

# 二维初至波层析成像揭示的 兰坪盆地—扬子西缘浅层地壳结构

王 冠<sup>1)</sup>, 熊小松<sup>2)\*</sup>, 卢占武<sup>1)</sup>, 李秋生<sup>1)</sup>, 吴国炜<sup>1)</sup>, 张新彦<sup>1)</sup>

1) 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100094;

2) 自然资源部深地科学与探测技术实验室, 中国地质科学院, 北京 100094

**摘要:** 兰坪盆地—扬子西缘位于青藏高原东南缘, 在地质构造上属特提斯-喜马拉雅强烈挤压、碰撞造山带的东部, 兼跨华南板块与古冈瓦纳板块两大构造单元。其浅层地壳是记录地壳形变、岩浆作用与成矿作用的重要载体。本文利用兰坪盆地—扬子西缘 220 km 长的深反射地震剖面的初至波(Pg 震相)数据, 通过层析成像反演方法, 获得了测线下方 4 km 以浅的上地壳浅层 P 波速度结构。成像结果显示, 兰坪盆地沉积厚度从西到东逐渐减薄, 扬子块体西缘东部表现出“两侧厚中间薄”的特点; 兰坪盆地内有多组逆冲断裂, 金沙江断裂与程海断裂近乎垂直; 金顶铅锌矿的形成可能与底部热隆有关, 北衙金矿下方结晶基底向上突起, 推测由岩浆上涌所致。

**关键词:** 兰坪盆地; 扬子块体西缘; 层析成像; 上地壳速度结构

中图分类号: P631.8 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.040101

## Shallow Crustal Velocity Structure of the Lanping Basin–Western Margin of the Yangtze Block Revealed by 2D First-arrival Seismic Tomography

WANG Guan<sup>1)</sup>, XIONG Xiaosong<sup>2)\*</sup>, LU Zhanwu<sup>1)</sup>,  
LI Qiusheng<sup>1)</sup>, WU Guowei<sup>1)</sup>, ZHANG Xinyan<sup>1)</sup>

1) SinoProbe Laboratory, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100094;

2) SinoProbe Laboratory, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100094

**Abstract:** The Lanping Basin–western margin of the Yangtze block, located in the southeastern margin of the Tibetan Plateau, geotectonically belongs to the eastern part of the Tibetan-Himalayan collision orogenic belt. It spans two major tectonic units (the South China block and the Gondwana). The shallow crust is an important carrier for recording crustal deformation, magmatism and mineralization.. In this study, we obtain the shallow P-wave velocity structure of the upper crust by using the first-arrivals (Pg phase) from a 220-km-long deep-reflection seismic profile. The result shows that the sedimentary thickness of the Lanping Basin gradually decreases from west to east, and the eastern part of the western margin of the Yangtze block exhibits characteristics of “thick on both sides and thin in the middle”. Several thrust faults were developed in the Lanping Basin. The Jinshajiang and Chenghai faults are steep in the shallow upper crust. Formation of the Jinding Pb-Zn deposit may be associated with the deep thermal. The crystalline basement beneath the Beiya Au deposit bulges upward, which is speculated to be caused by the upwelling magma.

**Key words:** Lanping Basin; western margin of the Yangtze block; seismic tomography; shallow crustal velocity structure

本文由国家重点研发计划(编号: 2016YFC0600302)、国家自然科学基金项目(编号: 42374119; 42261144669; 42274134; C2330)和中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: S2304; JKYZN202311)联合资助。

收稿日期: 2024-01-02; 改回日期: 2024-03-22; 网络首发日期: 2024-04-23。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 王冠, 男, 1993 年生。博士研究生。从事岩石圈结构与动力学研究。E-mail: wangguan1106@163.com。

\*通信作者: 熊小松, 男, 1983 年生。博士, 副研究员。从事大陆岩石圈结构与演化研究。E-mail: benxung@126.com。

兰坪盆地—扬子地块西缘位于青藏高原东南缘，属特提斯—喜马拉雅强烈挤压、碰撞造山带的东部，兼跨华南板块与古冈瓦纳板块两大构造单元(Sengör et al., 1981; 李兴振等, 1991; 钟大赉等, 1993; 图 1)。青藏高原东南缘由于印度板块与欧亚板块持续的碰撞和挤压成为高原物质侧向挤出的前沿(Tapponnier et al., 1977; Yin et al., 2000; Tapponnier et al., 2001)。自新生代以来，该区先后经历多期构造演化，深大断裂发育或再活化、地壳变形十分强烈、地震活动频发，是学者研究青藏高原扩展机制的热点地区(Xiong et al., 2022)。同时，青藏高原东南缘历经原、古、中、新特提斯和印度亚洲碰撞复合造山及相应复合成矿作用，多次复杂的构造运动使得三江碰撞成矿带广泛分布多种金属、非金属矿产，在国内外享有盛名，如金顶铅锌矿集区、北衙金多金属矿集区等(Hou et al., 2023)。

大陆地壳结构记录了大陆壳内岩层变形、断裂空间分布以及深浅构造关系等主要特征，是探讨大陆形变及演化的主要载体(熊小松, 2010)。其中组成

浅层地壳结构的是沉积盖层和部分出露的基底，最为敏感直接的是陆内变形(吴国炜等, 2022a)。对于青藏高原东南缘—扬子西缘研究区来讲，对浅层地壳结构的揭示，是研究盆地形成演化、盆山耦合关系、浅层岩浆作用与成矿作用的关键。由于深反射地震资料中的初至波到时信息包含着大量的浅表地质构造信息，为获得上地壳浅部精细的P波速度结构可以对其进行初至到时反演(刘振宽等, 1994; 李家康等, 2000; 谢樊等, 2021; Pan et al., 2022; 吴国炜等, 2022a, b; 史大年等, 2004; 宋桂桥等, 2008; 侯贺晨等, 2009)。近年来，大量学者关注与应用该方法获取浅层地壳结构(杨文采等, 1993; 成谷等, 2002; 杨慧珠等, 2004; 冯泽元等, 2005)。2016年，中国地质科学院地质研究所在兰坪盆地—扬子块体西缘实施了满覆盖220 km的深地震反射剖面，剖面自西向东依次穿过兰坪盆地、金沙江断裂带、程海断裂带和扬子块体西缘(图 2)，包括金顶铅锌矿和北衙金多金属两大矿集区(酆少英等, 2020)。本文通过初至波层析成像反演，获得了沿测线的浅层地

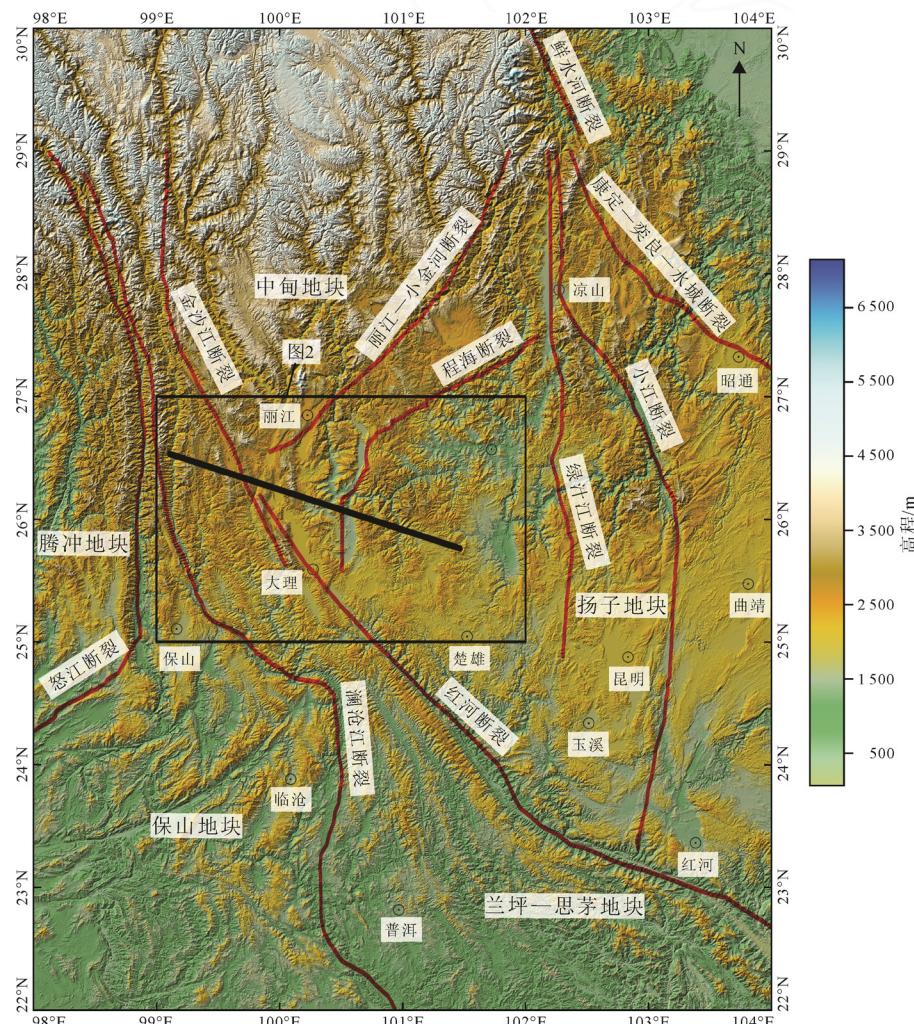


图 1 深反射地震测线位置图及研究区主要地质构造图(据 Xiong et al., 2022 修改)

Fig. 1 Location of deep seismic reflection profile and geological structure in the study area  
(modified from Xiong et al., 2022)

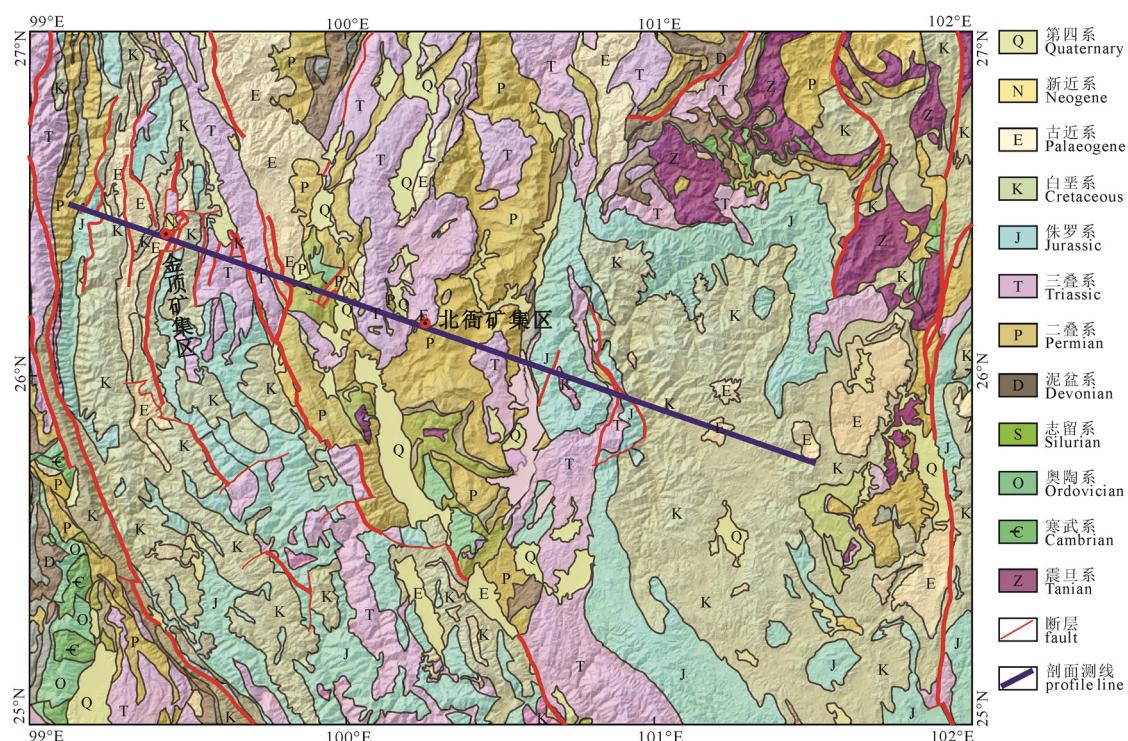


图2 兰坪盆地—扬子块体西缘地质简图(据庞健峰等, 2017)

Fig. 2 Simplified geologic map of the Lanping Basin–western margin of the Yangtze block  
(modified from PANG et al., 2017)

壳速度结构, 揭示了沿线兰坪盆地沉积厚度、多条断裂带的发育位置并探讨了两大矿集区其下的浅层结构, 探讨了其与成矿作用的关系。

## 1 地质背景

兰坪盆地位于兰坪—思茅地体的北部, 三叠纪早中期, 金沙江、澜沧江两个洋盆先后闭合, 兰坪盆地成为扬子陆块与保山地块之间的微板块; 至晚三叠世, 兰坪盆地具有残留海性质; 侏罗—白垩纪时则发展成陆内坳陷盆地; 新生代以来, 受印度板块与欧亚板块碰撞影响, 兰坪区域演化成为走滑拉分盆地, 并伴有明显的逆冲推覆构造。兰坪盆地主要沉积有三叠纪泥灰岩、灰岩和中—新生代夹蒸发盐层的硅质碎屑沉积岩。新喜马拉雅运动中岩层发生褶皱和断裂, 并有碱性岩浆活动。兰坪盆地在大地构造上处于的三江地区, 是环特提斯构造域的重要组成部分, 经历多次洋盆开合、多个陆块拼贴和多次造山事件, 其形成和发展经历了漫长的历史过程, 演化历史极为复杂, 包括盆地基底形成-陆内盆地-盆山转换等过程(薛春纪等, 2002)。二叠纪末, 滇藏古陆和扬子古陆及其所夹的兰坪地块碰撞在一起。早一中二叠世表现为强烈的造山作用, 兰坪地区普遍缺失下—中三叠统, 局部地区发育少量中、酸性火山岩(赵宇浩等, 2018)。晚三叠世由碰撞引发的挤压构造营力开始转变为一种拉张的构造环境,

进入陆内伸展造山造盆阶段。晚三叠世至早侏罗世为陆内裂谷发展阶段。从中侏罗世开始, 早期的陆内裂谷转变为陆内断陷, 首先表现为一种单断式箕状断陷。白垩纪由单断式箕状盆地发展成双断式的断陷盆地。早第三纪开始盆地分化, 形成小型走滑拉伸盆地。位于兰坪盆地内的金顶矿集区, 是中国最大的铅锌矿床, 储量达 1 633 万吨, 其中锌约占 80%(李成厚等, 2021)。位于昌都—思茅陆块上的中新生代坳陷带, 是兰坪—思茅铅锌银多金属成矿带的主体, 形成于青藏高原整体隆升之前的走滑拉分盆地中, 成矿过程中有显著的幔源流体和成矿物质的加入, 成矿后由于 WE 向的逆冲推覆而使矿体被覆盖(张峰等, 2010; 曾普胜等, 2016)。

扬子块体西缘处于冈瓦纳古陆与劳亚古陆的过渡地带, 西面与三江褶皱带相邻, 南临华南褶皱带(张长青, 2008)。前震旦基底形成后, 转化为震旦纪—三叠纪被动大陆边缘阶段, 经历中生代碰撞造山带形成过程, 最终在新生代发生陆内造山作用而形成现今构造格局。区内断裂十分发育, 自西向东依次有程海断裂带、绿汁江断裂带、小江断裂带、康定—奕良—水城断裂带。这些断裂带控制了区内地层、岩浆岩的展布, 同时也控制了矿产资源的分布。其中位于带内的北衡超大型斑岩-矽卡岩型金矿床, 是金沙江—哀牢山富碱斑岩带中最具代表性的金矿(邓军等, 2010, 2012; Deng et al., 2014), 同时也

是中国最大的矽卡岩型金矿之一(Deng et al., 2016)。

区内断裂带广泛发育,其中主要有金沙江—红河断裂带、丽江—小金河断裂带和程海断裂带。其中,金沙江—红河断裂带为印度地块与扬子地块之间的边界,同时作为川滇菱形地块的西南边界,也是川滇地区重要的断裂带之一。金沙江断裂带位于川西北次级块体与羌塘地块之间,北端始于四川白玉,向南经巴塘、德钦,至剑川与红河断裂相接,在四川巴塘及云南中甸附近分别被巴塘断裂与德钦—中甸一大具断裂带错切(徐晓雪等,2020)。金沙江断裂带是以挤压逆冲为主的断裂带,大地构造上属特提斯断裂系统的一部分(徐晓雪等,2020),主要由6~7条主干断裂构成,长约700 km,宽约80 km(东西向);自古生代以来,经过漫长演化,具有多期、复杂的特点,对滇西地区的地质构造演化及盆地沉积具有重要的控制作用。该断裂带构造变形活动主要受青藏高原物质东向滑移运动的影响,断裂带上的四川巴塘附近曾发生多次强震(徐晓雪等,2020)。程海断裂带位于川滇菱形块体内部,长约200 km,宽约50 km,沿断裂带上的金官、永胜、程海、期纳、宾川、祥云、弥渡形成一系列张性盆地,在永胜县涛源镇与金沙江相交。程海断裂带形成于震旦纪,经历了挤压、拉张、再挤压后,第四纪以来进入左旋张扭性活动阶段(Zhou et al., 2003a, b; Li et al., 2013; 吴中海等, 2015; Huang et al., 2018)。丽江—小金河断裂带为一NE向活动构造带,西南始于剑川,向东北经丽江、宁南西北的宝地、天生桥、盐源木里后在石棉一带与安宁河断裂交汇,断裂全长360 km,于龙门山—锦屏山—玉龙雪山中新生成推覆构造带(西南段)的基础上形成(向宏发等,2002; 李宁等,2018)。丽江—小金河断裂带两侧地势差异显著,为川滇菱形块体内部次级块体的边界断裂,将其分为滇中和川西北两个次级块体(丁锐等,2018)。丽江—小金河断裂带属于逆左旋走滑型活动断裂带,以水平运动为主、兼有倾向运动分量(向宏发等,2002),已有学者通过形变观测手段研究证实该断裂目前仍处于活动状态(李宁等,2018)。

## 2 初至波走时层析成像

初至波层析成像是成像领域的成熟方法,其利用地震波到时反演位于测线下方的地质体速度结构,并以直观的速度等值线图的形式表示出来(Vidale, 1988; 王椿镛, 1997; Sethian et al., 1999)。由于在已知走时矩阵的情况下,很难直接得到速度

分布,因此首先需要建立初始速度模型,将地下介质离散成一定大小的速度网格,并将每个网格内的速度设为常量;其次对初始速度模型进行正演计算,得到模型中地震波的理论走时矩阵和射线路径,利用理论走时和观测走时之差来修正速度模型,并对走时曲线进行拟合;然后通过多次正反演迭代不断修正模型,直到满足拟合精度。其中初至旅行时表示为:

$$T = \sum_{i=1}^N P_i d_i$$

式中:  $T$  为震源到检波器的走时;  $P_i$  为第  $i$  个网格的慢度值(速度的倒数);  $N$  为射线经过的模型网格数;  $d_i$  为第  $i$  个网格的射线路径长度。在实际应用中,由于存在多条射线(炮-检对),上述方程通常是超大型线性方程组。通过求解该线性方程组,可以得到各个网格的速度值,从而获得地下的速度结构。

由于地震初至波的可靠性、可追踪性和易识别性,本文利用蕴含在深地震反射剖面的初至波到时进行层析成像。用于数据处理的软件为“复杂探区近地表建模和校正系统 Tomodel”,该软件为实现小网格矩形建模采用的是波动方程的快速行进波前追踪技术(Fast Marching Method, FMM),并应用小波变换方法通过非线性迭代反演算法进行反演;在运算效率、反演精度、深度方向的分辨率等方面更具优势,可应用于复杂勘探区域。在确保迭代和反演结果的稳定性方面, Tomodel 采用的非线性反演算法能够保证全局最优解,使得反演结果不受初始

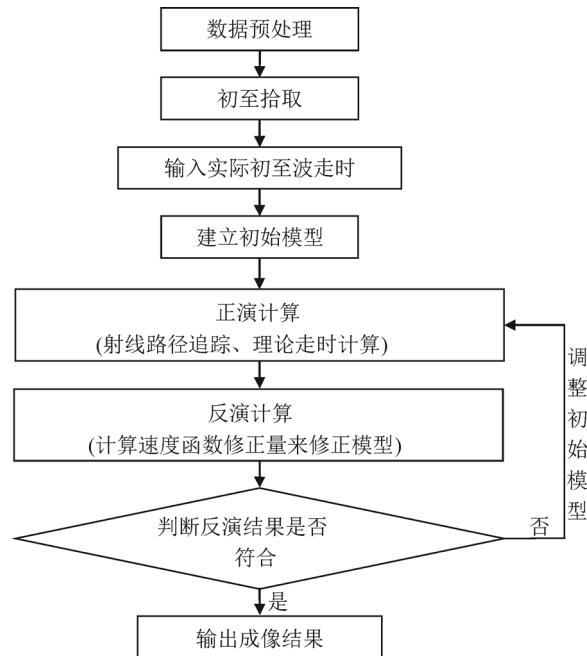


图3 初至波走时层析成像数据处理的基本流程  
Fig. 3 Workflow of 2D Pg tomography processing

速度模型影响。本次深地震反射初至波层析成像数据处理的主要流程包含数据预处理、初至拾取、正演模型建立以及层析反演(基本流程见图3)。

## 2.1 数据采集及处理

2016年,中国地质科学院地质研究所部署采集了金顶—北衙深地震反射剖面,该测线西起怒江傈僳族自治州营盘镇,东至楚雄彝族自治州三台乡,方向为NW—SE,满覆盖长度220 km。剖面野外采集共获得有效中、小炮数1 171炮,其中小炮976个,中炮195个,中炮、小炮记录长度为30 s,采样率为2 ms。数据采集仪器为428XL数字地震仪器,检波器型号为20DX-10Hz。采用了大药量、长排列和一定井深的激发、接收方式。本次初至波走时层析成像研究所使用的中、小炮震源数据为1 080、720道双边对称接收,道间距为40 m,最大偏移距

21 580 m,最小偏移距20 m,中、小炮覆盖次数分别为12次和60次。检波器组合方式为单通道12个检波器,垂直测线线性组合方式布置,组内距1 m。详细数据采集参数见表1。

## 2.2 初至拾取

深反射地震资料中的初至震相(回折波或首波)来自于上地壳顶部盖层(张先康等,2007),其走时曲线直观地体现了上地壳介质的速度结构和地表沉积盖层的厚度。本次研究采用的拾取方法是自动拾取

表1 采集参数表

Table 1 Data acquisition parameters

震源类型	炸药量/kg	炮间距/m	井深/m	井数	道间距/m	接收道数
中炮	150	1 200	40	2	40	1 080
小炮	48	240	25	2	40	720

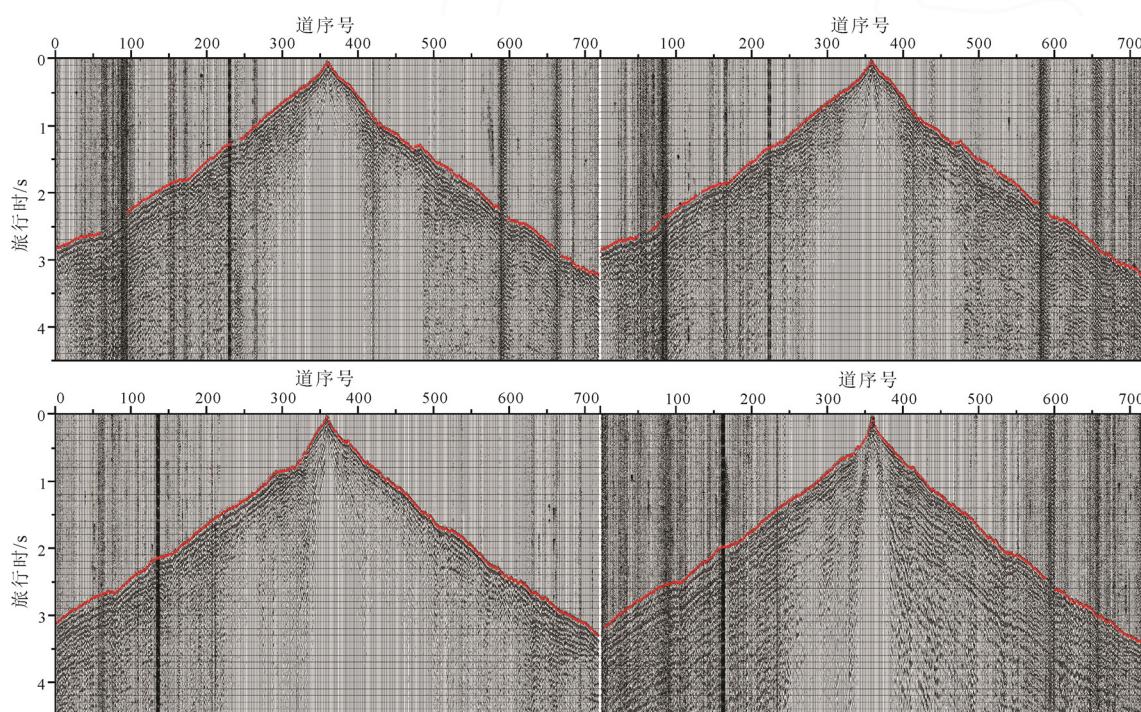


图4 单炮记录初至拾取(图中红色线为拾取的初至震相)

Fig. 4 Identified Pg phases of shot records (red lines indicate pickups of Pg phases)

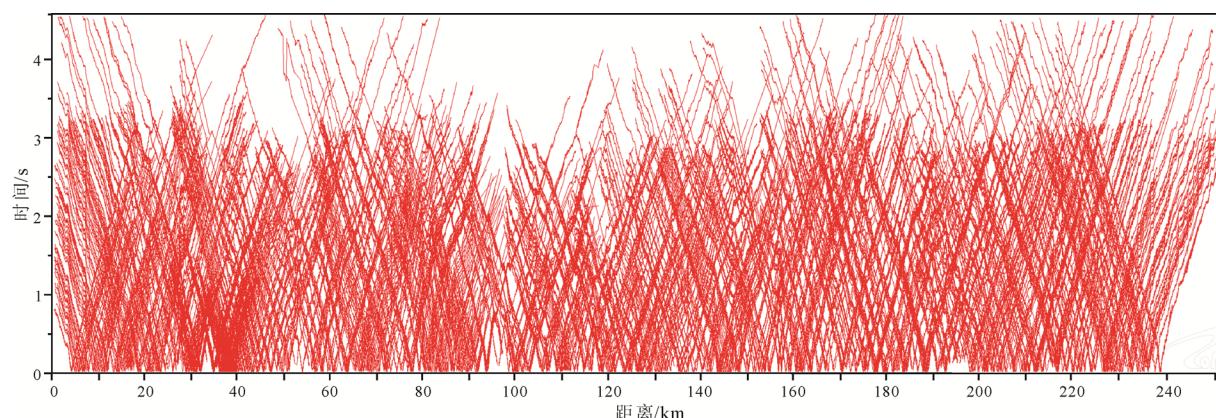


图5 全剖面初至拾取结果

Fig. 5 Pickups of Pg phases for all single-shot records

与手动调整相配合。在初至拾取之前不仅要正确加载观测系统，还需剔除地震记录中的坏道。利用带通滤波器进行多次滤波测试，最终滤波需选取对远近道初至震相影响较小的滤波参数。由图 4 可知，预处理后的单炮记录初至清晰，信噪比较高，绝大部分单炮记录的初至震相能够连续追踪到最大偏移距附近(21 580 m)。

本次研究从深反射地震的 976 个小炮和 195 个中炮地震记录中拾取获得了 1 198 000 个初至波走时数据，由图 5 可见，走时曲线沿测线呈线性排列且分布均匀，表明了初至拾取过程的一致性和准确性良好。

### 2.3 初始模型建立及走时反演

建立初始模型需要设置合理可靠的速度大小和模型各地层深度，确保反演过程中射线路径位于模型的顶、底界面之内。以此最大程度地确保反演结果的准确性和收敛速度。测试后，本次研究的反演射线最大穿透深度在地表最高海拔以下约 4 km 左右。因此，为了满足模型计算精度以及反演收敛速度的需要，将初始模型的最大深度设置为 4 km，将沿测线的高程设置为初始模型的顶部界面。利用初至时距曲线和走时拐点来确定初始模型的层速度和层厚度。兼顾剖面采集的道间距以及最终速度剖面的垂向分辨率，将初始速度模型的速度块网格单元设定为 40 m×20 m 的矩形。在建立了如图 6 所示的初始模型后，经过实际初至走时数据的加载以及 10 次迭代，反演均方差(走时残差)由最初迭代的 118 ms 最终降低到了 38 ms(具体层析反演收敛曲线如图 7 所示)，通过对反演获得的 P 波速度结构图(图 8b)以及射线密度分布图(图 8c)的分析，可以获得地表以下 2~2.5 km 深度的 P 波速度结构。

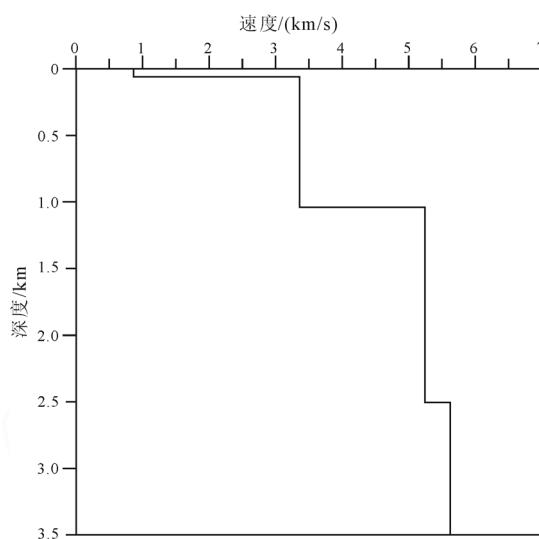


图 6 初始一维速度模型  
Fig. 6 Initial 1D velocity model

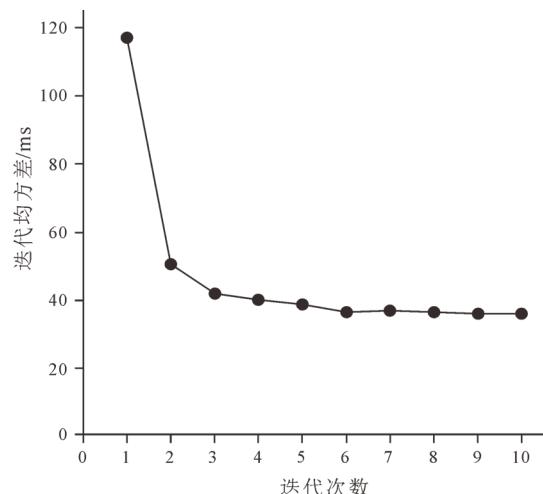


图 7 层析反演的迭代收敛曲线  
Fig. 7 Iterative convergence curve of the tomographic inversion

### 3 走时反演结果

在初始模型的建立确保反演获得的射线路径不穿透模型的顶部和底部界面的情况下，可以根据反演计算的均方根误差和射线穿透模型网格的密度来确定初至波层析成像反演结果的可信度。通常，如果反演的射线没有穿透模型顶、底界面，则表明初始模型的分层速度和层厚度设置得合理，模型底部界面的深度设置得足够。此外，反演得到的射线路径的分布在整个模型中往往是非均匀的，一般来说，穿过网格的射线密度与反演的速度结构的准确性呈正相关性；而没有射线穿过，其反演得到的速度是根据其他相邻区域的速度进行插值和外推得到的，可靠性不足。从本次研究获得的射线密度分布图(图 8c)和 P 波速度结构图(图 8b)可以推断，本次层析成像结果可以达到地下 3 km 以浅的探测深度。整条剖面的射线密度分布均匀，且绝大多数模型网格具有 500 次的射线覆盖次数，局部区域具有 1 000~2 000 次。由于观测系统的限制，在测线南北两端区域的射线覆盖次数降低至 100 次左右。从整条剖面的实际初至走时(图 9a)、最终计算的理论走时(图 9b)以及两者之间的对比(图 9c)可以看出，实际初至走时和最终理论计算走时达到了较为准确的拟合。

### 4 速度结构分析及讨论

兰坪盆地—扬子块体西缘地质构造复杂，地壳变形强烈，其速度受到沉积盖层、基岩类型和断裂带分布等因素影响表现非均匀性。Christensen et al.(1995)曾总结了全球盆地沉积盖层和结晶基底的速度结构差异，认为 P 波速度在沉积盖层中一般小于 5.7 km/s，而在结晶基底中速度处于 5.7~7.3 km/s

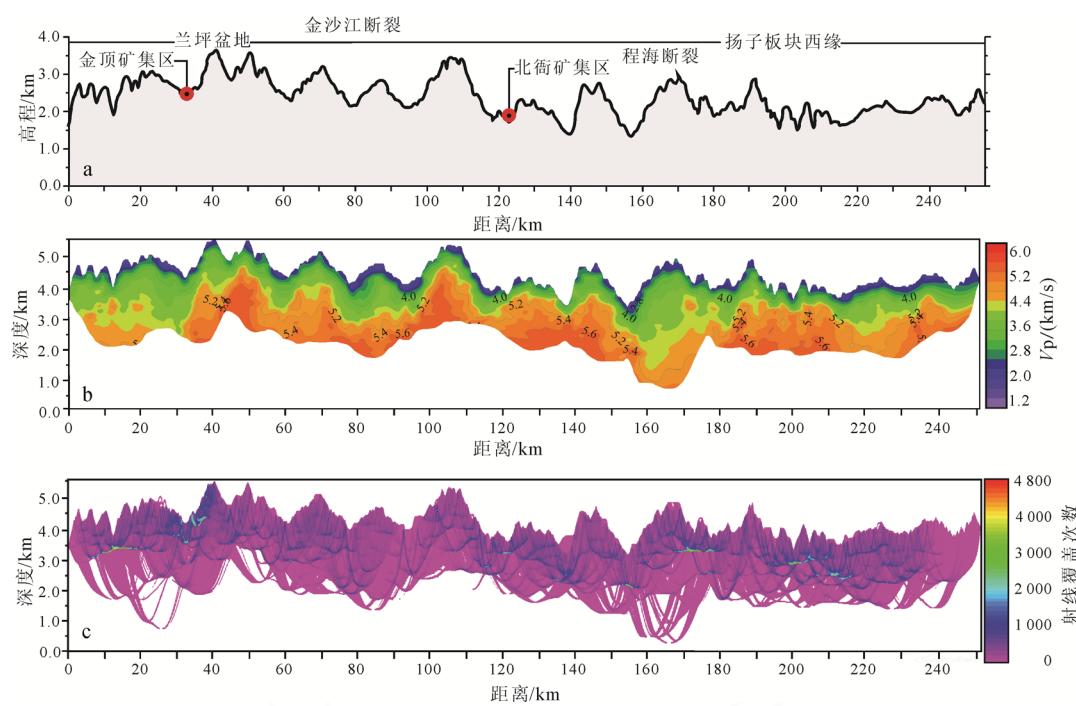


图 8 沿测线高程(a)、层析反演的速度结构(b)和层析反演的射线密度分布图(c)

Fig. 8 Elevation along the survey line (a), velocity structure of tomographic inversion (b), and ray density distribution map of tomographic inversion (c)

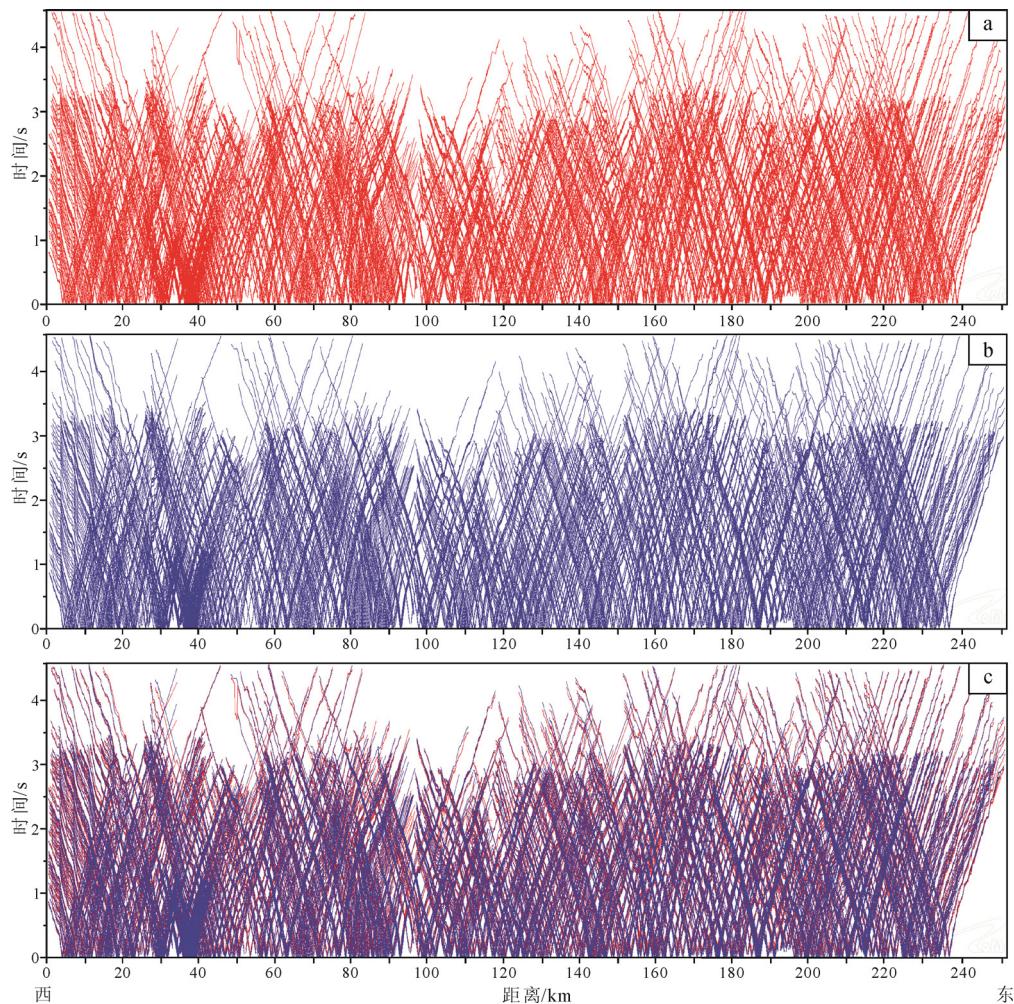


图 9 实际初至走时(a)、最终模型理论计算走时(b)和实际走时与理论走时对比图(c)

(图 c 中红色线为实际初至, 蓝色线为最终模型的理论计算走时)

Fig. 9 Pg traveltime (a) fitting travelttime from the final model (b) vs. survey distance, and superposition of the two plots (c red line indicates Pg travel time and the blue line indicates fitted travel time from the final model)

之间。同时,一部分学者结合研究区地质背景与P波速度等值线疏密程度来分析结晶基底的顶部埋藏深度(王夫运等,2008;徐涛等,2014;林吉焱等,2016;李培等,2019)。综合分析本文研究区地质背景与P波速度等值线疏密程度,考虑研究区在新生代地壳活动强烈,属于典型的活动构造带,因此本文选取P波速度为5.6 km/s的等值线作为结晶基底的顶部埋藏参考深度。本次层析成像得到的速度剖面如图10所示。为了联合分析浅表地质结构和速度结构,本文将沿测线地形地貌图、部分地质剖面图和速度结构图一起绘制(图11)。整体上由图11b可以看出,测线速度结构在横向和纵向上均表现出明显的非均匀性,变化剧烈。通过沿测线经过的断裂位置(图11a)与速度结构(图11b)对应关系可以判断,层析反演与浅层速度具有较高的控制准确性。

#### 4.1 沉积盖层

由层析成像反演得到的速度结构(图11b)可以看出,沿测线的沉积厚度变化明显。在测线西端的兰坪盆地(测线水平距离0~80 km)最大沉积厚度约3.5 km,最小沉积厚度约为1 km,西厚东薄。沿测线逐渐东移,在80 km附近进入相对较为稳定的扬

子块体,沉积盖层厚度约为1.5 km,而在兰坪盆地和扬子块体的交界部位盖层厚度逐渐变小。沿测线继续向东进入桩号150~180 km部位,呈现迅速下陷后相对缓慢隆起的盖层形态,厚度超过4 km。沿测线向东至210~230 km桩号,沉积厚度迅速变大,最厚处超过2 km,该处南部进入楚雄盆地,沉积厚度超过万米(张志斌等,2002),可能受到楚雄断裂影响。在扬子块体(160~253 km)总体表现出“两侧厚中间薄”的特点。在沉积盖层厚度变化剧烈的地方与穿过地表的断裂带吻合较好,如图11c所示。

#### 4.2 断裂带

从层析成像结果中可以发现该剖面横向速度变化很大,速度剖面中的断裂位置与地形地貌图和地质剖面中的一致。金沙江断裂作为兰坪盆地与扬子块体西缘的边界断裂,对兰坪盆地在内的滇西地区地质构造演化以及盆地沉积具有重要的控制作用(许志琴,1997),在图11c速度结构中表现为近垂直的特点,两侧沉积厚度没有明显变化。在程海断裂西侧沉积厚度仅有1 km,而右侧最厚处达到4 km,表现出巨大的差异,断裂两侧地层沉积岩相变化比

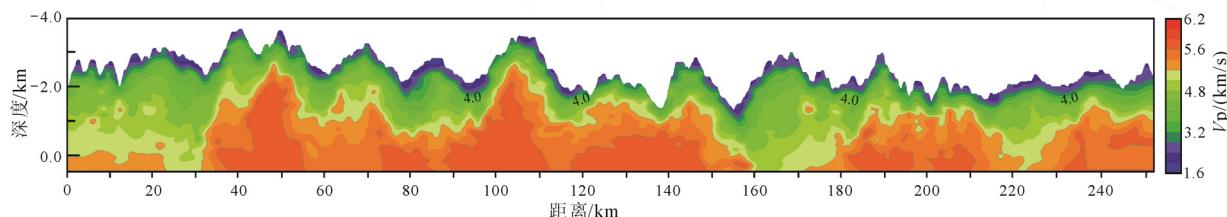
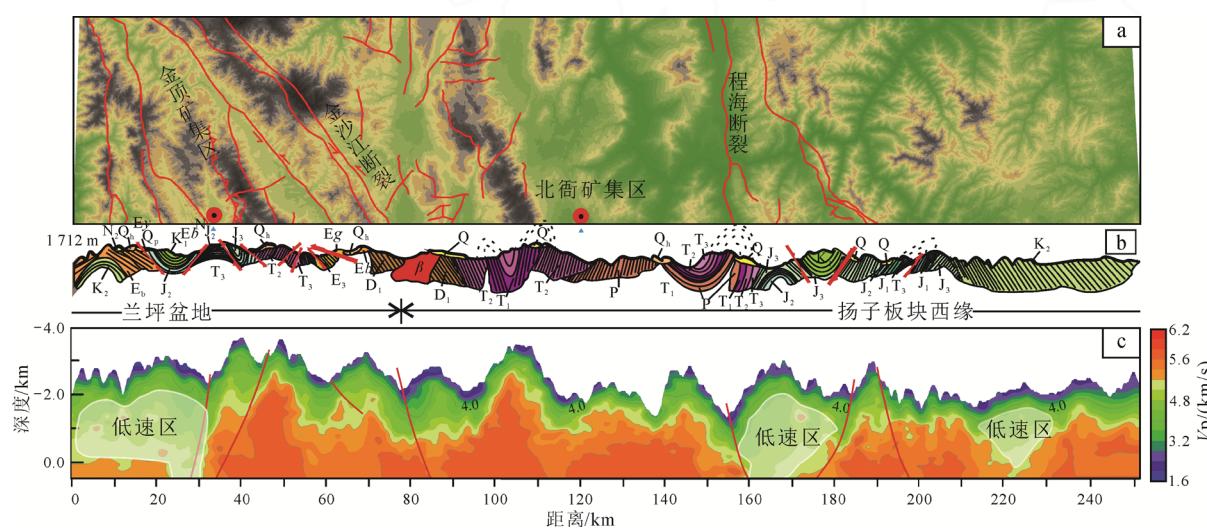


图10 地壳浅层速度剖面图  
Fig. 10 Velocity structure of the shallow upper crust



Q—第四系;  $Q_h$ —全新统;  $Q_p$ —更新统; N—新近系;  $N_1$ —上新统; Eb—宝相寺组; Eg—果郎组; Ey—云龙组;  $K_1$ —下白垩统;  
 $K_2$ —上白垩统;  $J_1$ —下侏罗统;  $J_2$ —中侏罗统;  $J_3$ —上侏罗统;  $T_1$ —下三叠统;  $T_2$ —中三叠统;  $T_3$ —上三叠统; P—二叠系;  $D_1$ —下泥盆统。  
 Q—Quaternary;  $Q_h$ —Holocene;  $Q_p$ —Pleistocene; N—Neogene;  $N_1$ —Pliocene; Eb—Baoxiangsi Formation; Eg—Guolang Formation; Ey—Yunlong  
 Formation;  $K_1$ —Lower Cretaceous;  $K_2$ —Upper Cretaceous;  $J_1$ —Lower Jurassic;  $J_2$ —Middle Jurassic;  $J_3$ —Upper Jurassic;  $T_1$ —Lower Triassic;  
 $T_2$ —Middle Triassic;  $T_3$ —Upper Triassic; P—Permian;  $D_1$ —Lower Devonian.

图11 沿线地形地貌图(a)、地质剖面图(b)和速度剖面解释图(c)  
Fig. 11 Topographic map (a), geological cross-section (b), and velocity structure interpretation (c)

较显著, 西侧主要为海相沉积, 东侧主要为陆相沉积(黄小巾等, 2018), 至今为活动断裂, 具有显著左行走滑特征(云南省地质矿产局, 1990)。兰坪盆地内的矿床受逆冲构造控制(何龙清等, 2004; 侯增谦等, 2008), 根据速度剖面结果, 推测在金顶矿集区下方发育有多组逆断层。

#### 4.3 矿集区

金顶矿区具有复杂的地质特征, 古新世至始新世发生逆冲推覆, 始新世至渐新世穹隆形成, 渐新世至中新世 Pb-Zn 矿床形成(Kyle et al., 2002; Li et al., 2006; Xue et al., 2015; Wang et al., 2018)。金顶矿集区在速度剖面上表现为西侧沉积厚度远大于东侧沉积厚度(图 11c 中橙色以上部分)。结合地质剖面, 金顶矿集区受控于逆冲断裂背向逆冲作用。同时, 在浅层速度结构上, 金顶矿集区正下方较两侧速度较低, 说明金顶矿集区可能在更深部位受热隆影响, 薛春纪等(2002)认为在兰坪盆地岩浆活动强烈、有幔流上涌, 同时深地震反射数据获得的金顶矿集区上地壳反射结构中也有发现地下双程走时 4~6 s 处存在弧状的叠加反射, 推测为底部的热隆(王冠, 2021)。北衙超大型斑岩-矽卡岩型金矿床是中国最大的矽卡岩型金矿之一(Deng et al., 2016)。其成矿流体主要与岩浆活动有关(Wu et al., 2005; 肖晓牛, 2009; 肖晓牛等, 2011; He et al., 2016)。北衙矿集区沉积厚度小于金顶矿集区, 并且两侧厚度无明显变化。但在速度结构上, 北衙矿集区下方有一个微弱的低速异常, 可能说明其成矿作用同深部的岩浆有关, 但岩浆同两侧围岩的速度差异较小, 这同前人在北衙地区通过定年以及矿物学分析认为北衙矿集区属于喜马拉雅期大规模岩浆活动的产物的结果一致(付小锦等, 2022)。

### 5 结论

(1) 兰坪盆地与扬子块体西缘沉积厚度均表现剧烈变化特征。整体上, 兰坪盆地沉积厚度从西到东逐渐减薄; 扬子块体西缘西部沉积厚度变化不大; 而在扬子块体西缘东部表现出“两侧厚中间薄”的特点。

(2) 沿测线断裂发育, 产状陡立。兰坪盆地内发育多组逆冲断裂; 金沙江断裂作为深大断裂在速度剖面中近乎垂直, 其两侧沉积厚度无明显变化; 程海断裂产状也近乎垂直, 但其西侧沉积厚度远小于东侧, 可能与其还在活动有关。

(3) 金顶矿集区在速度剖面中位于低速区, 结合前人研究认为其显示了在该矿集区下存在热隆。北衙矽卡岩型金矿两侧沉积厚度相差不大, 但在速度

剖面中位于高速区, 推测由岩浆上涌侵蚀围岩导致。

#### Acknowledgements:

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600302), the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42374119, 42261144669, 42274134, and C2330), and the CGS Research Fund of China (Nos. S2304 and JKYQN202311).

#### 参考文献:

- 曾普胜, 李红, 李延河, 等, 2016. 亚洲最大铅锌矿——三阶段叠加成矿的金顶巨型铅锌矿床[J]. 地质学报, 90(9): 2384-2398.
- 成谷, 马在田, 耿建华, 等, 2002. 地震层析成像发展回顾[J]. 勘探地球物理进展, 25(3): 6-12.
- 邓军, 王长明, 李龚健, 2012. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. 岩石学报, 28(5): 1349-1361.
- 邓军, 杨立强, 葛良胜, 等, 2010. 滇西富碱斑岩型金成矿系统特征与变化保存[J]. 岩石学报, 26(6): 1633-1645.
- 丁锐, 任俊杰, 张世民, 等, 2018. 丽江-小金河断裂中段晚第四纪古地震历史[J]. 地震地质, 40(3): 622-640.
- 酆少英, 李秋生, 邓小娟, 等, 2020. 深反射大炮揭示的青藏高原侧向碰撞带地壳骨架结构[J]. 地球物理学报, 63(3): 828-839.
- 冯泽元, 李培明, 唐海忠, 等, 2005. 利用层析反演技术解决山地复杂区静校正问题[J]. 石油物探, 44(3): 284-287, 7.
- 付小锦, 李其在, 刘欢, 等, 2022. 北衙地区贫矿和富矿斑岩对比研究——对斑岩成矿的指示意义[J]. 矿床地质, 41(4): 751-769.
- 何龙清, 陈开旭, 余凤鸣, 等, 2004. 云南兰坪盆地推覆构造及其控矿作用[J]. 地质与勘探, 40(4): 7-12.
- 侯贺斌, 高锐, 卢占武, 等, 2009. 青藏高原羌塘盆地中央隆起近地表速度结构的初至波层析成像试验[J]. 地质通报, 28(6): 738-745.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等, 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 27(2): 123-144.
- 黄小巾, 吴中海, 黄小龙, 等, 2018. 滇西北程海-宾川断裂带第四纪分段活动性的构造地貌表现与限定[J]. 地球科学, 43(12): 4651-4670.
- 李成厚, 刘孜, 杨献珍, 等, 2021. 云南兰坪金顶铅锌矿床矿体地质特征及找矿标志[J]. 矿产勘查, 12(4): 953-963.
- 李家康, 余钦范, 2000. 高陡山区近地表速度的求取[J]. 石油勘探与开发, 27(2): 60-61.
- 李宁, 朱良玉, 刘雷, 2018. 丽江—小金河断裂带现今闭锁程度与地震危险性分析[J]. 地震研究, 41(2): 244-250, 343.
- 李培, 蔡辉腾, 金星, 等, 2019. 中国大陆东南缘主要构造带基底结构[J]. 地球物理学报, 62(8): 2991-3003.
- 李兴振, 刘增乾, 潘桂棠, 1991. 西南三江地区大地构造单元划分及地史演化[M]. 北京: 地质出版社.

- 林吉焱, 段永红, 2016. 海原构造区及其周缘上部地壳结构研究[J]. 地震学报, 38(2): 179-187, 328.
- 刘振宽, 吴永刚, 刘英杰, 1994. 近地表层地震层析成像[J]. 石油地球物理勘探, 29(3): 294-301, 398.
- 庞健峰, 丁孝忠, 韩坤英, 等, 2017. 1:100万中华人民共和国数字地质图空间数据库[DB]. 全球地质数据.
- 史大年, 吕庆田, 徐明才, 等, 2004. 铜陵矿集区地壳浅表结构的地震层析研究[J]. 矿床地质, 23(3): 383-389.
- 宋桂桥, 尹天奎, 刘连升, 2008. 关于塔中大沙漠区低速带调查重新定位的思考[J]. 石油物探, 47(4): 372-375.
- 王椿镛, 1997. 中国岩石层结构研究的回顾与展望[J]. 地球物理学报, 40(S1): 82-109.
- 王夫运, 段永红, 杨卓欣, 等, 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: 地球科学), 38(5): 611-621.
- 王冠, 2021. 云南三江金顶矿集区上地壳结构与深部成矿背景[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 吴国炜, 熊小松, 高锐, 等, 2022a. 北山构造带南部上地壳二维初至波层析成像[J]. 地学前缘, 29(2): 402-415.
- 吴国炜, 熊小松, 高锐, 等, 2022b. 二维初至波层析成像揭示的北祁连—阿拉善南缘浅层地壳结构[J]. 地球学报, 43(6): 843-857.
- 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等, 2015. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制[J]. 地质通报, 34(1): 1-31.
- 向宏发, 徐锡伟, 虞顺民, 等, 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.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 等, 2009. 滇西洱海北部北衙地区富碱斑岩的地球化学、锆石 SHRIMP U-Pb 定年及成因[J]. 地质通报, 28(12): 1786-1803.
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 等, 2011. 滇西北衙金多金属矿床成矿地球化学特征[J]. 地质与勘探, 47(2): 170-179.
- 谢樊, 王海燕, 侯贺晟, 等, 2021. 中亚造山带东段浅表构造速度结构——深地震反射剖面初至波层析成像的揭露[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 51(2): 584-596.
- 熊小松, 2010. 中国大陆莫霍面深度与变化特征及其地球动力学意义[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 徐涛, 张明辉, 田小波, 等, 2014. 丽江—清镇剖面上地壳速度结构及其与鲁甸 Ms6.5 级地震孕震环境的关系[J]. 地球物理学报, 57(9): 3069-3079.
- 徐晓雪, 季灵运, 蒋锋云, 等, 2020. 基于 GPS 和小震研究金沙江断裂带现今活动特征[J]. 大地测量与地球动力学, 40(10): 1062-1067.
- 许志琴, 1997. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社.
- 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等, 2002. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 21(1): 36-44.
- 杨慧珠, 聂建新, 谭桂华, 2004. 反射波地震层析成像算法研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 23(2): 159-161.
- 杨文采, 李幼铭, 1993. 应用地震层析成像[M]. 北京: 地质出版社.
- 云南省地质矿产局, 1990. 云南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 张峰, 唐菊兴, 陈洪德, 等, 2010. 兰坪盆地演化与盆内成矿流体特征[J]. 矿物学报, 30(2): 223-229.
- 张先康, 杨卓欣, 徐朝繁, 等, 2007. 阿尼玛卿缝合带东段上地壳结构——马尔康—碌曲—吉浪深地震测深剖面结果[J]. 地震学报, 29(6): 592-604.
- 张长青, 2008. 中国川滇黔交界地区密西西比型(MVT)铅锌矿床成矿模型[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 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[J]. 地球学报, 23(2): 129-134.
- 赵宇浩, 姚仲友, 戚学祥, 等, 2018. 云南维西大宝山铜矿  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代学及成矿物质来源[J]. 华东地质, 39(1): 50-58.
- 钟大赉, 丁林, 1993. 从三江及邻区特提斯演化讨论风瓦纳大陆离散与亚洲大陆增生, 亚洲的增生[M]. 北京: 地震出版社: 5-8.

## References:

- CHEN Gu, MA Zaitian, GENG Jianhua, et al., 2002. A review on the growth of seismic tomography[J]. Progress in Exploration Geophysics, 25(3): 6-12(in Chinese with English abstract).
- CHRISTENSEN N I, MOONEY W D, 1995. Seismic Velocity Structure and Composition of the Continental Crust: A Global View[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B6): 9761-9788.
- DENG Jun, WANG Changming, LI Gongjian, 2012. Style and process of the superimposed mineralization in the Sanjiang Tethys[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(5): 1349-1361(in Chinese with English abstract).
- DENG Jun, WANG Qingfei, 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic Provinces, deposit types and tectonic framework[J]. Gondwana Research, 36: 219-274.
- DENG Jun, WANG Qingfei, LI Gongjian, et al., 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang Region, southwestern China[J]. Earth-Science Reviews, 138: 268-299.
- DENG Jun, YANG Liqiang, GE Liangsheng, et al., 2010. Character and post-ore changes, modifications and preservation of Cenozoic alkali-rich porphyry gold metallogenic system in western Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(6): 1633-1645(in Chinese with English abstract).
- DING Rui, REN Junjie, ZHANG Shimin, et al., 2018. Late Quaternary Paleoearthquakes on the Middle Segment of the Lijiang-Xiaojinhe Fault, Southeastern Tibet[J]. Seismology and Geology, 40(3): 622-640(in Chinese with English abstract).
- FENG Shaoying, LI Qiusheng, DENG Xiaojuan, et al., 2020. Crustal skeleton structure of the lateral collision zone of the Qinghai-Tibet Plateau revealed by large-shot set of deep-reflecting profiling[J]. Chinese J. Geophys., 63(3): 828-839(in Chinese with English abstract).

- FENG Zeyuan, LI Peiming, TANG Haizhong, et al., 2005. Solving the static correction problem in mountain complex block using tomographic inversion[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 44(3): 284-287(in Chinese with English abstract).
- FU Xiaojin, LI Qizai, LIU Huan, et al., 2022. A comparative study of fertile and barren porphyry in Beiya area: Indicative significance for porphyry mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 41(4): 751-769(in Chinese with English abstract).
- HE Longqing, CHEN Kaixu, YU Fengming, et al., 2004. Nappe tectonics and their ore-controlling of Lanping Basin in Yunnan Province[J]. *Geology and Prospecting*, 40(4): 7-12(in Chinese with English abstract).
- HE Wenyan, MO Xuanxue, YANG Liqiang, et al., 2016. Origin of the Eocene porphyries and mafic microgranular enclaves from the Beiya porphyry Au polymetallic deposit, western Yunnan, China: Implications for magma mixing/mingling and mineralization[J]. *Gondwana Research*, 40: 230-248.
- HOU Hesheng, GAO Rui, LU Zhanwu, et al., 2009. First arrival seismic tomographic imaging test of the near-surface velocity structure of central uplift in the Qiangtang Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(6): 738-745(in Chinese with English abstract).
- HOU Zengqian, SONG Yucai, LI Zheng, et al., 2008. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic models[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 123-144(in Chinese with English abstract).
- HOU Zengqian, WANG Qingfei, ZHANG Haijiang, et al., 2023. Lithosphere architecture characterized by crust±mantle decoupling controls the formation of orogenic gold deposits[J]. *National Science Review*, 10(3): 77-91.
- HUANG Xiaojin, WU Zhonghai, HUANG Xiaolong, et al., 2018. Tectonic geomorphology constrains on Quaternary activity and segmentation along Chenghai-Binchuan Fault Zone in Northwest Yunnan, China[J]. *Earth Science*, 43(12): 4651-4670(in Chinese with English abstract).
- HUANG Xiaolong, WU Zhonghai, WU Kungang, 2018. Surface rupture of the 1515 Yongsheng earthquake in northwest Yunnan, and its seismogeological implications[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(4): 1324-1333.
- KYLET J R, LI Ning, JACKSON K G, 2002. Jinding: A giant Tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. *Society of Economic Geologists*, (50): 1-16.
- LI Chenghou, LIU Zi, YANG Xianzhen, et al., 2021. Geological characteristics and prospecting criteria of the Jinding lead-zinc deposit in Lanping, Yunnan Province[J]. *Mineral Exploration*, 12(4): 953-963(in Chinese with English abstract).
- LI Jiakang, YU Qinfan, 2000. Gain of near-surface velocity in mountain regions[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 27(2): 60-61(in Chinese with English abstract).
- LI Ning, ZHU Liangyu, LIU Lei, 2018. Study on Present-day Locking Degree and Seismic Hazard of the Lijiang-Xiaojinhe Fault Zone[J]. *Journal of Seismological Research*, 41(2): 244-250, 343(in Chinese with English abstract).
- LI Pei, CAI Huiteng, JIN Xing, et al., 2019. Basement structure beneath the southeastern margin in Chinese continent[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(8): 2991-3003(in Chinese with English abstract).
- LI Shihu, DENG Chenglong, YAO Haitao, et al., 2013. Magnetostratigraphy of the Dali Basin in Yunnan and implications for late Neogene rotation of the southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(3): 791-807.
- LI Xiaoming, SONG Yougui, 2006. Cenozoic evolution of tectono-fluid and metallogenic process in Lanping Basin, western Yunnan Province, Southwest China: Constraints from apatite fission track data[J]. *Geochemistry*, 25(4): 396-401.
- LI Xingzhen, LIU Zengqian, PAN Guitang, 1991. Division of tectonic units and evolution of geological history in Sanjiang area, southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LIN Jiyan, DUAN Yonghong, 2016. Upper crustal structure of Haiyuan tectonic zone and its surrounding areas[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 38(2): 179-187(in Chinese with English abstract).
- LIU Zhenkuan, WU Yonggang, LIU Yingjie, 1994. Seismic tomography for near surface formation[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 29(3): 294-301(in Chinese with English abstract).
- PAN Zongdong, HOU Hesheng, FU Wei, et al., 2022. Velocity Structure and Cu-Au Mineralization of the Duobaoshan Ore District, NE China: Constrained by First-Arrival Seismic Tomography[J]. *Minerals*, 12(8): 959.
- PANG Jianfeng, DING Xiaozhong, HAN Kunying, et al., 2017. The national 1: 1000000 geological map spatial database[J]. *Geology in China*, 44(S1): 8-18, 125-138(in Chinese with English abstract).
- SENGÖR A M C, 1981. The evolution of Paleo-Tethys in the Tibetan segment of the Alps in: *Geological and Ecological studies of Qihai-Tibet Plateau*[M]. Beijing: Science Press: 51-56.
- SETHIAN J A, POPOVICI A M, 1999. Three dimensional traveltimes computation using the Fast Marching Method[J]. *Geophysics*, 64: 516-523.
- SHI Danian, LÜ Qingtian, XU Mingcai, et al., 2004. Tomographic study of shallow structures in Tongling metallogenic province[J]. *Mineral Deposits*, 23(3): 383-389(in Chinese with English abstract).
- SONG Guiqiao, YIN Tiankui, LIU Liansheng, 2008. Reconsidering the aim and function of low-velocity zone investigation in the massive deserts of middle Tarim basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 47(4): 372-375(in Chinese with English abstract).

- TAPPONNIER P, XU Zhiqin, ROGER F, et al., 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- TAPPONNIER P, MOLNAR P, 1977. Active faulting and tectonics in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 82(20): 2905-2930.
- VIDALE J, 1988. Finite-difference calculation of travel times[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(6): 2062-2076.
- WANG Changming, YANG Lifei, BAGAS L, et al., 2018. Mineralization processes at the giant Jinding Zn-Pb deposit, Lanping Basin, Sanjiang Tethys Orogen: Evidence from in situ trace element analysis of pyrite and marcasite[J]. *Geological Journal*, 53(4): 1279-1294.
- WANG Chunyong, 1997. Review and prospect on lithospheric structure study in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 40(S1): 82-109(in Chinese with English abstract).
- WANG Fuyun, DUAN Yonghong, YANG Zhuoxin, et al., 2008. Study on the velocity structure and active faults of the upper crust in the Yanyuan-Mabian seismic belt of western Sichuan—high resolution seismic refraction experimental results[J]. *Science China Earth Sciences*, 38(5): 611-621(in Chinese).
- WANG Guan, 2021. Upper Crust Structure and Deep Metallogenic Background of Jinding Ore Concentration Area in the Sanjiang area of Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- WU Guowei, XIONG Xiaosong, GAO Rui, et al., 2022. 2D Tomographic imaging of the P-wave velocity structure in the upper crust beneath the southern Beishan tectonic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 29(2): 402-415(in Chinese with English abstract).
- WU Guowei, XIONG Xiaosong, GAO Rui, et al., 2022. Shallow Crustal Velocity Structure of the North Qilian–Southern Alxa Block Revealed by 2D First-arrival Seismic Tomography[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(6): 843-857(in Chinese with English abstract).
- WU Kaixing, HU Ruizhong, BI Xianwu, et al., 2005. Study of the fluid inclusions in altered porphyres in the Beiya gold deposit, western Yunnan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(2): 20-26.
- WU Zhonghai, LONG Changxing, FAN Taoyuan, et al., 2015. The arc rotational-shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan plateau and its dynamic characteristics and mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(1): 1-31(in Chinese with English abstract).
- XIANG Hongfa, XU Xiwei, GUO Shunmin, et al., 2002. Sinistral thrusting along the Lijiang-Xiaojinhe Fault since Quaternary and its geological-tectonic significance—Shielding effect of transverse structure of intracontinental active block[J]. *Seismology and Geology*, 24(2): 188-198(in Chinese with English abstract).
- XIAO Xiaoniu, YU Xuehui, MO Xuanxue, et al., 2009. Geochemistry, zircon SHRIMP U-Pb dating and origin of alkali-rich porphyries in Beiya area, north Erhai Lake, western Yunnan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1786-1803(in Chinese with English abstract).
- XIAO Xiaoniu, YU Xuehui, MO Xuanxue, et al., 2011. Geochemical characteristics of metallogenesis in the gold-polymetallic deposit in Beiya, western Yunnan Province[J]. *Geology and Prospecting*, 47(2): 170-179(in Chinese with English abstract).
- XIE Fan, WANG Haiyan, HOU Hesheng, et al., 2021. Near-surface fine velocity structure in eastern segment of Central Asian Orogenic Belt: Revealed by first-arrival wave tomography from deep seismic reflection profile[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 51(2): 584-596(in Chinese with English abstract).
- XIONG Xiaosong, 2010. Moho Depth and Variation of the Continent in China and Its Geodynamic Implications[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- XIONG Xiaosong, WANG Guan, LI Qiusheng, et al., 2022. Crustal Structure of the Chuan-Dian Block Revealed by Deep Seismic Sounding and its Implications for the Outward Expansion of the East Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 96(6): 1932-1944.
- XU Tao, ZHANG Minghui, TIAN Xiaobo, et al., 2014. Upper crustal velocity of Lijiang-Qingzhen profile and its relationship with the seismogenic environment of the Ms6.5 Ludian earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(9): 3069-3079(in Chinese with English abstract).
- XU Xiaoxue, JI Lingyun, JIANG Fengyun, et al., 2020. Study on current activity features of Jinshajiang Fault Zone based on GPS and small earthquakes[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 40(10): 1062-1067(in Chinese with English abstract).
- XU Zhiqin, ZHANG Jianxin, XU Huifen, 1997. The mountain chain ductile shear zones and dynamics in China's main continent[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- XUE Chunji, CHEN Yuchuan, YANG Jianmin, et al., 2002. Analysis of ore-forming background and tectonic system of Lanping basin, western Yunnan Province[J]. *Mineral Deposits*, 21(1): 36-44(in Chinese with English abstract).
- XUE Chunji, CHI Guoxiang, FAYEK M, 2015. Micro-textures and in situ sulfur isotopic analysis of spheroidal and zonal sulfides in the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China: Implications for biogenic processes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 288-304.
- YANG Huizhu, NIE Jianxin, TAN Guihua, 2004. Study of seismic tomography by reflection wave[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 23(2): 159-161(in Chinese with English abstract).
- YANG Wencai, LI Youming, 1993. Application of Seismic To-

- mography[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YIN An, HARRISON T M, 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280.
- Yunnan Province Geology and Mining Bureau, 1990. Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZENG Pusheng, LI Hong, LI Yanhe, et al., 2016. Asia largest lead-zinc ore deposit: the Jinding giant Pb-Zn deposit by three stages superimposed mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 90(9): 2384-2397(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Changqing, 2008. The genetic model of Mississippi Valley-type deposits in the boundary area of Sichuan, Yunnan and Guizhou provinces, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Feng, TANG Juxing, CHEN Hongde, et al., 2010. Evolution of Lanping Basin and characteristics of minerogenic fluid in Lanping Basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 30(2): 223-229(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiankang, YANG Zhuoxin, XU Chaofan, et al., 2007. Upper crust structure of eastern A'nyemaqen suture zone: Results of Barkam-Luqu-Gulang deep seismic sounding profile[J]. Acta Seismologica Sinica, 29(6): 592-604(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhibin, CAO Debin, 2002. The relationship of the formation and evolution of Mesozoic Chuxiong Basin to Ailaoshan orogenic belt in central Yunnan—Examplified by regional geological integrated section from Xishelu of Chuxiong to Bichengzhen of Lufeng[J]. Acta Geoscientia Sinica, 23(2): 129-134(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yuhao, YAO Zhongyou, QI Xuexiang, et al., 2018.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of muscovite and source of ore-forming materials in the Dabaoshan Copper ore deposit, Weixi County, Yunnan[J]. East China Geology, 39(1): 50-58(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Dalai, DING Lin, 1993. From the evolution of Tethys in Sanjiang and its adjacent areas, the dispersion of Fengwana continent and the proliferation of Asian continent[M]. Beijing: Seismological Press: 5-8(in Chinese).
- ZHOU Guangquan, SU Youjin, WANG Shaojin, 2003a. Discussion on the Reasons of Yongsheng M 6.0 Earthquake on October 27, 2001[J]. Earthquake Research in China, 19(2): 166-174.
- ZHOU Guangquan, SU Youjin, WANG Shaojin, 2003b. Study on the genesis of the Yongsheng earthquake with Ms6.0 on October 27, 2001[J]. Earthquake Research in China, 17(4): 364-375.