC0600306-5)联合资助。

收稿日期 2020-07-15 收到初稿, 2021-02-20 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: geoyucq@hotmail.com



functions retrieved from cross-correlation of the ambient noise data recorded by the short period seismic array. The results show that Yanyuan basin is mainly divided into three layers by seismic characteristics. The shallow layer is the Cenozoic sedimentary stratum with low P wave velocity ranging from 1.0 km/s to 2.1 km/s, and it is characterized by good continuity and strong reflection. The S wave velocity is low in the south and high in the middle of Yanyuan basin, and the trend of the low-velocity anomaly in the south is in agreement with the strike of Yanyuan fault. Cenozoic basin is thick in the south and thin in the north, where the sedimentary and structure are controlled by Yanyuan fault. The middle layer is medium-low P wave velocity ranging from 3.5 km/s to 4.5 km/s, and it is characterized by discontinuous reflection axis and weak reflection, which can be interpreted as Triassic strata. The S-velocity becomes higher gradually and the change becomes smaller in general. The deep layer is high velocity, characterized by chaotic seismic reflection and weak reflection energy, interpreted as Paleozoic strata. Furthermore, there is a detachment surface in the upper crust, which is the interface between sedimentary and basement. A series of faults are developed from the detachment to the surface, and these faults are also an earthquake-prone area in Yanyuan basin. One of the faults is Jinhe-Qinghe fault, which is the boundary fault between Yanyuan basin and Kangdian block.

Key words: Yanyuan basin; geophysical characteristic; geological structure; seismic reflection; fault characteristic

引言

川滇地块是青藏高原东缘挤出作用最明显的构造活动区之一,对于研究印度—欧亚板块碰撞作用和青藏高原东缘的动力学模式都有着重要意义(周友华,1986;曾融生等,1992;汪一鹏等,2003;徐锡伟等,2003).位于川滇地块中的盐源弧形构造与喜山期的青藏高原东缘的造山作用密切相关,区内盐源盆地发育的推覆构造和弧形走滑断裂反映了青藏高原东缘的构造旋转和变形作用(葛肖虹,1984;钟康惠等,2004;杨卓欣等,2011).由于盐源地区构造变形强烈,历史上曾多次发生破坏性地震,因此研究该地区的构造特征和地球动力学作用有助于探究区内的强震机制(程万正,杨永林,2002;牟雅元等,2004).盐源盆地推覆构造被认为与喜山期印度板块向欧亚板块俯冲的碰撞事件有关,而新生代盆地则是青藏高原侧向挤出的沉积响应(葛肖虹,1984;李勇等,2001;钟康惠等,2004).关于青藏高原侧向挤出的动力模式主要分为两种:其一为刚性块体挤出模式(Molnar, Tapponnier, 1977, 1978; Replumaz, Tapponnier, 2003; Schoenbohm *et al*, 2006; Yang *et al*, 2009),该模式认为青藏高原在陆-陆碰撞的持续挤压作用下,其物质向东南方向沿着深大断裂和缝合带以块体形式向外挤出;其二为下地壳流模式(Zhao, Yuen, 1987; Royden *et al*, 1997; Beaumont *et al*, 2004; Shapiro *et al*, 2004; 王椿镛等,2006; 韦伟等,2010),该模式认为陆-陆碰撞和挤压造成青藏高原下地壳存在低黏度层,该层在挤压作用下向四周流动,在此过程中,由于受到刚性的四川盆地的阻挡,一部分物质流向东南方向.随着地球物理研究的深入,越来越多的地球物理研究成果显示青藏高原下地壳存在低速带、高导层(孙洁等,2003;金胜等,2010;王琼,高原,2014;杨文采等,2015,2019a,2020),这表明地壳存在塑性熔融软化情况,暗示了下地壳管道流的存在.

盐源地区是否存在下地壳流至今还没有令人信服的证据,盐源地区的动力学背景对其

深部结构特征和演化的影响认识尚不清楚,因此关于盐源地区的深部地球物理特征的研究有助于认识其对应的动力学模式.盐源地区目前的地球物理工作较少,泸州—宁蒗段的大地电磁研究结果(李立,金国元,1987)表明,盐源地区上地壳存在低阻层,深度在10 km左右,厚度约5 km,上地幔存在低阻层,埋深在100 km左右.盐源—永善段的大地电磁研究结果表明,盐源地区上地壳存在低阻层,呈西倾向,埋深在10 km左右,厚度达10 km(Zhang *et al.*, 2015).盐源—马湖深地震探测剖面显示盐源地区浅部存在表层低速和深部高速的双层结构(杨卓欣等,2011).盐源地区的地壳横波速度剖面显示,上地壳存在低速体,厚约5 km(Bao *et al.*, 2015; 杨妍,2019).结合大地电磁测深揭示的壳内低阻层和地震剖面上低速体的地球物理特征,盐源地区很可能存在壳内流体.然而,上述研究由于天然地震台阵的间距较大,无法精确地刻画盐源盆地的结构特征,穿过盐源盆地的地震测线由于观测方法所限得到的地震剖面分辨率较低,盐源盆地的沉积盖层及其与深部基底的构造关系尚不清晰.鉴于此,本文布设了覆盖盐源全盆地的短周期天然台阵和一条穿过盐源盆地的人工地震测线,采集约30天的台阵数据和记录长度为6 s的人工反射地震数据,从背景噪声互相关函数中选取经验格林函数,经过反演得到盐源盆地的S波速度结果,对反射地震常规处理流程得到地震叠加偏移剖面,继而提取地震能量属性,再反演得到地震剖面浅部的速度结构,以期通过分析研究以上资料厘清盐源盆地新生代地层与古生代地层的构造演化关系,分析盐源断裂、金河—箐河断裂等主要断裂对盆地演化的控制作用,从而探讨盐源盆地地震活动与构造断裂的关系及其动力学意义.

1 地质背景

盐源盆地位于川滇地块的中部,北部为松潘—甘孜构造带,东部以小金河断裂为界与康滇地轴相邻,南部以金河—箐河断裂为界与丽江盆地相接(李勇等,2001;朱民等,2016;王正和等,2018).盐源盆地被认为是锦屏山逆冲推覆构造上的推覆构造体,夹持于青藏提斯构造域与扬子板块构造域之间(葛肖红,1984;廖忠礼等,2003;王夫运等,2008;杨卓欣等,2011).在地质构造上,盐源盆地属于盐源—丽江台缘拗陷,是扬子准地台西端与松潘—甘孜褶皱系的过渡带(唐若龙,1987;李生,2004).盆地及其周缘出露地层从古生界代至新生代皆有发育(图1),缺失侏罗系和白垩系.盆地内部主要出露古近系、新近系和第四系地层,其中:第四系以冲积、洪积相沉积为主,沉积厚度约为100 m;新近系昔格达组(N_{2x})为一套河湖沼泽相含煤碎屑岩沉积,厚度大于640 m,不整合于下伏地层红崖子组或三叠系、二叠系之上;古近系红崖子组(Eh)为一套山间构造盆地或山前拗陷的磨拉石建造,以紫色砾岩和灰紫色泥质粉砂岩为主,厚度大于960 m.中生界仅三叠系发育,三叠系在研究区出露最广,为一套海相—海陆交互相及陆相碎屑岩、碳酸盐岩沉积,其中:三叠系上统发育一套滨岸细粉砂岩—泥质岩沉积,三叠系中统为一套灰色白云质灰岩、紫色砂岩,三叠系下统为一套紫红色—灰绿色陆相—海陆交互相火山碎屑沉积建造(四川省地质矿产研究所专题研究组,1987;刘家铎,刘文周,1995;韦一等,2014).

区内上古生界较为发育,二叠系下统主要为灰岩和硅质结核灰岩,上统为峨眉山玄武岩及含煤沉积,玄武岩厚约2 800 m(王正和等,2018);石炭系主要为灰岩沉积;泥盆系下统主要为石英砂岩、细粉砂岩、泥质粉砂岩和黑色泥页岩,泥盆系中上统以碳酸盐沉积为主,岩性为灰岩和白云岩.下古生界主要分布于盆地东南缘和西南缘,志留系主要为硅质泥页岩、

泥质灰岩、砂泥岩、硅质岩等，奥陶系主要为粉砂碎屑岩、白云岩、灰岩，寒武系主要为细、粉砂碎屑岩。盐源地区属于川滇地区的地震多发区，区域内强震多分布在断裂带区域(图 2a)，且活动断层以正断层为主，反映了区域的伸展构造环境。盐源断裂带强震活动频繁，曾发生过 1467 年盐源 $M6.5$ ，1478 年盐源 $M6.0$ ，1976 年盐源 $M6.7$ ，1976 年盐源 $M6.4$ 地震，1978 年盐源 $M5.6$ ，2001 年宁蒗—盐源 $M5.8$ ，2003 年 8 月 21 日盐源 $M5.0$ ，2012 年盐源—宁蒗 $M5.7$ 等 $M5.0$ 以上地震(中国地震台网中心，2020)。

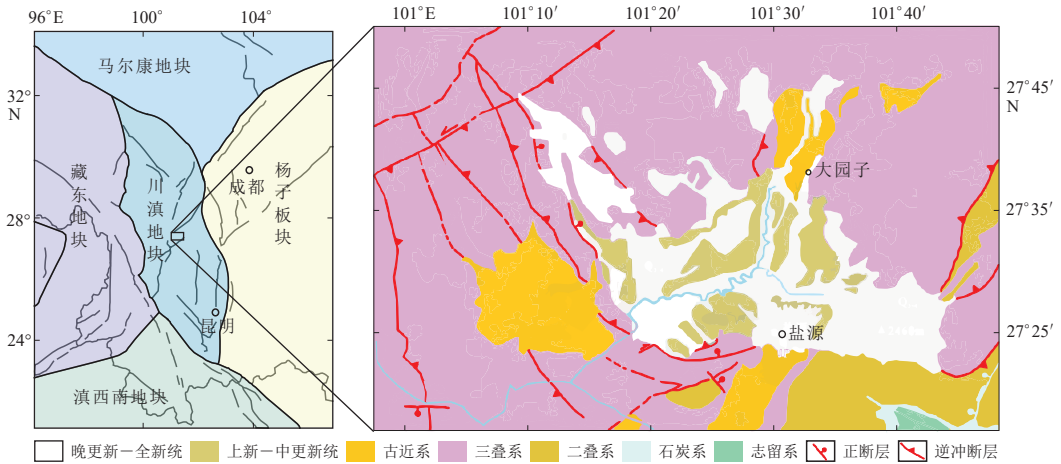


图 1 盐源盆地所处位置及其地质构造 [修改自卢海建等(2015)]

Fig. 1 Location of Yanyuan basin and its geological structure modified from Lu *et al* (2015)

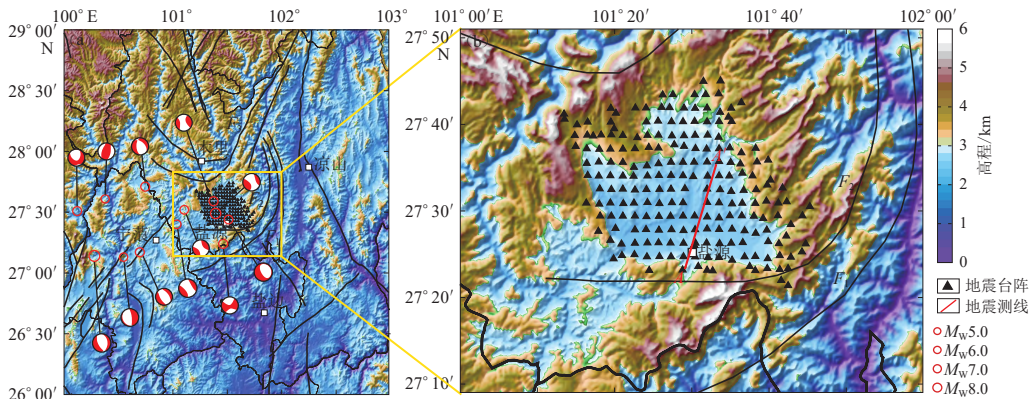


图 2 盐源地区强地震分布(a)及地震台阵与测线布设(b)

F_1 : 金河—箐河断裂; F_2 : 盐源断裂; F_3 : 小金河断裂

Fig. 2 Distribution of strong earthquakes (a) and location of seismic array and the seismic line (b) in Yanyuan area

F_1 : Jinhe-Jinghe fault; F_2 : Yanyuan fault; F_3 : Xiaojinhe fault

2 数据采集与处理

在中国地质调查项目“盐源盆地短周期天然地震采集实验”资助下，中国地质科学院地质研究所在盐源盆地布设了一条人工地震反射剖面和一个短周期天然地震台阵，台阵布局

如图 2b 所示, 地震剖面为北东向穿过盐源盆地的地震测线 AA' , 测点为 0 号点—1926 号点, 测线长 19.26 km. 短周期地震台阵范围约为 $50 \text{ km} \times 40 \text{ km}$, 台站间距约为 2.6 km, 布设 209 台轻便式宽频带地震仪进行为期一个月的观测, 分布范围 ($101^\circ 12' \text{E} - 101^\circ 45' \text{E}$, $27^\circ 21' \text{N} - 27^\circ 45' \text{N}$) 如图 2b 所示. 所使用的宽频带地震仪为 EPS-2-M6Q, 仪器频带为 0.2—150 Hz, 采样率为 200 Hz.

首先对各台站 Z 分量数据进行处理, 重采样到 10 Hz, 去线性、去趋势并进行 0.2—2 Hz 带通滤波后, 进行时间域归一化; 然后计算所有台站对之间一小时长度的互相关函数, 再对互相关函数进行归一化叠加处理, 得到所有台站对的互相关函数, 图 3a 为部分台站对的互相关结果, 基于此利用图像分析技术提取短周期面波群速度频散曲线(图 3c). 利用所得频散数据, 获得该区域的平均频散曲线, 进而获得该区域的敏感核测试结果, 如图 3b 所示, 由该图可知不同周期的频散数据对不同深度范围的 S 波速度均敏感, 对 5 km 以上的速度结构更为敏感, 因此选取 0—5 km 深度的 S 波速度结构进行反演. 基于独立周期射线追踪直接反演三维 S 波速度的成像方法, 同时反演所有的频散到时数据, 最终获得研究区域网格划分为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 、分辨率为 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 的 0—5 km 深度范围内的 S 波速度结构, 结果如图 4 所示.

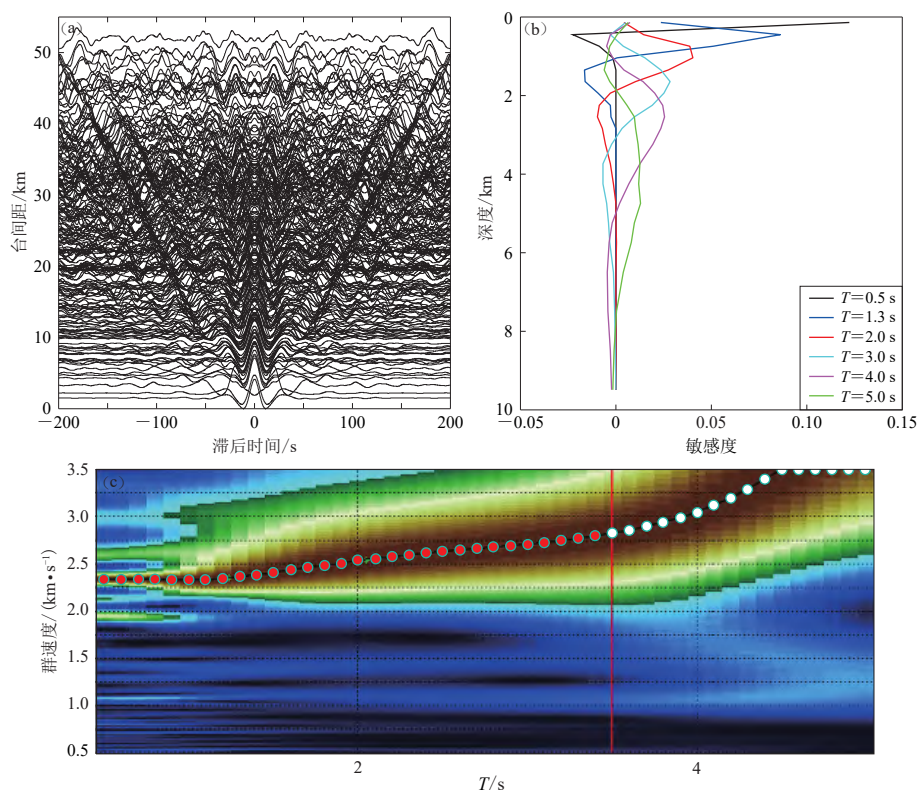


图 3 (a) 部分台站对的互相关波形(0.2—2 Hz 带通滤波); (b) 不同周期 T 的瑞雷波群速度对 S 波速度的敏感核; (c) 瑞雷波群速度频散曲线测量图, 红色圆点表示所提取的频散点

Fig. 3 (a) The cross-correlation seismograms between some stations (0.2—2 Hz); (b) Depth sensitivity kernels of Rayleigh wave group velocity to the S-wave velocity at different periods T ; (c) Rayleigh wave group velocity measurements from empirical Green's functions with red dots as the extracted dispersion points

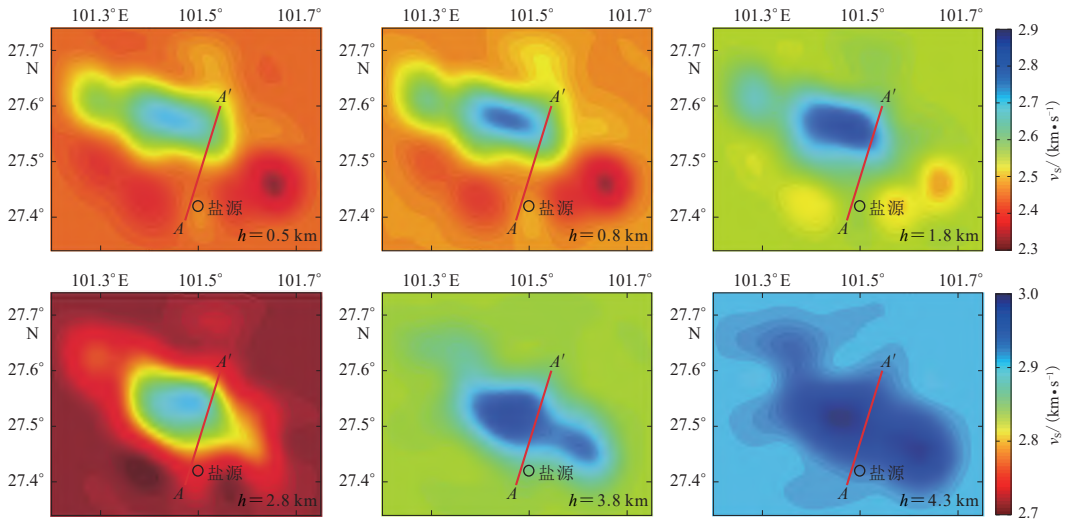


图 4 盐源盆地不同深度 h 下的短周期 S 波速度异常 (AA' 为地震测线)

Fig. 4 The short period S-wave velocity anomalies in Yanyuan basin at different depths h (AA' is the seismic line)

本次野外地震采集采用爆破震源, 地震仪器为 Aries 数字地震仪, 采样间隔为 1 ms, 记录长度为 6 s, 地震采集观测系统为道间距 20 m, 最小偏移距 10 m, 最大偏移距 4 790 m, 炮点距 60 m, 接收道 480 道, 满覆盖长度 16 km, 满覆盖 60 次. 在地震处理流程中, 野外静校正采用层析静校正方法, 去噪采用多域多方法高保真联合去噪技术以压制研究区的面波、折射波和随机干扰, 振幅补偿为球面扩散补偿和地表一致性补偿, 反褶积采用脉冲反褶积和预测反褶积的级联处理, 剩余静校正采用分频迭代的方式, 最终获得叠后偏移剖面, 如图 5 所示. 为分析盐源盆地中新生代的沉积特征, 利用已有钻井资料所揭示的含盐地层的地球物理特征, 本文利用地震属性技术, 对反射地震数据求取振幅包络, 获得地震能量剖面(图 6a), 同时利用地震小折射技术对浅部的地震数据进行反演, 得到 2.5 km 深度的地震反演速度剖面(图 6b).

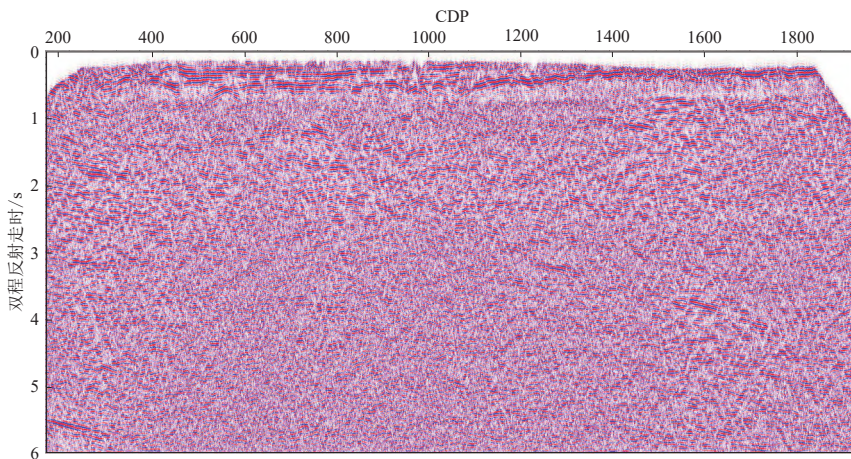


图 5 盐源盆地人工反射地震叠后偏移剖面 (AA' 线)

Fig. 5 The migrated seismic reflection profile AA' of the Yanyuan basin

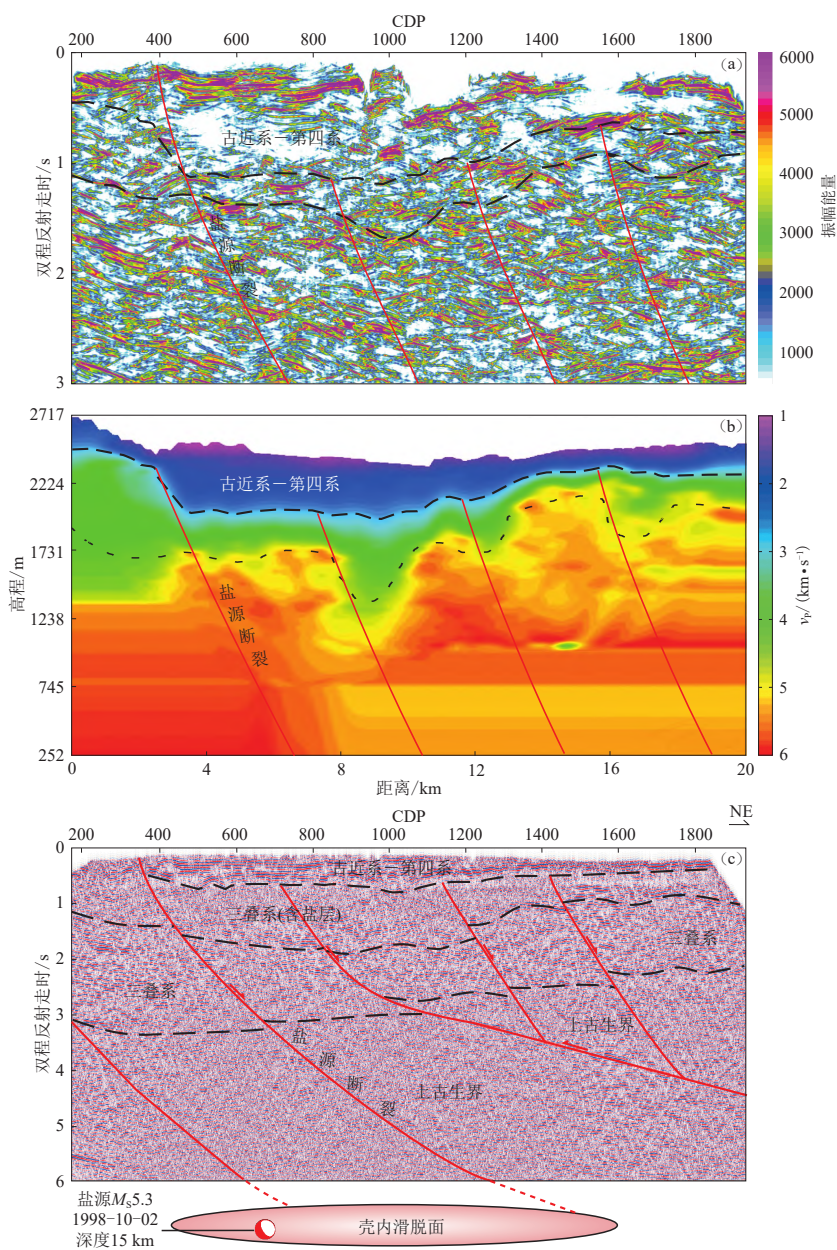


图 6 盐源盆地地震剖面处理与解释图

(a) 地震能量剖面图; (b) 地震反演所得 P 波速度结构图; (c) 地震解释剖面, 图中震源机制解引自 GCMT (2018)

Fig. 6 Seismic profile processing and interpretation for Yanyuan basin

(a) Seismic energy profile; (b) The seismic P-wave velocity structure profile by inversion;

(c) Interpretation profile where the focal mechanism solution after GCMT (2018)

3 地球物理特征及解释

如图 4 所示, 短周期地震 S 波速度异常分布图分别展示了 0.5, 0.8, 1.8, 2.8, 3.8 和 4.3 km 深度的 S 波速度异常分布情况. 可见: 盆地处于 0.5—0.8 km 深度范围内时, S 波速度异常形

态整体表现为中高南低, S 波速度处于 2.3—2.9 km/s 之间; 到 1.8 km 深度时, S 波速度整体明显增大, 为 2.5—2.9 km/s, 盆地中部存在一个 WNW 走向的高速异常体, 其宽约 12 km, 长约 30 km, 该高速体的南侧存在一个 NW-NE 走向的弧状低速体, 宽约 8 km, 长约 40 km, 该弧状低速体与盆地南缘的盐源断裂、金河—箜河断裂等的走向一致, 反映了新近纪以来盐源盆地的构造活动特征. 从 1.8 km 深度的速度异常范围可以看出盆地南部低速体宽度缩小至 5 km, 该区域为新近纪的沉积中心. 低速体北侧的高速体表明, 盐源盆地在该区域的新生代沉积较薄, 0.5 km 深度范围内已经以高速为主, 反映了该地区中生代沉积地层的抬升. 在 0.5—0.8 km 深度范围内, 随着深度的增加, 高速体的范围呈变宽的趋势, 结合南侧低速体逐渐变小的特征, 表征了新生代沉积南厚北薄的分布情况. 从浅部的 0.5 km 和 0.8 km 深度上看, S 波速度在 2.3—2.9 km/s 之间变化, 而到 1.8 km 深度时, 速度整体明显增大, 且变化范围缩小至 2.5—2.9 km/s, 表明盆地浅部速度差异较大, 这可能与新生代以来的构造活动相关, 而随着深度的加深, 盆地速度差异逐渐变小, 反映了盆地深部的岩性变化较小. 在 2.8 km 深度上, S 波速度异常分布异于浅部, 速度明显增大, 其变化范围缩小至 2.7—3.0 km/s, 南部低速体消失, 北部高速体范围增大, 从中部扩展至盐源县附近, 宽度约增至 16 km, 走向为 NW 向. 随着深度增大到 3.8 km, 速度逐渐增大, 其变化范围缩小至 2.8—3.0 km/s, 高速体中心朝 SE 向移动; 到 4.3 km 深度时, 速度整体变化变小, 缩小至 2.9—3.0 km/s, 表明深部古生代地层的速度变化小, 残余的高速体反映了深部古生代地层的抬升.

由图 6a 所示的地震能量剖面可以看出: 0—1 s 之间, 地震能量存在多个空白反射区, 浅部有可追踪的地震能量轴; 0.5—1.6 s 之间, 地震能量变强, 但存在一些空白反射区; 1.6—3.0 s 之间, 地震能量整体较强, 但反射轴不易追踪, 大致呈南倾特征. 从地震浅部反演速度剖面(图 6b)可以看出: 在埋深 100—600 m 之间, P 波速度从 1 km/s 逐渐增至 3 km/s; 在埋深 0.6—1 km 之间, P 波速度从 3 km/s 逐渐增至 5 km/s. 综合地震能量剖面和地震反射速度剖面, 从地震反射叠加剖面(图 5)可以看出, 研究区地震剖面反射特征大致分为三层, 其中浅部地震反射能量很强, 反射轴比较平缓, 最大走时约为 1.1 s. 地震速度从表层的 1 km/s, 随着深度加深而增大至 3 km/s, 厚度约 0.6 km. 地震剖面的浅部反射特征反映了新生代地层沉积特征, 即整体为南厚北薄的箕状构造, 与下覆三叠系、二叠系地层呈不整合接触关系, 不整合面的起伏特征与新生代沉积地层的起伏具有一定的相似性, 反映了新生代时期的挤压作用. 浅部存在多个反射能量空白区, 结合已知钻井资料(李勇等, 2001), 推测为岩盐的反射特征. 地震反射剖面(图 6c)上, 0.5—3.2 s 之间整体呈现为反射能量较强、反射轴短而不连续, 故推测为三叠系沉积地层, 且南北两侧厚度明显不同, 南侧较厚, 地震走时达 3.2 s, 北侧较薄, 地震走时为 2.7 s, 且存在逆冲推覆的构造差异. 反射能量剖面在 0.5—1.6 s 之间表现为反射能量较弱且不连续, 在速度剖面上有较好的对应关系, 平均速度在 4 km/s 左右, 故推测为三叠系含盐层沉积地层. 反射能量剖面上, 在 1—1.8 s 之间, 三叠系含盐层与下覆三叠系地层之间存在一个反射较弱、连续性差的反射界面, 该反射界面呈复向斜特征, 且被多组南倾断层切断, 这表明断裂发生在印支期之后. 第三层表现为整体能量较差, 反射杂乱, 推测为下古生界地层, 其中三叠系下覆不整合在二叠系地层之上. 古生界地层反射界面具有明显的南北向逆冲褶皱构造特征, 反映了盐源地区在喜山期川滇地块向东南逃逸的动力背景下形成的推覆构造特征. 在 CDP 350—450 之间, 在地震能量、速度和反射剖面上皆可辨识到一个南倾的断层, 该断层两侧的速度、能量和波形均有显著差异, 结合已有的地质

认识推测该断裂应是盐源断裂(图 2), 为控盆的边界断裂. 在 CDP 700—1 000 之间, 在地震能量、速度和反射剖面上皆可以看到一个逆断向斜构造, 该向斜单元的速度、能量和波形与其两侧呈显著差异, 明显具有北高南低的逆冲特征. 随着 CDP 号增大, 盆地逐渐向北, 在地震能量、速度和反射剖面上皆可看到地层逐渐抬升, 且出现多处错断, 呈逆冲叠瓦状特征.

4 讨论与结论

从上文对盐源地区的地球物理特征分析可知: 盐源盆地的古生代地层整体为南深北浅的复向斜构造特征, 且在南端有抬升的趋势, 被多个北倾的逆断裂切断; 向斜轴心在盐源县附近, 被盐源断裂切断, 这反映了古生代地层在西北侧挤压作用下遭受东南向的阻挡作用而形成逆断向斜的构造特征. 从地震剖面可以看出, 盐源断裂并非盐源地区古生代盆地的控盆断裂, 而是古生代盆地沉积后由于后期构造运动而产生的盆内断裂. 盐源地区古生代盆地东南侧的金河—箐河断裂为其边界断裂, 将其与东南侧的康滇古陆分开. 从早寒武世至早二叠世时期, 盐源盆地基本发育一套层序完整、厚度较大的海相沉积, 而金河—箐河断裂以东在古生代处于长期隆起环境, 地层发育不全. 盐源地区的二叠系峨眉玄武岩属于海相喷发的碱性玄武岩, 而金河—箐河断裂以东的玄武岩属于大陆裂谷型碱性到拉斑玄武岩(葛肖虹, 1984), 这表明金河—箐河断裂在古生代时期为正断层, 控制着盐源地区东南部古生代地层的沉积过程. 盐源盆地三叠系地层的整体构造特征与古生代地层类似, 具有南深北浅的复向斜构造特征, 且被多个北倾的逆断裂切断, 这表明盐源断裂也不是三叠系盆地的边界断裂. 据四川省地质矿产研究所专题研究组(1987)关于研究区的地质资料显示, 盐源地区在三叠系时期处于海相沉积环境, 东南侧的康滇古陆持续抬升, 这表明三叠系时期盐源盆地的沉积边界依然受金河—箐河断裂所控制. 印支期末期之前, 金河—箐河断裂以张性断裂为主, 控制着盐源盆地的沉降, 盐源地区出现大规模海侵, 并发育了巨厚的海相沉积(刘家铎, 刘文周, 1995). 而侏罗系和白垩系地层的缺失表明, 印支期之后盐源盆地地壳发生抬升, 金河—箐河断裂转变为挤压型断裂.

新生代时期, 盐源盆地在始新世沉积了一套巨厚的砾岩层, 即红崖子组地层, 该地层仅在盆地西缘和西南缘出露, 但已知钻井等资料(李勇等, 2001)显示盆地内部并未发现该套地层. 在盐源推覆面的金河—箐河断裂上采集到的片麻岩、千糜岩、糜棱岩、千糜状花岗斑岩的 K-Ar 平均年龄为 41.78 Ma, 幔源钾质煌斑岩的年龄为 28.7—40.8 Ma(钟康惠等, 2004), 金河—箐河断裂的韧性剪切带中糜棱岩的形变和变质特征表明该断裂经历过强烈的逆冲运动(向宏发等, 2002; 张丽敏等, 2014), 结合三叠系或泥盆系地层逆冲到红崖子组之上的构造现象, 我们推断在始新世—渐新世时期, 喜山运动的发生导致盐源地区处于挤压作用之下, 盆地的逆冲推覆构造运动开始进行. 新近系以来, 盐源盆地沉积了新近纪—第四纪河流相、湖泊相沉积, 为盐源组, 在地震资料中特征明显, 有连续的强反射轴, P 波速度约 2 km/s, 呈南厚北薄的楔状构造, 其中盆地沉积中心为盆地南侧. 新近系的沉降主要由盆地边缘盐源断裂控制, 盐源断裂表现为张性走滑断裂的特点, 从图 6 所示的地震剖面上可以看出盐源断裂切割了古生界地层, 而且深部两侧地层错位表现为逆断层, 浅部两侧沉积地层错位表现为正断层, 这反映了盐源断裂的性质由于构造活动从逆冲挤压断层转变为张性正断层. 从本文地震资料可以看出, 盐源新近系盆地并未出现明显的挤压变形, 盐源地区的地磁研究结果(卢海建等, 2015)也显示上新世—中更新世地层并未受到挤压变形作用, 这说明盐源古生代

和三叠系推覆体应该形成于上新世之前。大地电磁研究显示 15 km 深度左右存在低阻层(李立, 金国元, 1987; Zhang *et al.*, 2015), 一般来说, 壳内的低阻层可能是局部熔融, 或者幔源物质上涌, 但该深度的温度不足以产生局部熔融, 多项研究结果(谭捍东等, 2006; 魏文博等, 2009; Bai *et al.*, 2010; 杨文采等, 2017, 2019b)表明青藏高原东南缘存在下地壳流, 而研究区上地壳的低阻层可能是下地壳物质沿深大断裂上涌所致。另外, 壳内的低速体也暗示了下地壳的物质存在向上运移的现象(滕吉文等, 1994), 盐源地区地表出露的喜山期煌斑岩也佐证了深部物质上涌的现象(骆耀南, 俞如龙, 2002)。基于重力异常和航磁异常的结果表明盐源地区东西两侧的重磁异常差异较大, 并且整体处于异常梯度带上(刘薇等, 2018), 也处于地壳厚度和泊松比的梯度带上(董蕾等, 2020), 电性结构上反映出盐源地区地壳呈西倾特征(李立, 金国元, 1987), 这些地球物理特征均表明盐源地区呈向东南逆冲的构造形态, 反映了中新世—上新世期间青藏高原发生快速隆升和快速冷却事件(Burg, Chen, 1984; Hodges *et al.*, 1992), 青藏高原物质沿东侧向挤出, 遭遇扬子板块西缘的阻拦而形成东南向的构造带, 导致盐源地区的沉积盖层发生滑脱褶皱以及推覆事件, 使得控制着川滇块体北侧边界的鲜水河断裂延伸至控制着盐源盆地构造形态的小金河断裂和星河—箐河断裂时, 断裂走向也从东南向转变为北东向。

盆地内发育的一系列北倾逆冲断层可能源自沉积盖层与基底之间的滑脱面(如图 6c), 而星河—箐河断裂作为控制盐源推覆体的构造边界断裂, 可能源自地壳内部的拆离层, 大地电磁研究结果显示星河—箐河断裂西侧下地壳存在高导层(李立, 金国元, 1987; Zhang *et al.*, 2015), 且呈西倾, 地震 S 波速度剖面(Bao *et al.*, 2015; 杨妍, 2019)也反映盐源地区存在 S 波低速体, 且呈西倾, 断裂西侧整体构造表现为星河—箐河逆冲断裂的上盘。上述地壳地球物理特征表明星河—箐河断裂属于深大断裂, 控制着盐源盆地地区和其右侧康滇古陆的地壳构造形态。而盐源断裂作为盐源推覆构造活动形成的逆冲断层, 切割了盐源盆地的沉积盖层, 其产状北倾, 在深处逐渐变缓, 并交会于沉积盖层与结晶基底的滑脱面。在喜马拉雅—青藏高原运动之后盐源断裂的性质也多次发生变化(张岳桥, 李海龙, 2016), 主要以正断层为主, 控制了新生代盐源盆地的发育和构造形态。盐源断裂下方 15 km 深度处于 1998 年 10 月 2 日发生 $M_s 5.3$ 地震, 其震源机制解(图 6c)显示为正断层。盐源地区地震频发的主要深部动力是在青藏高原侧向挤出作用下, 沉积盖层沿滑脱面与下伏结晶基底发生的解耦运动, 由于东侧刚性的康滇地块阻挡, 下地壳存在的塑性软弱层积累着应力和应变能, 而盐源地区的应力作用很可能发生在更为脆性的上地壳, 滑脱面正是释放能量的地方, 积累的能量也可以由滑脱面传递给切割沉积盖层的断裂, 而这正是盐源地区的断裂经常诱发强震的原因所在。

在国家重点研发计划项目的资助下, 本文完成了短周期地震台阵和人工反射地震剖面工作, 对盐源盆地的野外数据采集处理后, 得到了 0.5—4.3 km 深度的 S 波速度异常分布图、地震速度剖面、地震能量剖面和地震反射剖面。经过分析讨论研究区的地震反射、能量和速度特征, 本文得出以下结论:

- 1) 盐源盆地新生代地层连续性好、反射强, 地震双程走时最大为 1 100 ms, 速度为 1—3 km/s, 呈南厚北薄的楔状沉积分布特征; 三叠系地层具有反射能量较强、反射轴短的特征, 地震双程走时为 600—3 200 ms 时, 速度处于 3—5 km/s 之间, 南部较厚; 古生界地层地震能量较差, 反射杂乱。

2) 盐源盆地具有复向斜的构造特征, 并发育有逆冲推覆构造, 新生代盆地、三叠系盆地和古生代盆地的沉积有明显差异, 青藏运动对盆地不同时期的沉积构造进行了改造. 盐源断裂是新生代盐源盆地南缘的控盆断裂, 控制着盐源盆地古近系以来的沉积和构造形态.

3) 盐源盆地上地壳 15 km 深度处的地震震源机制解显示该盆地目前以拉张性断层为主, 结合已有的地球物理认识, 该深度存在沉积盖层与结晶基底之间的滑脱面. 塑性的下地壳积累着喜山运动的应力能量, 而从滑脱面向上发育的断裂通过地震释放应力能量, 期间也改变了盆地的构造特征.

本文讨论了盐源盆地速度分布和反射地震特征, 研究了盆地构造和相关断裂特征及其动力学意义, 并探讨了盆地强震与断裂的关系. 由于本研究仅限于地震学方法, 对于盆地地壳内存在流体尚无充足的证据, 期待下一步开展大地电磁等地球物理工作更好地分析研究区地壳结构与强震关系.

参 考 文 献

- 程万正, 杨永林. 2002. 川滇地块边界构造带形变速率变化与成组强震[J]. 大地测量与地球动力学, 22(4): 21-25.
- Cheng W Z, Yang Y L. 2002. Deformation rate changes of tectonic belts along boundaries of Yunnan-Sichuan block and their relation to grouped strong earthquakes[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 22(4): 21-25 (in Chinese).
- 董蕾, 沈旭章, 钱银苹. 2020. 青藏高原东南缘 Moho 面速度密度跃变研究[J]. 地球物理学报, 63(3): 915-927.
- Dong L, Shen X Z, Qian Y P. 2020. Study on velocity and density contrasts across the Moho in the southeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 915-927 (in Chinese).
- 葛肖虹. 1984. 川西盐源推覆构造的探讨[J]. 长春地质学院学报, (1): 36-43.
- Ge X H. 1984. A discussion on nappe structure in Yanyuan, west Sichuan[J]. *Journal of Changchun College of Geology*, (1): 36-43 (in Chinese).
- 金胜, 魏文博, 汪硕, 叶高峰, 邓明, 谭捍东. 2010. 青藏高原地壳高导层的成因及动力学意义探讨: 大地电磁探测提供的证据[J]. 地球物理学报, 53(10): 2376-2385.
- Jin S, Wei W B, Wang S, Ye G F, Deng M, Tan H D. 2010. Discussion of the formation and dynamic signification of the high conductive layer in Tibetan crust[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(10): 2376-2385 (in Chinese).
- 李立, 金国元. 1987. 攀西裂谷带及龙门山断裂带地壳上地幔的大地电磁测深研究[J]. 物探与化探, 11(3): 161-169.
- Li L, Jin G Y. 1987. Telluric electromagnetic sounding study of crust and upper mantle in the Panxi "rift zone" and the Longmenshan faulted zone[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 11(3): 161-169 (in Chinese).
- 李生. 2004. 四川锦屏山地区推覆构造带特征及其研究意义[J]. 沉积与特提斯地质, 24(1): 70-77.
- Li S. 2004. Nappe structures in the Jinqingshan area, Sichuan and their geological implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(1): 70-77 (in Chinese).
- 李勇, 侯中健, 司光影, 周荣军, 梁兴中. 2001. 青藏高原东南缘晚第三纪盐源构造逸出盆地的沉积特征与构造控制[J]. 矿物岩石, 21(3): 34-43.
- Li Y, Hou Z J, Si G Y, Zhou R J, Liang X Z. 2001. Sedimentary characteristics and tectonic controls in Neogene Yanyuan tectonic escape basin in southeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21(3): 34-43 (in Chinese).
- 廖忠礼, 邓永福, 廖光宇. 2003. 四川锦屏山地区新生代冲断作用[J]. 大地构造与成矿学, 27(2): 152-159.
- Liao Z L, Deng Y F, Liao G Y. 2003. Formation and evolution of Mesozoic thrust fold belt in Jinping area, Sichuan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2): 152-159 (in Chinese).
- 刘家铎, 刘文周. 1995. 盐源盆地演化及早三叠世青田堡组沉积环境[J]. 成都理工学院学报, 22(3): 70-74.
- Liu J D, Liu W Z. 1995. The evolution of Yanyuan basin and the sedimentary environment of the Early Triassic Qingtianbao group[J]. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 22(3): 70-74 (in Chinese).
- 刘薇, 邵昌盛, 李大虎, 顾勤平. 2018. 利用重力、航磁资料研究木里—盐源弧形构造带及邻区的深部孕震环境[J]. 成都理

工大学学报(自然科学版), 45(2): 250-256.

- Liu W, Shao C S, Li D H, Gu Q P. 2018. Application of gravity and aeromagnetic data to the study of deep seismogenic environment of the Muli-Yanyuan arc structure belt and its adjacent area in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 45(2): 250-256 (in Chinese).
- 卢海建, 王二七, 李仕虎, 李海兵. 2015. 青藏高原东南缘构造旋转变形分析: 以四川盐源盆地古地磁研究为例[J]. *中国地质*, 42(5): 1188-1201.
- Lu H J, Wang E Q, Li S H, Li H B. 2015. Rotational deformation of the southeastern margin of Tibet: A paleomagnetic study of the Yanyuan basin, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 42(5): 1188-1201 (in Chinese).
- 骆耀南, 俞如龙. 2002. 西南三江地区造山演化过程及成矿时空分布[J]. *地球学报*, 23(5): 417-422.
- Luo Y N, Yu R L. 2002. Orogenic evolution and Metallogenic time-space distribution in Jinshajiang-Lancangjiang-Nujiang region, Southwest China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(5): 417-422 (in Chinese).
- 牟雅元, 代宽宏, 张振勋, 邱发青, 吴今生, 胡德军, 王松, 代放, 刘德安, 胡方良. 2004. 2003年8月21日盐源5.0级地震的预测与分析[J]. *国际地震动态*, (2): 9-13.
- Mou Y Y, Dai K H, Zhang Z X, Qiu F Q, Wu J S, Hu D J, Wang S, Dai F, Liu D A, Hu F L. 2004. Prediction of the Yanyuan $M_{S5.0}$ earthquake on Aug. 21, 2003 and the relevant analysis[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (3): 9-13 (in Chinese).
- 四川省地质矿产研究所专题研究组. 1987. 盐源—丽江地区三叠纪地层及沉积相[M]. 北京: 地质出版社: 107-116.
- Special Research Group of Sichuan Institute of Geology and Mineral Resources. 1987. *The Triassic Strata and Sedimentary Facies in Yanyuan-Lijiang District*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 107-116 (in Chinese).
- 孙洁, 晋光文, 白登海, 王立凤. 2003. 青藏高原东缘地壳、上地幔电性结构探测及其构造意义[J]. *中国科学: D辑*, 33(增刊1): 173-180.
- Sun J, Jin G W, Bai D H, Wang L F. 2003. Sounding of electrical structure of the crust and upper mantle along the eastern border of Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic significance[J]. *Science in China: Series D*, 46(2): 243-253.
- 谭捍东, 姜枚, 吴良士, 魏文博. 2006. 青藏高原电性结构及其对岩石圈研究的意义[J]. *中国地质*, 33(4): 906-911.
- Tan H D, Jiang M, Wu L S, Wei W B. 2006. Electrical conductivity structure of the Qinghai-Tibet Plateau and its significance for the study of the lithosphere[J]. *Geology in China*, 33(4): 906-911 (in Chinese).
- 唐若龙. 1987. 木里—盐源推覆构造特征与金铜、铅锌的成矿关系[J]. *四川地质学报*, 7(2): 3-9.
- Tang R L. 1987. Relationship between the characteristics of Muli-Yanyuan nappe structure and the mineralization of gold, copper, lead and zinc[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 7(2): 3-9 (in Chinese).
- 滕吉文, 尹周勋, 刘宏兵, 张中杰, 胡家富, 孙克忠, 魏计春. 1994. 青藏高原岩石层三维和二维结构与大陆动力学[J]. *地球物理学报*, 37(增刊2): 117-130.
- Teng J W, Yin Z X, Liu H B, Zhang Z J, Hu J F, Sun K Z, Wei J C. 1994. The 2D and 3D lithosphere structure and continental dynamics of Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 37(S2): 117-130 (in Chinese).
- 王椿镛, 吴建平, 楼海, 常利军, 苏伟. 2006. 青藏高原东部壳幔速度结构和地幔变形场的研究[J]. *地学前缘*, 13(5): 349-359.
- Wang C Y, Wu J P, Lou H, Chang L J, Su W. 2006. Study of crustal and upper mantle's structure and mantle deformation field beneath the eastern Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(5): 349-359 (in Chinese).
- 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.
- Wang F Y, Duan Y H, Yang Z Y, Zhang C K, Zhao J R, Zhang J S, Zhang X K, Liu Q Y, Zhu A L, Xu X W, Liu B F. 2008. Velocity structure and active fault of Yanyuan-Mabian seismic zone: The result of high-resolution seismic refraction experiment[J]. *Science in China: Series D*, 51(9): 1284-1296.
- 王琼, 高原. 2014. 青藏高原东南缘背景噪声的瑞利波相速度层析成像及强震活动[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(11): 2440-2450.
- Wang Q, Gao Y. 2014. Rayleigh wave phase velocity tomography and strong earthquake activity on the southeastern front of the Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 57(10): 2532-2542.

- 汪一鹏, 沈军, 王琪, 熊熊. 2003. 川滇块体的侧向挤出问题[J]. 地学前缘, **10**(增刊1): 188–192.
- Wang Y P, Shen J, Wang Q, Xiong X. 2003. On the lateral extrusion of Sichuan-Yunnan block (Chuan-Dian block)[J]. *Earth Science Frontiers*, **10**(S1): 188–192 (in Chinese).
- 王正和, 邓敏, 程锦翔, 张海全. 2018. 康滇古陆西侧断裂及岩浆活动对油气保存条件的影响: 以盐源盆地为例[J]. 地球科学, **43**(10): 3616–3624.
- Wang Z H, Deng M, Cheng J X, Zhang H Q. 2018. Influence of fault and magmatism on oil and gas preservation condition, to the west of Kangdian ancient continent: Taking Yanyuan basin as an example[J]. *Earth Science*, **43**(10): 3616–3624 (in Chinese).
- 韦伟, 孙若昧, 石耀霖. 2010. 青藏高原东南缘地震层析成像及汶川地震成因探讨[J]. 中国科学: 地球科学, **40**(7): 831–839.
- Wei W, Sun R M, Shi Y L. 2010. P-wave tomographic images beneath southeastern Tibet: Investigating the mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Science China Earth Sciences*, **53**(9): 1252–1259.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 邓明, 景建恩, Martyn U, Alan J G. 2009. 藏南岩石圈导电性结构与流变性: 超宽频带大地电磁测深研究结果[J]. 中国科学: D辑, **39**(11): 1591–1606.
- Wei W B, Jin S, Ye G F, Deng M, Jing J E, Martyn U, Alan J G. 2010. Conductivity structure and rheological property of lithosphere in southern Tibet inferred from super-broadband magnetotelluric sounding[J]. *Science in China: Series D*, **53**(2): 189–202.
- 韦一, 张宗言, 何卫红, 吴年文, 杨兵. 2014. 上扬子地区中生代沉积盆地演化[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, **39**(8): 1065–1078.
- Wei Y, Zhang Z Y, He W H, Wu N W, Yang B. 2014. Evolution of sedimentary basins in the Upper Yangtze during Mesozoic[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, **39**(8): 1065–1078 (in Chinese).
- 向宏发, 徐锡伟, 魏顺民, 张晚霞, 李洪武, 于贵华. 2002. 丽江—小金河断裂第四纪以来的左旋逆推运动及其构造地质意义: 陆内活动地块横向构造的屏蔽作用[J]. 地震地质, **24**(2): 188–198.
- Xiang H F, Xu X W, Guo S M, Zhang W X, Li H W, Yu G H. 2002. Sinistral thrusting along the Lijiang-Xiaojinhe fault since Quaternary and its geologic-tectonic significance: Shielding effect of transverse structure of intracontinental active block[J]. *Seismology and Geology*, **24**(2): 188–198 (in Chinese).
- 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样式及其动力来源[J]. 中国科学: D辑, **33**(增刊1): 151–162.
- Xu X W, We X Z, Zheng R Z, Ma W T, Song F M, Yu G H. 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China[J]. *Science in China: Series D*, **46**(2): 210–226.
- 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 2015. 青藏高原地壳的三维密度结构和物质运动[J]. 地球物理学报, **58**(11): 4223–4234.
- Yang W C, Hou Z Z, Yu C Q. 2015. Three-dimensional density structure of the Tibetan Plateau and crustal mass movement[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(11): 4223–4234 (in Chinese).
- 杨文采, 侯遵泽, 徐义贤, 颜萍. 2017. 青藏高原下地壳热变形和管道流研究[J]. 地质论评, **63**(5): 1141–1152.
- Yang W C, Hou Z Z, Xu Y X, Yan P. 2017. A study on thermal deformation and lower crust channel flows in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Geological Review*, **63**(5): 1141–1152 (in Chinese).
- 杨文采, 瞿辰, 任浩然, 黄联捷, 胥颐, 于常青, 刘晓宇. 2019a. 青藏高原软流圈与特提斯洋板块俯冲[J]. 地质论评, **65**(3): 521–532.
- Yang W C, Qu C, Ren H R, Huang L J, Xu Y, Yu C Q, Liu X Y. 2019a. The asthenosphere of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and subduction of the Tethys Ocean[J]. *Geological Review*, **65**(3): 521–532 (in Chinese).
- 杨文采, 瞿辰, 任浩然, 黄联捷, 胥颐, 于常青. 2019b. 青藏高原地壳地震纵波速度的层析成像[J]. 地质论评, **65**(1): 2–14.
- Yang W C, Qu C, Ren H R, Huang L J, Xu Y, Yu C Q. 2019b. Crustal P-wave seismic tomography of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau[J]. *Geological Review*, **65**(1): 2–14 (in Chinese).
- 杨文采, 金胜, 张罗磊, 瞿辰, 胡祥云, 魏文博, 于常青, 于鹏. 2020. 青藏高原岩石圈三维电性结构[J]. 地球物理学报, **63**(3): 817–827.
- Yang W C, Jin S, Zhang L L, Qu C, Hu X Y, Wei W B, Yu C Q, Yu P. 2020. The three-dimensional resistivity structures of

- the lithosphere beneath the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **63**(3): 817–827 (in Chinese).
- 杨妍. 2019. 川滇地区地壳速度结构及方位各向异性的联合反演研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学: 21–24.
- Yang Y. 2019. *Joint Inversion for Crustal Velocity Structure and Azimuthal Anisotropy: Application to the Sichuan-Yunnan Region, SW China*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China: 21–24 (in Chinese).
- 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[J]. *地震学报*, **33**(4): 431–442.
- Yang Z X, Wang F Y, Duan Y H, Zhang C K, Zhao J R, Zhang J S, Liu B F. 2011. Basement structure of southeastern boundary region of Sichuan-Yunnan active block: Analysis result of Yanyuan-Xichang-Zhaojue-Mahu deep seismic sounding profile[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(4): 431–442 (in Chinese).
- 曾融生, 朱介寿, 周兵, 丁志峰, 何正勤, 朱露培, 骆循, 孙为国. 1992. 青藏高原及其东部邻区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型[J]. *地震学报*, **11**(增刊1): 523–533.
- Zeng R S, Zhu J S, Zhou B, Ding Z F, He Z Q, Zhu L P, Luo X, Sun W G. 1992. Three dimensional seismic wave velocity structure and continental collision model in Qinghai-Tibet Plateau and its eastern neighbor area[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **11**(S1): 523–533 (in Chinese).
- 张丽敏, 张志斌, 崔文玲. 2014. 川西盐源两个碳酸岩杂岩体的厘定及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, **38**(1): 131–139.
- Zhang L M, Zhang Z B, Cui W L. 2014. Discovery of two carbonatite intrusive complexes in Yanyuan area of western Sichuan and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, **38**(1): 131–139 (in Chinese).
- 张岳桥, 李海龙. 2016. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件与挤出造山构造体系[J]. *中国地质*, **43**(6): 1829–1852.
- Zhang Y Q, Li H L. 2016. Late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau and extrusion-related orogenic system[J]. *Geology in China*, **43**(6): 1829–1852 (in Chinese).
- 钟康惠, 刘肇昌, 施央申, 李凡友, 舒良树. 2004. 盐源—丽江构造带是新生代陆内造山带[J]. *地质学报*, **78**(1): 36–43.
- Zhong K H, Liu Z C, Shi Y S, Li F Y, Shu L S. 2004. Yanyuan-Lijiang tectonic zone: A Cenozoic intracontinental orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, **78**(1): 36–43 (in Chinese).
- 中国地震台网中心. 2020. 历史查询[EB/OL]. [2020-12-12]. <http://www.ceic.ac.cn/history>.
- China Earthquake Networks Center. 2020. History query[EB/OL]. [2020-12-12]. <http://www.ceic.ac.cn/history> (in Chinese).
- 朱民, 陈汉林, 周静, 杨树锋. 2016. 上扬子西南盐源盆地早三叠世物源体系及构造意义[J]. *地球科学*, **41**(8): 1309–1321.
- Zhu M, Chen H L, Zhou J, Yang S F. 2016. Provenance of Early Triassic in Yanyuan basin, upper Yangtze and its implication for the tectonic evolution[J]. *Earth Science*, **41**(8): 1309–1321 (in Chinese).
- 周友华. 1986. 我国川滇菱形地块运动的探讨[J]. *地震研究*, **9**(1): 89–99.
- Zhou Y H. 1986. Discussion on the movement of Sichuan-Yunnan rhombus block in China[J]. *Journal of Seismological Research*, **9**(1): 89–99 (in Chinese).
- Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, Ma X B, Teng J W, Kong X R, Sun Y, Sun J, Wang L F, Jiang C S, Zhao C P, Xiao P F, Liu M. 2010. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nat Geosci*, **3**(5): 358–362.
- Bao X W, Sun X X, Xu M J, Eaton D W, Song X D, Wang L S, Ding Z F, Mi N, Li H, Yu D Y, Huang Z C, Wang P. 2015. Two crustal low-velocity channels beneath SE Tibet revealed by joint inversion of Rayleigh wave dispersion and receiver functions[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **415**: 16–24.
- Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, Medvedev S. 2004. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **109**(B6): B06406.
- Burg J P, Chen G M. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China[J]. *Nature*, **311**(5983): 219–223.
- GCMT. 2018. Global CMT catalog search[EB/OL]. [2018-12-04]. <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Hodges K V, Parrish R R, Housh T B, Lux D R, Burchfiel B C, Royden L H, Chen Z. 1992. Simultaneous Miocene extension and shortening in the Himalayan orogen[J]. *Science*, **258**(5087): 1466–1470.
- Molnar P, Tappanier P. 1977. Relation of the tectonics of eastern China to the India-Eurasia collision: Application of slip-line

- field theory to large-scale continental tectonics[J]. *Geology*, **5**(4): 212–216.
- Molnar P, Tapponnier P. 1978. Active tectonics of Tibet[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **83**(B11): 5361–5375.
- Replumaz A, Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **108**(B6): 2285.
- Royden L H, Burchfiel B C, King R W, Wang E, Chen Z L, Shen F, Liu Y P. 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet[J]. *Science*, **276**(5313): 788–790.
- Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L Z. 2006. Propagation of surface uplift, lower crustal flow, and Cenozoic tectonics of the southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. *Geology*, **34**(10): 813–816.
- Shapiro N M, Ritzwoller M H, Molnar P, Levin V. 2004. Thinning and flow of Tibetan crust constrained by seismic anisotropy[J]. *Science*, **305**(5681): 233–236.
- Yang L, Liu H B, Zhao J M. 2009. Characteristic of crustal structure beneath the rifts in southern Tibetan Plateau[J]. *Earthquake Science*, **22**(4): 373–377.
- Zhang G, Wang X B, Fang H, Guo Z M, Zhang Z B, Luo W, Cai X L, Li J, Li Z, Wu X. 2015. Crust and upper mantle electrical resistivity structure in the Panxi region of the eastern Tibetan Plateau and its significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, **89**(2): 531–541.
- Zhao W L, Yuen D A. 1987. Injection of Indian crust into Tibetan lower crust: A temperature-dependent viscous model[J]. *Tectonics*, **6**(4): 505–514.



谢江涛 四川省地震局工程师。2009年成都理工大学信息工程学院信息工程专业毕业，获工学学士学位；2012年成都理工大学地球物理学院应用地球物理专业毕业，获工学硕士学位。曾从事数字地震观测、地震预警技术及应急流动地震观测研究，现主要从事数字地震观测和壳幔速度结构反演的研究。



李霞 青海省地震局工程师。2011年长安大学地质工程与测绘学院勘查技术与工程专业毕业，获工学学士学位；2014年长安大学地球探测与信息技术专业毕业，获工学硕士学位。现主要从事地震电磁学研究。



唐兰兰 中国地震局厦门海洋地震研究所高级工程师。2003年新疆大学测绘工程专业毕业，获工学学士学位；2018年中国科学技术大学地球空学院地球物理学专业毕业，获理学博士学位。曾从事诱发地震检测、诱发机制以及震源分类等研究，现主要从事海洋地震方面的研究。



马永 天津市地震局工程师，张道口地震台副台长。2011年太原科技大学应用物理专业毕业，获工学学士学位；2019年中国科学技术大学地球与空间科学学院地球物理学专业毕业，硕士研究生学历。现主要从事地震前兆观测、地震活动特征及地壳速度结构等方面的研究。



张平川 中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院地球物理学专业在读博士研究生。2007年中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院地球物理专业毕业，获理学学士学位；2015年昆明理工大学国土资源学院地质工程专业毕业，获工学硕士学位。曾从事油气勘探和重磁电震勘探工作，现主要从事地震构造识别和地球物理应用研究。



刘江 四川省地震局工程师。2006年西安交通大学信息工程专业毕业，获工学学士学位；2009年西安交通大学信息与通信工程专业毕业，获工学硕士学位。现主要从事电离层等离子体数据解算分析工作。四川省地震学会会员。