

青藏高原中部 INDEPTH-III 剖面低速层研究

牛 潇¹⁾, 郑洪伟²⁾, 贺日政^{1)*}, 李娱兰^{2,3)}, 严江勇²⁾, 李宗旭¹⁾

1) 中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100037; 2) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3) 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

摘 要: 印度大陆板块北向碰撞及俯冲导致的青藏高原快速隆升, 使得青藏高原内部的物质组成及构造演化更为复杂, 其中之一高原内部的低速层分布特征及其构造成因尚不明确。藏北高原中部的班公湖—怒江缝合带两侧宽频带地震观测程度较高, 为调查班公湖—怒江缝合带两侧低速层分布特征提供了良好的客观条件。本文选取了 INDEPTH-III 项目布置在班公怒江缝合带两侧的宽频带地震台站记录的远震数据, 开展接收函数分析, 通过时频域相位滤波提高信噪比, 并利用接收函数复谱比非线性反演方法得到了台站下方一维 S 波速度结构。反演结果表明班公湖—怒江缝合带两侧地壳中低速层广泛分布, 且横向不连续, 埋深在 20~40 km 之间, 部分地区在 0~15 km 的上地壳也出现低速层。上地壳内的低速层分布特征主要与地表区域构造及沉积层分布相关; 中下地壳内的低速层分布不仅受到了地体边界的约束, 且可能与后期青藏高原整体隆升相关。

关键词: 青藏高原; 班公湖—怒江缝合带; 接收函数分析; 低速层

中图分类号: P631 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.071801

A Study of the Low Velocity Layer along INDEPTH-III Profile in Central Tibetan Plateau

NIU Xiao¹⁾, ZHENG Hong-wei²⁾, HE Ri-zheng^{1)*}, LI Yu-lan^{2,3)}, YAN Jiang-yong²⁾, LI Zong-xu¹⁾

1) SinoProbe Center-China Deep Exploration Center, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
3) School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026

Abstract: The northward collision and subduction of the Indian continental plate led to the rapid uplift of the Tibetan plateau. As a result, the material composition and tectonic evolution in the plateau are the most complex, and hence the distribution characteristics and tectonic origin of the low-velocity strata are still unclear. The broad-band seismic observations are relatively high on both sides of the Bangong Co–Nujiang Suture zone (BNS) in the central part of northern Tibetan Plateau, which provides a good condition for investigating the distribution of low-velocity layers. In this paper, the authors selected the teleseism data recorded by INDEPTH-III broadband seismic stations deployed on both sides of the BNS to the receiver function analysis. The authors improved the signal-to-noise ratio through time-frequency domain phase filtering, and obtained the one-dimensional S-wave velocity structure characteristics under each station by use of the nonlinear inversion method of the complex spectrum ratio of the receiver function. The results obtained by the authors show that a discontinuous low velocity layer with the depth of 20~40 km is widely distributed within the crust beneath both sides of the BNS, and low velocity layers also appear in 0~15 km nearby the subsurface. Comparisons show that the distribution pattern of low-velocity layers in the upper crust is mainly related to the surface regional structure, like east-western trend thrust fault zone and surface sediments, while low-velocity layers in the middle and lower crust not only are

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41761134094; 41574086; 41274095)、国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0600301; 2018YFC0604102)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20190015)联合资助。

收稿日期: 2020-04-23; 改回日期: 2020-06-25; 网络首发日期: 2020-07-21。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 牛潇, 男, 1996 年生。硕士研究生。主要从事地震学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。

E-mail: niuxiao18@mails.ucas.edu.cn。

*通讯作者: 贺日政, 男, 1973 年生。博士, 研究员, 博士生导师。主要从事青藏高原深部结构与构造研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: herizheng@cags.ac.cn。

constrained by the boundary of the terrane but also possibly related to the Tibetan Plateau uplifting.

Key words: Tibetan Plateau; Bangong Co–Nujiang Suture; receiver function analysis; low velocity zone

由多个地体在不同时期拼合而成的青藏高原(常承法和郑锡澜, 1973), 在新生代以来经历了印度大陆北向碰撞与俯冲(Yin and Harrison, 2000), 形成了地球表面年代最新、规模最大、海拔最高的构造汇聚区并且碰撞过程持续至今, 是研究陆陆碰撞的天然实验室(高锐, 1997; Yin and Harrison, 2000; Haines et al., 2003)。始于 20 世纪 70 年代多国科学家联合在高原内开展的深部探测研究(Gao et al., 2005), 为探索青藏高原的隆升机制提供了初步框架认识, 如地壳挤压叠覆加厚(Dewey and Burke, 1973; England and Houseman, 1986)、地壳俯冲(Roger et al., 2000; Tapponnier et al., 2001)、底侵加厚(Molnar and Tapponnier, 1977)等模型。随着研究的深入, 青藏高原内部仍有很多深部结构、构造和性质的问题有待研究(高锐, 1997), 如青藏高原低速层分布及其构造成因。本次研究选择探测研究程度较高的 INDEPTH-III 剖面所经过的班公湖—怒江缝合带中段(Gao et al., 2005; 刘国成等, 2014), 利用接收函数反演技术研究该区域下的低速层分布特征并探讨可能的构造成因。

位于藏北高原中部的班公湖—怒江缝合带(Yin and Harrison, 2000)是青藏高原重要的缝合带, 以此为界的拉萨地体和羌塘地体的壳幔属性具有明显的南北差异, 如羌塘下的壳内低速层分布特征(李永华等, 2006a; 严江勇等, 2019), 青藏高原普遍存在低速层(李永华等, 2006b; 贺日政等, 2007; 滕吉文等, 2012), 或低速层并不普遍存在(Owens and Zandt, 1997; 吴庆举和曾融生, 1998)。因此对班公湖—怒江缝合带两侧低速层分布特征的研究尤为重要。

利用接收函数一维波形反演方法(刘启元等, 1996)获取跨越班公湖—怒江缝合带的 INDEPTH-III 剖面速度结构特征, 再收集最近 20 多年利用 INDEPTH-III 项目数据发表的研究成果(Zhao et al., 2001; Michie et al., 2004; Ross et al., 2004; Tian et al., 2005; He et al., 2010)以及其它相关探测成果(邹长桥等, 2012; Gao et al., 2013; 刘国成等, 2014; 吴蔚等, 2017; 严江勇等, 2019)基础上, 综合分析班公湖—怒江缝合带两侧的壳内低速层分布特征, 不仅对理解青藏高原内部物质变化、板块俯冲、地幔对流等深部物理化学过程具有非常重要的意义(滕吉文等, 2012), 而且从侧面认识青藏高原的形成和演化机制。因此对藏北高原中部青藏高原不同地块内地壳结构以及低速层的研究尤为重要。

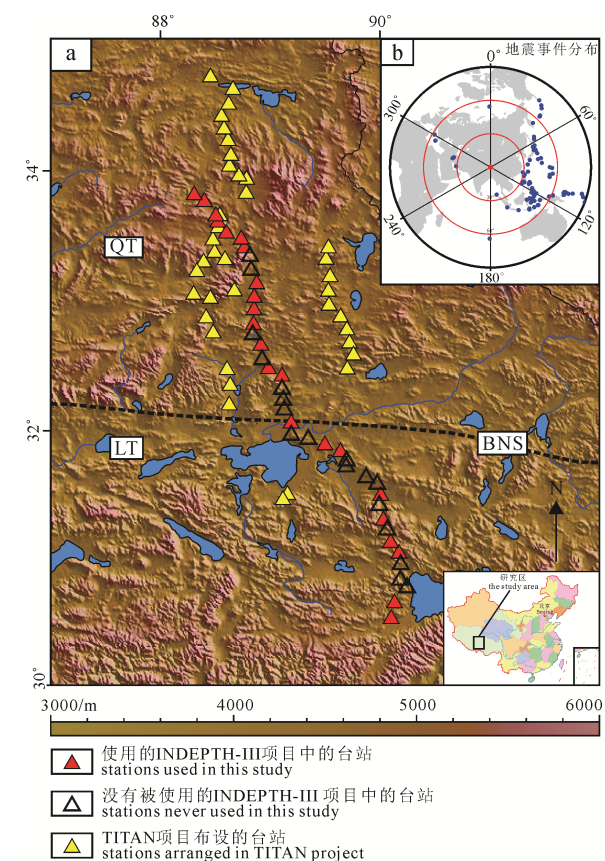
1 区域构造背景

青藏高原被普遍认为是由多个地体在不同地质时代在经历了多期次碰撞拼合而成的一个复杂的地质构造单元(图 1; Chang et al., 1986)。在其内部的相邻地质构造单元间的标志为一系列近东西走向的缝合带, 自南向北依次为, 雅鲁藏布江缝合带、班公湖—怒江缝合带、龙木错—双湖缝合带、金沙江缝合带、阿尼玛卿—昆仑山缝合带、祁连缝合带(图 1)。位于青藏高原中部的班公湖—怒江缝合带, 作为中生代关闭消亡的中特提斯大洋的产物, 其西起班公湖, 向东经改则、东巧、丁青、嘉玉桥至八宿县的上林卡, 经左贡扎玉、梅里雪山西坡与昌宁、孟连带相通(潘桂棠等, 2004), 东西绵延数千公里(Yin and Harrison, 2000)。

作为拉萨地体和羌塘地体间的重要构造边界, 班公湖—怒江缝合带与其南北两侧, 不论是构造还是地表地质甚至是岩浆活动事件, 存在着显著差异(尹安, 2001; 潘桂棠等, 2004), 如班公湖—怒江缝合带以北的新生代火山岩浆活动主要与亚洲地幔大面积拆离(罗照华等, 2006)或部分断离作用有关(He et al., 2014), 而其南部的冈底斯带大多与碰撞机制有关(罗照华等, 2006)。班公湖—怒江缝合带还是一个重要的多金属成矿带(唐菊兴, 2019)。因此, 探测班公湖—怒江缝合带及其两侧的地壳上地幔深部结构特征并开展区域对比研究, 显得尤为重要。利用 INDEPTH-III 宽频带地震观测数据(Tilman et al., 2003)开展接收函数分析, 研究班公湖—怒江缝合带两侧的地壳结构差异, 非常之必要。

2 接收函数方法及数据

接收函数是从三分量地震台站记录中分离出垂直分量与水平分量做反卷积后得到的地震时间序列, 具有很好的台站下方结构分辨率, 避免了震源和传播路径因素的影响, 是研究地球深部重要的方法之一(Ammon et al., 1990; Langston, 1979)。由于地下结构会对 P-to-S 转换波(简称为 Ps)产生扰动, Ps 传播过程中记录了地下介质结构信息, 不仅用于反演壳幔分层速度(Langston, 1979), 地壳厚度和泊松比估算(Zhu and Kanamori, 2000), 还用于壳幔结构成像(Tian et al., 2005)。为了提取接收函数, 目前广泛采用方法主要是时间域迭代反褶积(Owens and Zandt, 1997)和频率域反褶积(Langston, 1979)。在此基础上, 利用不同的方法获取台站(或台阵)下方结构特征。



a—区域构造特征及台站分布图; b—地震事件分布图;
LT—拉萨地体; QT—羌塘地体; BNS—班公湖—怒江缝合带。
a—the regional structural characteristics and the station distribution;
b—seismic event distribution; LT—Lhasa terrane; QT—Qiangtang terrane; BNS—Bangong Co—Nujiang suture zone.

图1 研究区内的区域构造特征及本文所用的台站分布和地震事件分布图(缝合带行迹来自尹安, 2001)

Fig. 1 The regional structural characteristics of the study area, the station distribution and seismic event distribution (suture belt after YIN, 2001)

接收函数反演分为线性反演和非线性反演。线性反演(Ammon et al., 1990; Owens and Zandt, 1997), 具有运算速度快优点, 但需要先验结构模型, 而且要求台站下方介质结构特征光滑连续且不能存在断裂。显然, 该方法不能满足“地下介质属性及其结构特征具有明显的非连续性”。为克服线性反演方法的局限性, 一些非线性反演方法, 如遗传因子(Shibutani et al., 1996), 接收函数复谱比(刘启元等, 1996)和模拟退火(高星等, 2005)等方法运用而生。本文采用了刘启元等(1996)提出的接收函数复谱比非线性反演方法。该方法不依赖初始模型而且还对初始模型没有过分严格要求。

接收函数复谱比反演按照 Tarantola 的构造公式所示的目标函数 $S(m)$:

$$S(m) = \frac{1}{2} \{ [g(m) - d]^T C_D^{-1} [g(m) - d] + (m - m_p)^T C_M^{-1} (m - m_p) \} \quad (1)$$

其中 $g(m)$ 和 d 分别为反演中的理论和观测的数据矢量, $g(m)$ 和 d 的分量相应于不同频率的接收函

数复谱比, m 为模型参数矢量, 角标 p 表示其先验信息, C_D 和 C_M 分别为数据和模型的协方差矩阵, $*$ 表示复共轭, 上脚标 T 表示转置。

之后对目标函数用共扼梯度法进行优化, 主要计算目标函数的梯度 γ_N 即:

$$\gamma_N = C_M \left[\frac{\partial S}{\partial m_i} \right]_N = C_M \overline{R G_N^T} C_D^{-1} R_e (g(m) - d) + C_M \overline{I G_N^T} C_D^{-1} I_m (g(m) - d) + (m_N - m_p) \quad (2)$$

$$\overline{R G_N^T} = R_e \left[\frac{\partial g}{\partial m_i} \right]_N, \quad \overline{I G_N^T} = I_m \left[\frac{\partial g}{\partial m_i} \right]_N \quad (3)$$

g^a 和 m_i 分别是预测数据矢量和模型矢量的分量, I 为单位矩阵, R 表示模型空间中解的分辨率, 角标 N 表示第 N 次迭代的解。最后经过多次迭代, 选取最佳拟合波形, 得到反演结果。接收函数复谱比正演计算采用了反射率法。对于确定的慢度, 它仅依赖于地表附近介质绝对参数的量, 而数值检验结果表明接收函数复谱比反演的结果与初始模型的选择无关(刘启元等, 1996)。

本文所用的数据来源于 INDEPTH-III 计划布设的宽频带地震仪所记录的远震事件, 地震记录的采样率为 50 Hz, 台间距大多在 10 km 左右。地震事件参数来自美国地质调查局(<http://www.usgs.gov>), 地震事件震级 $M_b \geq 5.5$, 震中距在 $30^\circ \sim 90^\circ$ 之间。

本次研究采用的数据处理流程如下: 首先对宽频带地震仪记录的三分量地震事件波形数据进行处理, 即(1)对原始数据以 20 Hz 的采样率重采样, 截取 P 波初动前 10 s 和之后 100 s 的波形; (2)去均值、线性趋势及仪器响应等; (3)利用后方位角对原始的 Z-N-E 三分量地震波形数据旋转到 Z-R-T(垂向, 径向和切向)坐标系, 做带通滤波(带宽 0.05~2 Hz); (4)应用时间域迭代反褶积对垂向和径向分量进行反褶积, 高斯系数选取 2.5; (5)利用 CrazySeismic 软件(Yu et al., 2017)挑选高信噪比(不小于 2.0)的接收函数。而对于较低信噪比的接收函数, 采用基于 S 变换的相位滤波技术(曲中党等, 2015)获取较李永华等(2006a)更多台站下方的接收函数。(6)利用接收函数复谱比非线性反演(刘启元等, 1996)获取了台站下方的一维 S 波速度结构特征。(7)构建适合剖面所在区域的标准速度模型: 由于 IASPEI91 标准模型的 Moho 深度较青藏高原实际 Moho 深度浅得多, 依据前人 H-k 叠加结果(李永华等, 2006b; 刘国成等, 2014)修改了 IASPEI91 标准速度模型中的 Moho 深度。(8)利用地震波层析成像思想, 基于改进的 IASPEI 速度模型, 计算改进后的模型与反演结果之间的扰动, 获取了剖面下的速度异常分布特征, 突出壳内低速及莫霍面变化特征。

3 反演结果与分析

依据前述规则, 获得了 INDEPTH-III 剖面中信噪比较高的 23 个台站下方的接收函数, 其中 ST02、ST03 等 18 个台站(图 1)下方的接收函数因信噪比很低而舍去。图 2 展示了高信噪比的 23 个台站下方的接收函数的倾斜叠加(slant stack)结果, 清楚地展示 P 波初至和 P-s 转换震相。之后利用接收函数复谱比非线性反演方法(刘启元等, 1996)获得了该 23 个台站反演结果(图 3), 显示所有垂向分量的反演结果与实际波形相关系数都为 0.96, 而径向分量的相关系数大多都在 0.95 以上。这主要是由于加入了相位滤波技术(曲中党等, 2015)提高了拟合系数, 使得反演结果更加可靠。对每个台站下的速度结构进行中值滤波, 有效地抑制反演结果中的小尺度异常并保留了主要界面特征(图 4)。

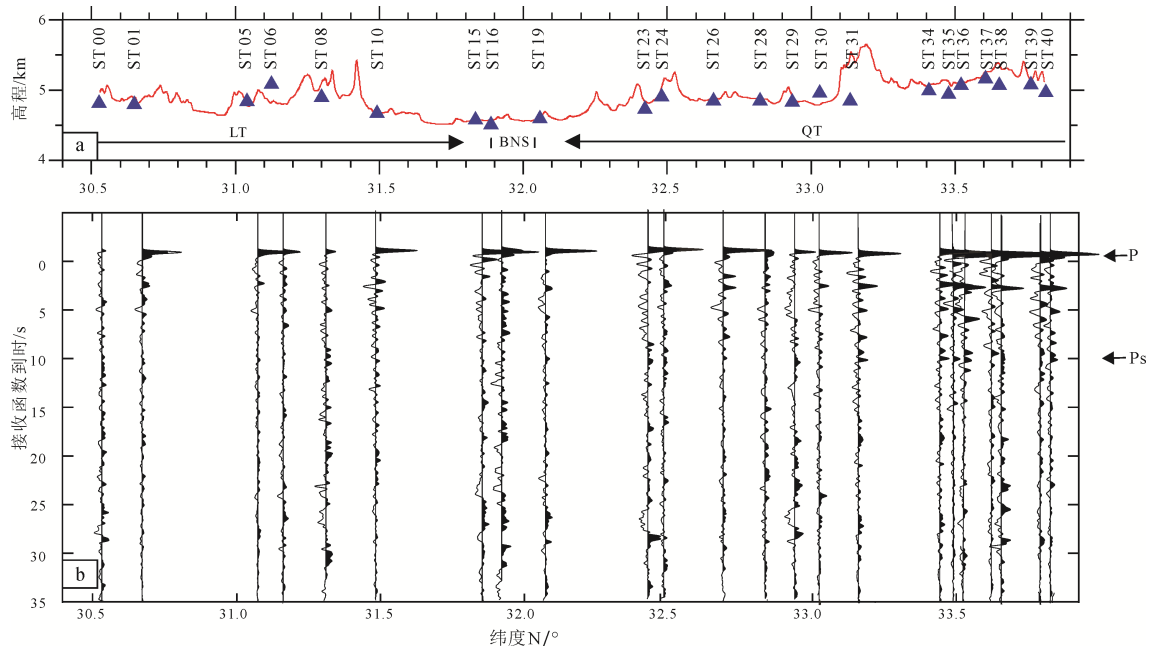
对于低速层的判定, 本文采取如下规则: (1)低速层的厚度不小于 5 km, (2)要比改进的 IASPEI91 速度模型的速度要低, 即同一深度的速度值低于改进后的 IASPEI91 速度模型。

本项研究结果与李永华等(2006a)的结果相比, 二者的共同点是在拉萨块体北部和羌塘地体中下地壳有低速层分布; 二者的差异是, 本文获得的中上地壳内低速层分布特征比较精细, 部分低速区呈现速度反转即低速区比上下区域速度值都低, 更能体现低速特征(图 5)。这是由于使用了不同的反演算法, 李永华等(2006a)使用的是遗传算法的反演方法。尽管不论线性还是非线性一维波形反演都具

有较大的不确定性(Ammon et al., 1990), 但相比之下, 本文所用的复谱比非线性反演方法(刘启元等, 1996)不依赖于通过先验信息构建的初始速度模型(李永华等, 2006a), 而取决于所挑选的接收函数的信噪比。

在不同台站下方的低速层分布特征如下: (1)在 ST01、ST08、ST23、ST28、ST29、ST34、ST35、ST37 台站下方低速层厚度较大; (2)在 ST05、ST26、ST36 台站下方的低速层较薄; (3)ST37、ST38 台站下方的低速层与吴蔚等(2017)展示的临近台站(NQT10、NQT12)速度结构相似; (4)整体上拉萨地体比羌塘地体低速层埋深较浅。

跨班公怒江缝合带及两侧的 INDEPTH-III 深反射探测结果(Ross et al., 2004)显示班公怒江缝合带顶部约有小于 2 km 厚度的沉积盖层, 以及上地壳(约 25 km 以浅)表现为无反射, 本文 S 波速度结构也在 32°N 附近 ST15、ST16、ST19 的台站下方近地表出现低速区。羌塘盆地内的 S 波速度结构(吴蔚等, 2017; 严江勇等, 2019)显示沿 88.5°E 测线南羌塘低速层埋深约 30 km, 北羌塘盆地内广泛存在的低速层明显变浅, 这与本文得到的 S 波速度结构(图 4)相似。李永华等(2006a)对 INDEPTH-III 台站开展接收函数分析, 研究显示拉萨地体北部和羌塘地体下方中地壳有低速层存在, 也与本文结果有较好的一致性(如图 4)。不同方法及不同数据集获得的低速层分布特征较为一致, 表明本文利用一维速度反演获得结果是可靠的。



a—剖面地形及台站位置图; b—台站的名称及 R 分量的倾斜叠加。

a—the surface elevation and station position; b—the name of the stations and slant-stack of R component.

图 2 研究剖面的地形、台站位置名称及台站下方接收函数倾斜的叠加

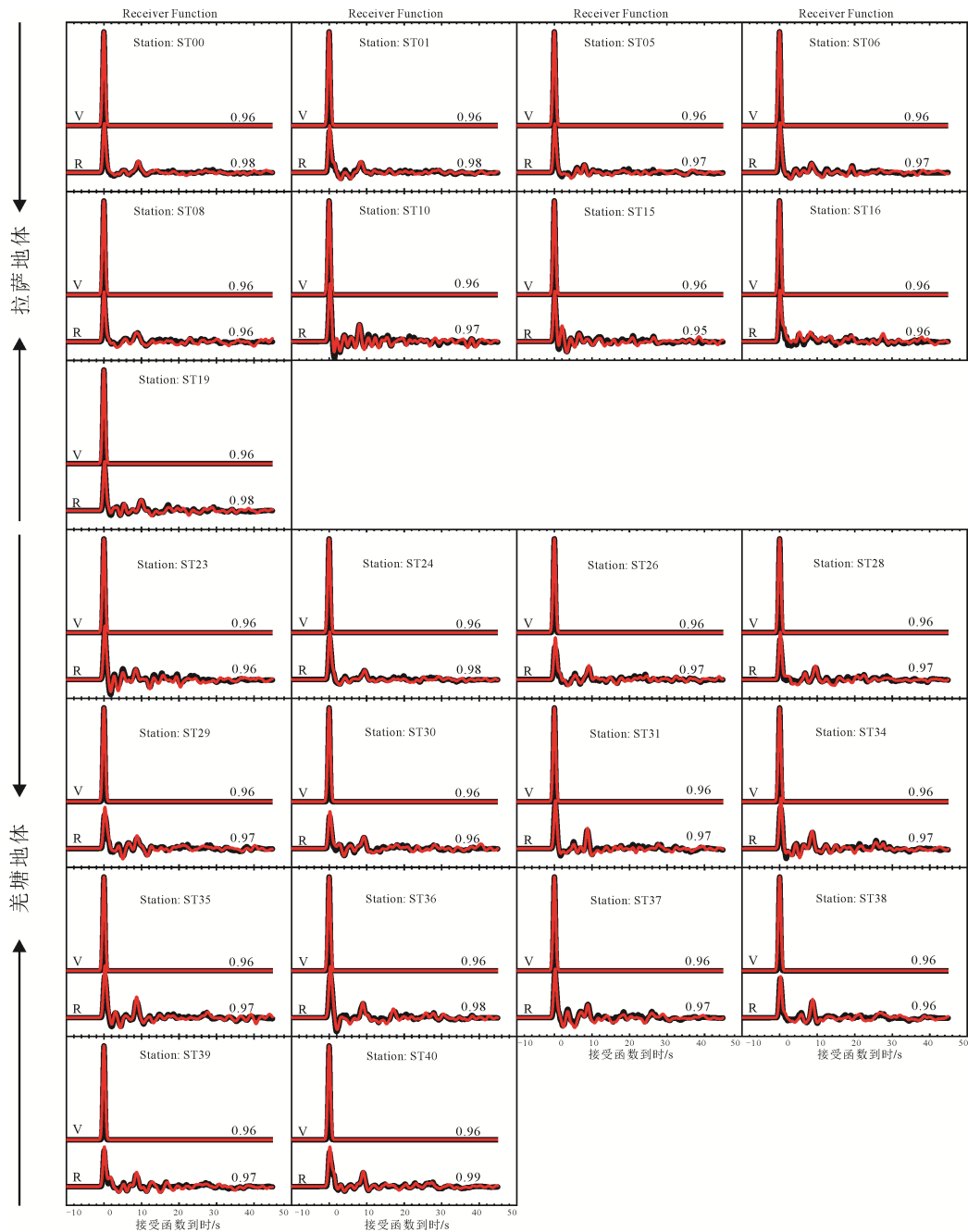
Fig. 2 Surface elevation, station position name and slant-stack of receiver function along the profile

利用三次样条插值方法对反演获得台站下方一维速度结构插值得到了测线下方二维速度结构(图 5b), 显示在拉萨地体和羌塘地体普遍存在不连续的低速体。为了更好的突出低速层分布特征, 利用地震波层析成像方法思想(Zhao et al., 1992, 1994; Zhao, 2009), 即与参考模型进行对比并求取速度异常扰动。由于 IASPEI91 速度模型是全球均匀模型, 不适合巨厚地壳的青藏高原研究(He et al., 2010)。为更好突出显示青藏高原内部低速层分布特征, 我们对该全球标准速度模型做了改进, 即将利用前人通过 H-k 方法得到的地壳厚度(李永华等, 2006a; 刘

国成等, 2014), 换算为 Moho 深度, 修改 IASPEI91 参考模型。再利用计算反演速度(图 5b)与改进后参考模型之间的速度异常扰动的公式(4), 获取剖面下的 S 波速度异常扰动, 突出显示低速层分布特征。

$$LVZ = \frac{V_s - V_{ref}}{V_{ref}} \times 100\% \quad (4)$$

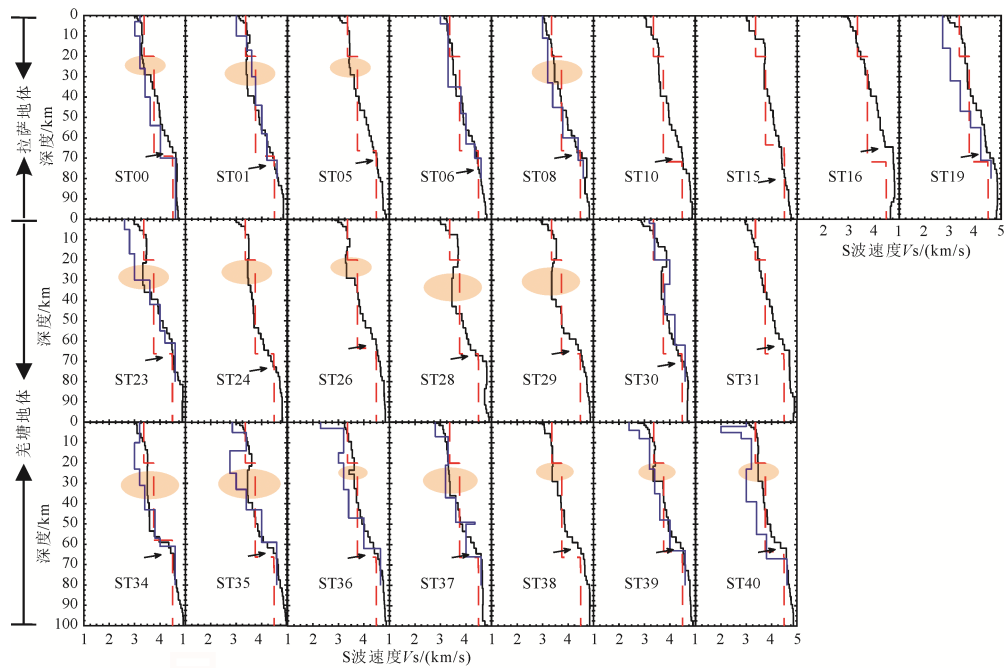
式中 LVZ 表示扰动大小, 用百分数表示, V_s 表示某一深度处的剪切波速度, V_{ref} 表示该深度处的经修改的参考模型剪切波速度。通过三次样条插值方法获得了剖面下方的速度异常结构, 突出显示了 S 波速度异常体分布特征(图 5c)。



上方波形是垂直分量(V)拟合结果; 下方波形是径向分量(R)拟合结果; 上面的数值代表拟合系数。
Top waveform is the vertical component; Bottom waveform is the radial (R) component; the value above represents the fitting coefficient.

图 3 23 个台站接收函数波形拟合结果

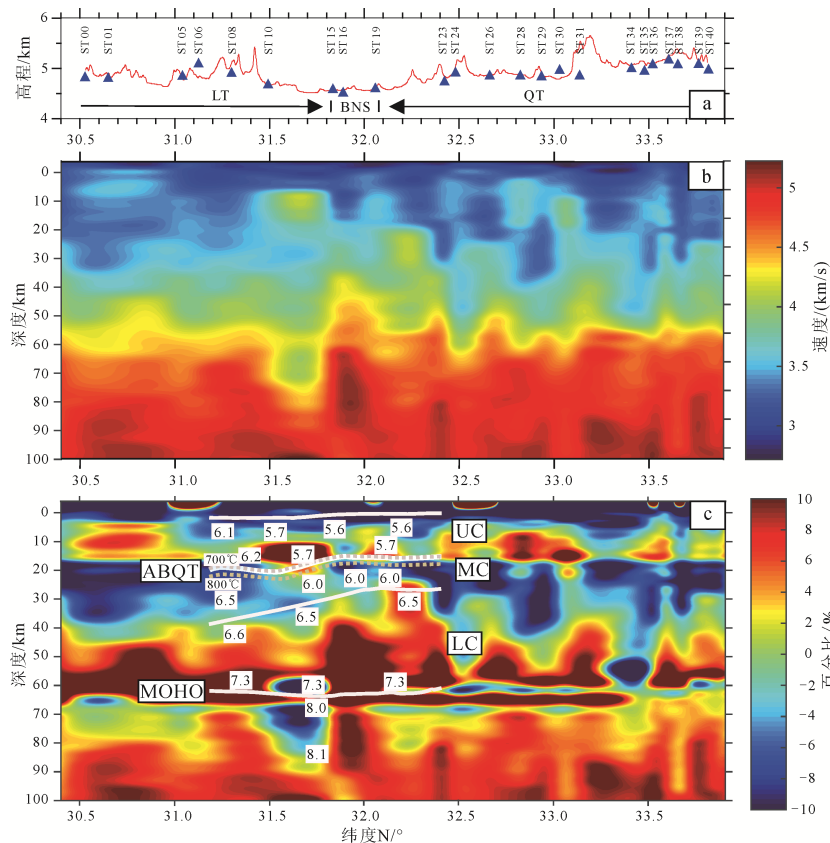
Fig. 3 The comparison result between original waveform and inverted waveform by nonlinear inversion for 23 stations



黑折线为本文反演结果, 红虚线为依据刘国成等(2014)修改后的 IASPEI91 速度模型, 蓝折线为李永华(2006a)结果; 黑色短箭头表示 Moho 位置。
The black broken line is the inversion result of this study, the red dashed line is the modified IASPEI91 velocity model based on Liu et al.(2014), and the blue broken line is the result of LI et al.(2006a); short black arrows denote Moho.

图 4 沿 INDEPTH-III 剖面下方地壳 S 波速度结构

Fig. 4 The 1-D S-wave velocity structure along the INDEPTH-III profile

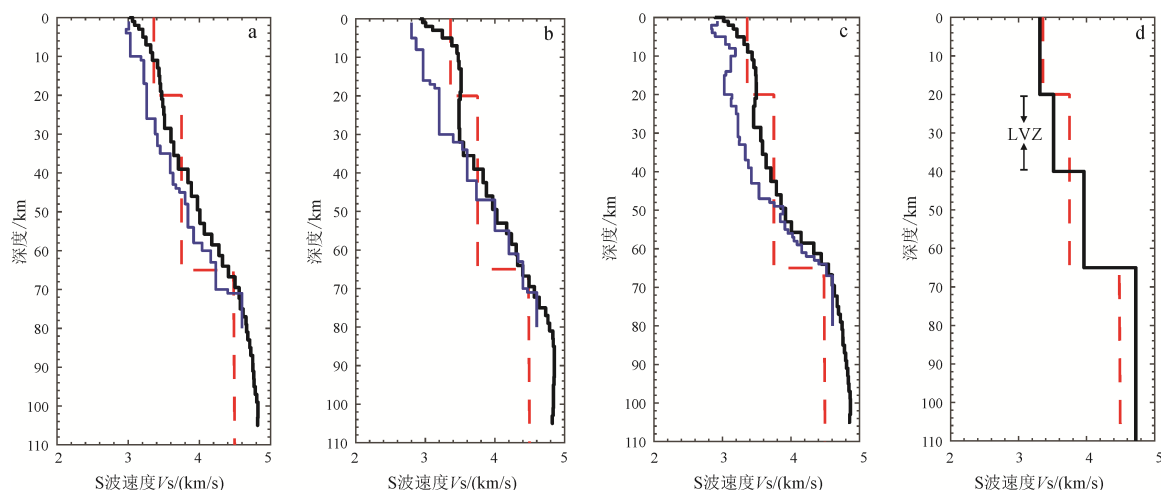


a—台站位置及地形图; b—INDEPTH-III 测线下二维速度剖面; c—INDEPTH-III 测线下的伪层析成像 S 波速度异常结构, 地震模型层边界和纵波速度值(km/s)(Zhao et al., 2001), 和 α - β 石英相变面及两条温度界面, ABQT—石英的 α 相变 β 相; UC—上地壳; MC—中地壳; LC—下地壳; MOHO—莫霍面(Mechie et al., 2004)。

a—surface elevation, station position; b—the 2-D velocity profile below the INDEPTH-III line; c—pseudo-tomographic imaging of S-wave velocity anomalies under INDEPTH-III profile, seismic model layer boundary and S-wave velocity value (km/s) (after Zhao et al., 2001), and the phase change surface of α - β quartz and two temperature interfaces, ABQT— α - β quartz transition; UC—upper crust; MC—middle crust; LC—lower crust; MOHO—Mohorovicic interface (after Mechie et al., 2004).

图 5 INDEPTH-III 剖面下的 S 波速度剖面

Fig. 5 S wave velocity profile under INDEPTH-III profile



黑折线为本文反演结果(去掉了 5 km 的地形高度), 红虚线为依据刘国成等(2014)修改后的 IASPEI91 速度模型, 蓝折线为李永华(2006a)结果; a—为拉萨地体下方 S 波速度模型; b—为班公湖—怒江缝合带下方 S 波速度模型; c—为羌塘地体下方 S 波速度模型; d—INDEPTH-III 测线下平均 S 波速度模型; LVZ—低速层。

The black broken line is the inversion result of this paper (the terrain height of 5 km was removed), the red dashed line is the modified IASPEI91 velocity model based on LIU et al. (2014), and the blue broken line is the result of LI et al. (2006a); a—the s-wave velocity model under the Lhasa terrain; b—the s-wave velocity model under the Bangong Co-Nujiang suture zone; c—the s-wave velocity model under the Qiangtang terrain; d—the average S-wave velocity model along the INDEPTH-III profile; LVZ—low-velocity zone.

图 6 INDEPTH-III 剖面所穿过的不同构造单元下的和整体的平均 S 波速度模型

Fig. 6 Average shear wave velocity model beneath various tectonic subdivisions along the INDEPTH-III profile and the whole average shear-wave velocity model

INDEPTH-III 测线下的伪层析成像 S 波速度异常结构(图 5c)中蓝色部分为 S 波速度结构速度值比 iaspei91 模型速度低的区域, 与图 5b 展示的 INDEPTH-III 台站二维速度剖面相比, 图 5c 更加地突出显示了低速层的分布特征。图 5b 和图 5c, 综合显示了在侧线中广泛分布有低速区, 低速区分布大多集中于 20~40 km 的范围内, 在 32°~32.5°之间壳内低速层出现明显不连续, 刚好位于班公湖—怒江缝合带(吴珍汉等, 2016)之下。沿 INDEPTH-III 开展的大地电磁测深结果(魏文博等, 2006)显示在羌塘地体存在相邻两个 10~70 km 的高导体, 这与本次研究结果(图 5)显示的在 32.5°~34°之间存在低速区分布特征相似, 即低速高导体。INDEPTH-III 宽频带数据计算拉萨地体北部和羌塘地体波速比(V_p/V_s)整体偏高(李永华等, 2006b)同样得出了测线下方普遍存在低速层的结果。在缝合带南部的拉萨地体相邻测线深反射结果显示 15~20 km 处出现高亮点, 拉萨地体地壳中普遍存在低速层(Nelson et al., 1996)。沿东经 88.5°剖面下的 S 波速度结构(吴蔚等, 2017)显示羌塘地体普遍存在低速层。通过与不同地球物理方法结果(Nelson et al., 1996; 贺日政, 2003; 魏文博等, 2006; 吴蔚等, 2017)对比, 显示拉萨地体和羌塘地体下存在低速层。

4 讨论

班公湖—怒江缝合带及其两侧的复杂速度结构特征(图 5)表明沿 INDEPTH-III 剖面下的拉萨地

体(北部)及羌塘地体(南部)物质结构差异明显, 如二者的平均速度结构(图 6)、壳内低速层分布特征。

4.1 拉萨地体及羌塘地体平均速度模型

将台站下方速度模型分成拉萨地体、班公怒江缝合带和羌塘地体三个区域获得平均的速度模型(图 6a, b, c), 与李永华速度模型(2006a)相比, 本文得出的低速层不仅比参考模型速度值低而且出现了速度翻转即低速区比上下区域速度值都要低。班公湖—怒江缝合带下的低速层厚度小于其两侧的拉萨地体和羌塘地体下的低速层厚度(图 5)。拉萨地体北部和羌塘地体南部普遍存在 20~40 km 低速层, 细节上有所不同(图 5), 羌塘地体低速区分布比拉萨地体内低速层较深, 可能与构造变化特征相符, 如中生代晚期就位的拉萨地体北部(潘桂棠等, 2006)、班公湖—怒江缝合带(邹长桥等, 2012; 吴珍汉等, 2016; 吴蔚等, 2017)和经过后期新生代岩浆作用(邓万明等, 1996)强烈改造的羌塘地体(吴蔚等, 2017; 严江勇等, 2019)。基于三个地体下方速度模型编制了青藏高原中部平均速度模型(图 6d), 突出显示了 INDEPTH-III 剖面下的地壳整体上可分为与全球标准模型接近的上地壳(0~20 km)、相对低速的中地壳(20~40 km)及具有强反射特征(Ross et al., 2004)的相对高速的下地壳(40~65 km)。

4.2 沿 INDEPTH-III 剖面下的低速层分布特征

INDEPTH-III 剖面下 S 波速度结构反演结果表明低速层在拉萨地体北部和羌塘地体南部是普遍存在的, 如图 5c 所示在拉萨地体北部存在一个低速区,

而羌塘地体南部存在两个低速区, 整体上与其他地球物理研究成果(Brown et al., 1996; Kind et al., 1996; Nelson et al., 1996; Wei et al., 2001; Zhao et al., 2001; 郑洪伟等, 2007; 贺日政等, 2007)相一致。此外, 图 5c 也显示拉萨地体北测和羌塘地体南侧壳内低速层横向分布并不连通, 即在班公湖—怒江缝合带处出现不连续。INDEPTH-III 项目实施的同剖面的大地电磁探测, 显示在地壳内部分布着不连续的高导体(魏文博等, 2006)。与邻近的 E88.5° 剖面结果(吴蔚等, 2017)对比, 本文结果也显示青藏高原地壳中普遍存在低速层且在羌塘盆地地下低速层横向分布并不连续(吴蔚等, 2017)。这表明青藏高原中部地壳内部低速层广泛存在但不连续分布, 推测其动力学成因不仅与寄主地体固有属性(Chang et al., 1986)有关, 而且也与青藏高原快速隆升(Yin and Harrison, 2000)相关。

地壳速度变化、物质组成与地壳温压状态有关。随着温度升高, 岩石物理状态会发生变化, 如各种干变质岩在 1000 MPa(地下 30 km)和室温条件下 S 波速度平均值为 3.65 km/s, 当温度上升达到 900℃ 以上时干地壳会塑性变化并发生熔融, 其 S 波速度会下降至 3.45 km/s(Yang et al., 2012)。在这种条件下, 由公式(4)获得的相对于改进后 iaspei91 模型的速度扰动 $LVZ=(3.45-3.75)/3.75=-8\%$; 若地壳中存在水时, 地壳的岩石发生熔融所需的温度会更低(即较低的 S 波速度和相对高的 S 波扰动)。据此推测, 图 5c 所展示的 INDEPTH-III 剖面下的中地壳扰动为-8%以下的蓝色区域发生了部分熔融。

沿 INDEPTH-III 剖面实施的深地震反射剖面调查(Haines et al., 2003)显示拉萨和羌塘地体地下的 20~30 km 处出现了跳跃的负震相, 亮点反射被解释为因部分熔融引起(Haines et al., 2003)。Mechie et al.(2004)在深地震测深速度模型(Zhao et al., 2001)基础上开展了地方震事件波形剖面速度分析, 认为该部分熔融层顶部温度突然增高(>700℃)造成了石英 α - β 相变(Mechie et al., 2004)。该低速层也与 INDEPTH-III 电磁测深剖面中的高导体(魏文博等, 2006; 金胜等, 2010)和 Lg 波衰减特征(Fan and Lay, 2002)相一致, 被解释为部分熔融层。

印度岩石圈地幔的北向俯冲(郑洪伟等, 2007)所形成的岩石圈增厚, 进而发生的断离或拆沉等构造活动产生多种生热效应(Haines et al., 2003; 金胜等, 2019), 使得地壳温度升高, 造成部分熔融(Haines et al., 2003; Ross et al., 2004)。现有的地震学研究显示北向俯冲的印度板块岩石圈地幔前缘已经俯冲至班公湖—怒江缝合带之下的 250 km 深(Kosarev et al., 1999; Zhao et al., 2001; 郑洪伟等,

2007; He et al., 2010; Liang et al., 2012; Zhang et al., 2012; Wang et al., 2019), 印度岩石圈地幔的深俯冲所产生的构造热促使班公湖—怒江缝合带南侧中下地壳温度升高导致了中地壳发生了部分熔融, 地球物理异常表现为如图 5c 所示的低速(Fan and Lay, 2002; Haines et al., 2003; Mechie et al., 2004)、高导(魏文博等, 2006; 金胜等, 2010)和亮点反射(Nelson et al., 1996; Ross et al., 2004; 卢占武等, 2014)等。

此外, INDEPTH-III 剖面下的 0~10 km 的上地壳表现为高低速异常体相间, 这与附近的 E88.5° 剖面结果(吴蔚等, 2017)相似。依据该区域的地表地质特征(王成善等, 2001; 吴珍汉等, 2016), 近地表的该低速异常体与 INDEPTH-III 剖面所经过的班戈盆地和南羌塘盆地等沉积拗陷一致, 而高速异常体与班公湖—怒江缝合带内出露蛇绿岩带分布(吴珍汉等, 2016)有很好的对应关系。

5 结论

本文计算了 INDEPTH-III 计划中分布在班公怒江缝合带两侧的 23 个宽频带地震仪采集的接收函数, 并利用时频域相位滤波(曲中党等, 2015)对数据进行滤波, 用接收函数复谱比非线性方法反演(刘启元等, 1996)获得台站下方的一维 S 波速度结构, 结合实际地质情况对低速层分布及其成因进行讨论, 获得以下认识:

南北位于班公怒江缝合带两侧的拉萨块体和羌塘块体地壳内普遍存在低速层且在缝合带处出现间断, 有些地区还存在两个低速层。上部低速层, 埋深较浅, 大多在 0~15 km 处, 这可能与羌塘盆地发育有沉积拗陷相关。位于地壳中下部的低速层可能是由于在由青藏高原隆升所致的特定温压条件下岩石发生部分熔融形成。

由于印度岩石圈地幔的俯冲产生的构造热使拉萨地体中下地壳发生部分熔融, 而羌塘地体由于印度板块的俯冲前缘进入地幔使得岩石圈地幔活化, 进而地幔热物质上涌使中下地壳的温度升高出现部分熔融。

致谢: 本文研究所用的宽频带地震观测数据从 www.iris.edu 下载。在此特别感谢 INDEPTH-III 组野外辛苦工作, 感谢中国地震局地质研究所刘启元老师提供的接收函数复谱比非线性反演程序包, 感谢审稿人的细致审阅和宝贵意见!

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41761134094, 41574086 and 41274095), National Key Research & Development Program of China (Nos. 2016YFC0600301

and 2018YFC0604102), and China Geological Survey (No. DD20190015).

参考文献:

- 常承法, 郑锡澜. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区地质构造特征以及青藏高原东西向诸山系形成的探讨[J]. 中国科学, 16(02): 82-93.
- 邓万明, 郑锡澜, 松本征夫. 1996. 青海可可西里地区新生代火山岩的岩石特征与时代[J]. 岩石矿物学杂志, 15(04): 2-11.
- 高锐. 1997. 青藏高原岩石圈结构与地球动力学的 30 个为什么[J]. 地质论评, 43(05): 460-464.
- 高星, 王卫民, 姚振兴. 2005. 中国及邻近地区地壳结构[J]. 地球物理学报, 48(03): 591-601.
- 贺日政. 2003. 青藏高原近南北向裂谷的岩石圈结构及其动力学过程[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 贺日政, 高锐, 郑洪伟, 张季生. 2007. 青藏高原中西部航磁异常的匹配滤波分析与构造意义[J]. 地球物理学报, 50(04): 1131-1140.
- 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.
- 金胜, 盛跃, 梁宏达, 魏文博, 叶高峰, 卢占武. 2019. 青藏高原申扎-双湖剖面岩石圈电性结构特征及其含义[J]. 地球科学, 44(06): 1773-1783.
- 李永华, 吴庆举, 田小波, 曾融生, 张瑞青, 李红光. 2006a. 青藏高原拉萨及羌塘块体的地壳结构研究[J]. 地震学报, 28(06): 586-595.
- 李永华, 田小波, 吴庆举, 曾融生, 张瑞青. 2006b. 青藏高原 INDEPTH-III 剖面地壳厚度与泊松比: 地质与地球物理含义[J]. 地球物理学报, 49(04): 1037-1044.
- 刘国成, 尚学峰, 贺日政, 高锐, 邹长桥, 李文辉. 2014. 藏北羌塘盆地中部莫霍面形态及其动力学成因[J]. 地球物理学报, 57(07): 2043-2053.
- 刘启元, KIND R, 李顺成. 1996. 接收函数复谱比的最大或然性估计及非线性反演[J]. 地球物理学报, 39(04): 500-511.
- 卢占武, 高锐, 王海燕, 李文辉, 李洪强. 2014. 深地震反射剖面上的“亮点”构造[J]. 地球物理学进展, 29(06): 2518-2525.
- 罗照华, 莫宣学, 侯增谦, 邓万明, 王江海, 赵志丹, 喻学惠, 李建平. 2006. 青藏高原新生代形成演化的整合模型—来自火成岩的约束[J]. 地学前缘, 13(04): 196-211.
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 2004. 班公湖—怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据[J]. 地学前缘, 11(04): 371-382.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 朱弟成, 王立全, 李光明, 赵志丹, 耿全如, 廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(03): 521-533.
- 曲中党, 吴蔚, 贺日政, 高锐. 2015. 基于 S 变换的软阈值滤波在深地震反射数据处理中的应用[J]. 地球物理学报, 58(09): 3157-3168.
- 唐菊兴. 2019. 青藏高原及邻区重要成矿带矿产资源基地调查与研究进展[J]. 岩石学报, 35(03): 617-624.
- 滕吉文, 阮小敏, 张永谦, 胡国泽, 闫亚芬. 2012. 青藏高原地壳与上地幔成层速度结构与深部层间物质的运移轨迹[J]. 岩石学报, 28(12): 4077-4100.
- 王成善. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 邓明, 谭捍东, UNSWORTH M, JONES A G, BOOKER J, LI Sheng-hui. 2006. 藏北高原地壳及上地幔导电性结构—超宽频带大地电磁测深研究结果[J]. 地球物理学报, 49(04): 1215-1225.
- 吴庆举, 曾融生. 1998. 用宽频带远震接收函数研究青藏高原的地壳结构[J]. 地球物理学报, 41(05): 669-679.
- 吴蔚, 刘启元, 贺日政, 曲中党. 2017. 羌塘盆地中部地区地壳 S 波速度结构及构造意义[J]. 地球物理学报, 60(03): 941-952.
- 吴珍汉, 赵珍, 叶培盛, 季长军. 2016. 青藏高原中部色林错—伦坡拉逆冲推覆构造系统[J]. 地球学报, 37(04): 441-448.
- 严江勇, 郑洪伟, 贺日政, 李娱兰, 李瑶, 牛潇. 2019. 藏北羌塘盆地中部地壳低速层分布与动力学意义[J]. 地球科学, 44(06): 1784-1796.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化—显生宙亚洲大陆生长[J]. 地球学报, 22(03): 193-230.
- 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 赵大鹏, 贺日政. 2007. 印度板块岩石圈地幔向北俯冲到羌塘地体之下的远震 P 波层析成像证据[J]. 地球物理学报, 50(05): 1418-1426.
- 邹长桥, 贺日政, 高锐, 张智, 郑洪伟. 2012. 远震 P 波层析成像研究羌塘中央隆起带深部结构[J]. 科学通报, 57(28-29): 2729-2739.

References:

- AMMON C J, RANDALL G E, ZANDT G. 1990. On the non-uniqueness of Receiver function inversions[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 95(B10): 15303-15318.
- BROWN L D, ZHAO W J, NELSON K D, HAUCK M, ALSDORF D, ROSS A, COGAN M, CLARK M, LIU Xian-wen, CHE Jin-kai. 1996. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling[J]. Science, 274(06): 1688-1690.
- CHANG Cheng-fa, ZHENG Xi-lan. 1973. The geological tectonic characteristics of the Qomolangma region in south Tibet of China and the formation of east-west mountain series on the Qinghai-Tibet plateau[J]. Science in China, 16(02): 82-93(in Chinese).
- CHANG Cheng-fa, CHEN Nan-sheng, COWARD M P, DENG Wang-ming, DEWEY J F, GANSSER A, HARRIS N B W, JIN Cheng-wei, KIDD W S F, LEEDER M R, LI-Huan, LIN Jin-lu, LIU Cheng-jie, MEI Hou-jun, Molnar P, PAN Yun, PAN Yu-sheng, PEARCE J A, SHACKLETON R M, SMITH A B, SUN Yi-yin, WARD M, WATTS D R, XU Jun-tao, XU Rong-hua, YIN Ji-xiang, ZHANG Yu-quan. 1986. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 geotraverse of Tibet[J]. Nature, 323(09): 501-507.
- DENG Wan-ming, ZHENG Xi-lan, MATSUMOTO Y. 1996. Petrological characteristics and ages of Cenozoic volcanic rocks from the Hoh Xil Mts., Qinghai Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 15(4): 289-298(in Chinese with English abstract).
- DEWEY J F, BURKE K C A. 1973. Tibetan, Variscan, and Precambrian basement reactivation: products of continental collision[J]. Journal of Geology, 81(06): 683-692.
- ENGLAND P, HOUSEMAN G. 1986. Finite strain calculations of continental deformation: Comparison with the India-Asia collision zone[J]. Journal of geophysical research solid earth, 91(B3): 3664-3676.
- FAN Guang-wei, LAY T. 2002. Characteristics of Lg attenuation in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 107(B10): 2256.
- GAO Rui. 1997. Thirty problems of the lithospheric structure and geodynamics in the Qinghaai-xizang Plateau[J]. Geological Review, 43(5): 460-464(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui, LU Zhan-wu, LI Qiu-sheng, GUAN Ye, ZHANG Ji-sheng, HE Ri-zheng, HUANG Li-huang. 2005. Geophysical survey and geodynamic study of crust and upper mantle in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Episodes, 28(04): 263-273.

- GAO Rui, CHEN Chen, LU Zhan-wu, BROWN L B, XIONG Xiao-song, LI Wen-hui, DENG Gong. 2013. New constraints on crustal structure and Moho topography in Central Tibet revealed by SinoProbe deep seismic reflection profiling[J]. *Tectonophysics*, 606: 160-170.
- GAO Xing, WANG Wei-min, YAO Zhen-xing. 2005. Crustal structure of China mainland and its adjacent regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(3): 591-601(in Chinese with English abstract).
- HAINES S S, KLEMPERER S L, BROWN L, JINGRU G, MECHIE J, MEISSNER R, ROSS A, WEN J Z. 2003. INDEPTH III seismic Data: from surface observations to deep crustal processes in Tibet[J]. *Tectonics*, 22(01): 1001-1017.
- HE Ri-zheng. 2003. Lithospheric structure of near north-south striking rifts in Tibet Plateau and its geodynamical process[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- HE Ri-zheng, GAO Rui, ZHENG Hong-wei, ZHANG Ji-sheng. 2007. Matched-filter analysis of aeromagnetic anomaly in mid-western Tibetan Plateau and its tectonic implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(04): 1131-1140(in Chinese with English abstract).
- HE Ri-zheng, ZHAO Da-peng, GAO Rui, ZHENG Hong-wei. 2010. Tracing the Indian lithospheric mantle beneath central Tibetan Plateau using teleseismic tomography[J]. *Tectonophysics*, 491(1-4): 230-243.
- HE Ri-zheng, LIU Guo-cheng, GOLOS E, GAO Rui, ZHENG Hong-wei. 2014. Isostatic gravity anomaly, lithospheric scale density structure of the northern Tibetan plateau and geodynamic causes for potassic lava eruption in Neogene[J]. *Tectonophysics*, 628: 218-227.
- JIN Sheng, WEI Wen-bo, WANG Shuo, YE Gao-feng, DENG Ming, TAN Han-dong. 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 with English abstract).
- JIN Sheng, SHENG Yue, LIANG Hong-da, WEI Wen-bo, YE Gao-feng, LU Zhan-wu. 2019. Lithospheric electrical structure along Shenzha-Shuanghu profile in Tibetan plateau and its significance[J]. *Earth Science*, 44(06): 1773-1783(in Chinese with English abstract).
- KIND R, NI J, ZHAO Wen-jin, WU Jian-xin, YUAN Xiao-hui, ZHAO Lian-she, SANDVOL E, REESE C, NABELEK J, HEARM T. 1996. Evidence from Earthquake data for a Partially Molten crustal layer in Southern Tibet[J]. *Science*, 274(6): 1692-1694.
- KOSAREV G, KIND R, SOBOLEV S V, YUAN X, HANKA W, ORESKIN S. 1999. Seismic Evidence for a Detached Indian Lithospheric Mantle Beneath Tibet[J]. *Science*, 283(5406): 1306-1309.
- LANGSTON C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 84(B9): 4749-4762.
- LI Yong-hua, WU Qing-ju, TIAN Xiao-bo, ZENG Rong-sheng, ZHANG Rui-qing, LI Hong-guang. 2006a. The crustal structure beneath Qiangtang and Lhasa terrane from receiver function[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(06): 586-595(in Chinese with English abstract).
- LI Yong-hua, TIAN Xiao-bo, WU Qing-ju, ZENG Rong-sheng, ZHANG Rui-qing. 2006b. The Poisson ratio and crustal structure of the central Qinghai-Xizang inferred from INDEPTH-III teleseismic waveforms: Geological and geophysical implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(4): 1037-1044(in Chinese with English abstract).
- LIANG Xiao-feng, SANDVOL E, CHEN Y J, HEARN T, NI J, KLEMPERER S, SHEN Yang, TILMAANN F. 2012. A complex Tibetan upper mantle: A fragmented Indian slab and no south-verging subduction of Eurasian lithosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 333-334: 101-111.
- LIU Guo-cheng, SHANG Xue-feng, HE Ri-zheng, GAO Rui, ZOU Chang-qiao, LI Wen-hui. 2014. Topography of Moho beneath the central Qiangtang in North Tibet and its geodynamic implication[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(07): 2043-2053(in Chinese with English abstract).
- LIU Qi-yuan, KIND R, LI Shun-cheng. 1996. Maximal Likelihood estimation and nonlinear inversion of the complex receiver function spectrum ratio[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 39(04): 500-511(in Chinese with English abstract).
- LU Zhan-wu, GAO Rui, WANG Hai-yan, LI Wen-hui, LI Hong-qiang. 2014. Bright spots in deep seismic reflection profiles[J]. *Progress in Geophysics*, 29(06): 2518-2525(in Chinese with English abstract).
- LUO Zhao-hua, MO Xuan-xue, HOU Zeng-qian, DENG Wang-ming, WANG Jiang-hai, ZHAO Zhi-dan, YU Xue-hui, LI Jian-ping. 2006. An integrated model for the Cenozoic evolution of the Tibetan plateau: constraints from igneous rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(04): 196-211(in Chinese with English abstract).
- MECHIE J, SOBOLEV S V, RATSCHBACHER L, BABEYKO A Y, BOCK G, JONES A G, NELSON K D, SOLON K D, BROWN L D, ZHAO W. 2004. Precise temperature estimation in the Tibetan crust from seismic detection of the α - β quartz transition[J]. *Geology*, 32(07): 601-604.
- MOLNAR P, TAPPONNIER P. 1977. The Collision between India and Eurasia[J]. *Scientific American*, 236(04): 30-41.
- NELSON K D, ZHAO W, BROWN L D, KUO J, CHE J, LIU X, KLEMPERER S L, MAKOVSKY Y, MEISSNER R, MECHIE J, KIND R, WENZEL F, NI J, NABELEK J, LESHOU C, TAN H, WEI W, JONES A G, BOOKER J, UNSWORTH M, KIDD W S F, HAUCK M, ALSDORF D, COGAN R M, WU C, SANDVOL E, EDWARDS M. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results[J]. *Science*, 274(5293): 1684-1688.
- OWENS T J, ZANDT G. 1997. Implications of crustal property variations for model of Tibetan plateau evolution[J]. *Nature*, 387: 37-43.
- PAN Gui-tang, ZHU Di-cheng, WANG Li-quan, LIAO Zhong-li, GENG Quan-ru, JIANG Xin-sheng. 2004. Bangong Lake-Nu River suture zone-the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(04): 371-382(in Chinese with English abstract).
- PAN Gui-tang, MO Xuan-xue, HOU Zeng-qian, ZHU Di-cheng, WANG Li-quan, LI Guang-ming, ZHAO Zhi-dan, GENG Quan-ru, LIAO Zhong-li. 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(03): 521-533(in Chinese with English abstract).
- QU Zhong-dang, WU Wei, HE Ri-zheng, GAO Rui. 2015. Soft threshold filter based on S transform and its application to data processing of deep seismic reflection[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(09): 3157-3168(in Chinese with English abstract).
- ROGER F, TAPPONNIER P, ARNAUD N, SCHARER U, BRUNEL M, XU Z, YANG J. 2000. An Eocene magmatic

- belt across central Tibet: mantle subduction triggered by the Indian collision?[J]. *Terra Nova*, 12(03): 102-108.
- ROSS A R, BROWN L D, PANANONT P, NELSON K D, KLEMPERER S, HAINES S, WENJIN Z, JINGRU G. 2004. Deep reflection surveying in central Tibet: lower-crustal layering and crustal flow[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 156(01): 115-128.
- SHIBUTANI T, SAMBRIDGE M, KENNETT B. 1996. Genetic algorithm inversion for receiver functions with application to crust and uppermost mantle structure beneath Eastern Australia[J]. *Geophysical Research Letters*, 23(14): 1829-1832.
- TANG Ju-xing. 2019. Mineral resources base investigation and research status of the Tibet Plateau and its adjacent major metallogenic belts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(03): 617-624(in Chinese with English abstract).
- TAPPONNIER P, XU Zhi-qin, ROGER F, MEYER B, ARNAUD N, WITTLINGER G, YANG Jing-sui. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- TENG Ji-wen, YUAN Xiao-min, ZHANG Yong-qian, HU Guo-ze, YAN Ya-fen. 2012. The stratification velocity structure of crust and covering strata of upper mantle and the orbit of deep interaquer substance locus of movement for Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4077-4100(in Chinese with English abstract).
- TIAN Xiao-bo, WU Qing-ju, ZHANG Zhong-jie, TENG Ji-wen, ZENG Rong-sheng. 2005. Joint imaging by teleseismic converted and multiple waves and its application in the INDEPTH-III passive seismic array[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(10): 1029-2005.
- TILMANN F, NI J, INDEPTH-III Seismic Team. 2003. Seismic imaging of the downwelling Indian Lithosphere Beneath Central Tibet[J]. *Science*, 300(5624): 1424-1427.
- WANG Cheng-shan. 2001. Geological of Qiangtang basin in Tibet and Gas Exploration Prospects[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Ze-wei, ZHAO Da-peng, GAO Rui, HUA Yuan-yuan. 2019. Complex subduction beneath the Tibetan plateau: A slab warping model[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 292: 42-54.
- WEI Wen-bo, UNSWORTH M, JONES A, BOOKER J, TAN H, NELSON D, CHEN L, LI S, SOLON K, JIN S, DENG M, LEDO J, KAY D, ROBERTS B. 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies[J]. *Science*, 292(5517): 716-718.
- WEI Wen-bo, JIN Sheng, YE Gao-feng, DENG Ming, TAN Han-dong, UNSWORTH M, JONES A G, BOOKER J, LI Sheng-hui. 2006. Conductivity structure of crust and upper mantle beneath the northern Tibetan Plateau: Results of super-wide band magnetotelluric sounding[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(04): 1215-1225(in Chinese with English abstract).
- WU Qing-ju, ZENG Rong-sheng. 1998. The crustal structure of Qinghai-Xizang plateau inferred from broadband teleseismic waveform[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 41(05): 669-679(in Chinese with English abstract).
- WU Wei, LIU Qi-yuan, HE Ri-zheng, QU Zhong-dang. 2017. Waveform inversion of S-wave velocity model in the central Qiangtang in North Tibet and its geological implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(03): 941-952(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, ZHAO Zhen, YE Pei-sheng, JI Chang-jun. 2016. The Siling Co-Lunpola thrust systems in the central Tibetan plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(04): 441-448(in Chinese with English abstract).
- YANG Yin-jie, RITZWOLLER M H, ZHENG Yong, SHEN Wei-sen, LEVSHIN A L, XIE Zu-jun. 2012. A synoptic view of the distribution and connectivity of the mid-crustal low velocity zone beneath Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 117(B4).
- YAN Jiang-yong, ZHENG Hong-wei, HE Ri-zheng, LI Yu-lan, LI Yao, NIU Xiao. 2019. Low velocity layer investigation in central Qiangtang in north Tibet and its dynamic implications[J]. *Earth Science*, 44(06): 1784-1796(in Chinese with English abstract).
- YIN An, HARRISON M T. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 28(28): 211-280.
- YIN An. 2001. The geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen-phanerozoic growth of Asian continent[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 22(03): 193-230(in Chinese with English abstract).
- YU Chun-quan, ZHENG Ying-cai, SHANG Xue-feng. 2017. Crazyseismic: A MATLAB GUI-based software package for passive seismic data preprocessing[J]. *Seismological Research Letters*, 88(2A): 410-415.
- ZHANG Heng, Zhao Da-peng, ZHAO Jun-meng, XU Qiang. 2012. Convergence of the Indian and Eurasian plates under eastern Tibet revealed by seismic tomography[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 13(6): Q06W14.
- ZHAO Da-peng, HASEQAWA A, HORIUCHI S. 1992. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 97(19): 909-928.
- ZHAO Da-peng, HASEQAWA A, KANAMORI H. 1994. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional and teleseismic events[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(22): 313-329.
- ZHAO Da-peng. 2009. Multiscale seismic tomography and mantle dynamics[J]. *Gondwana Research*, 15(3-4): 297-323.
- ZHAO Wen-jin, MECHIE J, BROWN L D, GUO J, HAINES S, HEARN T, KLEMPERER S L, MA Y S, MEISSNER R, NELSON K D, NI J F, PANANONT P, RAPINE R, ROSS A, SAUL J. 2001. Crustal structure of the central Tibet as derived from project INDEPTH wide-angle seismic data[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 145(2): 486-498.
- ZHENG Hong-wei, LI Ting-dong, GAO Rui, ZHAO Da-peng, HE Ri-zheng. 2007. Teleseismic P-wave tomography evidence for the Indian lithospheric mantle subducting northward beneath the Qiangtang terrane[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 50(5): 1418-1426(in Chinese with English abstract).
- ZHU Lu-pei, KANAMORI H. 2000. Moho depth variation in southern California from teleseismic receiver functions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 105(B2): 2969-2980.
- ZOU Chang-qiao, HE Ri-zheng, GAO Rui, ZHANG Zhi, ZHENG Hong-wei. 2012. Deep structure of the central uplift belt in the Qiangtang terrane Tibetan Plateau from teleseismic P-wave tomography[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(28-29): 2729-2739(in Chinese with English abstract).