

·学术讨论·

印度板块的北缘在哪里?

刘 葵¹, 赵文津², 江 万¹, 吴珍汉¹LIU Kui¹, ZHAO Wen-jin², JIANG Wan¹, WU Zhen-han¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质科学院, 北京 100037

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*2. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

摘要:通过对INDEPTH II在雅鲁藏布江南的2条南北向深地震反射剖面资料的进一步处理,观察到主喜马拉雅逆冲断裂带(MHT)形成的反射向北逐渐倾没于藏南地壳之下。这一反射一直可延伸至康马穹隆北、浪卡子南,在向北延伸的过程中,断裂带向北倾角逐渐加大,可以看到MHT反射最北端的反射同相轴向北倾斜的角度到达 $27^{\circ}30' \sim 29^{\circ}$,最深处的双程走时达到22.5s左右。根据深地震反射资料并结合大地电磁(MT)资料,提出印度板块在雅鲁藏布江南30~40 km(大约 $28^{\circ}50'N$)处沿MHT俯冲到了藏南的地壳之下,即在地壳范围内印度板块的最北部边缘位于雅鲁藏布江南30~40 km处。

关键词:主喜马拉雅逆冲断裂带(MHT);印度板块北缘;深地震反射

中图分类号: P542^{+.4}

文献标识码: A

文章编号: 1671-2552(2006)01~02-0043-05

Liu K, Zhao W J, Jiang W, Wu Z H. Where is the northern margin of the Indian plate? *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1-2):43-47

Abstract: The mid-crustal reflection formed by the Main Himalayan Thrust (MHT) is interpreted to be underthrust gradually northward beneath the crust of southern Tibet by intensive processing of the data of two N-S-trending deep seismic reflection profiles on the southern side of the Yarlung Zangbo River obtained by Project INDEPTH II in 1993. This reflection may extend northward beneath north of the Kangmar dome and south of Langkazi. During its northward extension, the dip angle of the thrust increases progressively. The north-dip angle of the reflection line-up at the northernmost end of the MHT reflection reaches $27^{\circ}30' \sim 29^{\circ}$ and the two-way travel time at the deepest part is up to ~ 22.5 s. According to the deep seismic reflection data, combined with magnetotelluric (MT) data, this paper proposes that the Indian plate has been subducted along the MHT beneath the crust of southern Tibet at a site 30-40 km south of the Yarlung Zangbo River ($\sim 28^{\circ}50'N$), i.e. the northernmost portion of the Indian plate within the crustal scope lies 30-40 km south of the Yarlung Zangbo River.

Key words: Main Himalaya Thrust (MHT); northern margin of the Indian plate; deep seismic reflection

主喜马拉雅逆冲断裂带MHT和藏南的Moho是由赵文津^[1]及INDEPTH项目研究人员1993年发现的,并在当年的《自然》杂志上发表了文章。这一发现在地学界引起了极大的反响,尤其对西藏地区的深部工作起到了很大的推动作用,为藏南的深部构造研究提供了重要依据。虽然当时只观察到了MHT及部分Moho的反射,却激励了美国自然科学基金(NSF)提供经费与原地质矿产部联合支持在INDEPTH I的

北侧开展INDEPTH II的工作。INDEPTH II的深反射地震剖面的主要目的是调查MHT、Moho和西藏高原中部上地幔向北的延伸,但INDEPTH II的深地震反射剖面没有达到目标,观察到的反射主要集中在浅层,唯一的深反射是MHT向北延伸到Tib3的最北侧、康马穹隆下达到了15 s的双程走时^[2]。虽然1993年就发现了MHT的存在,但其向北的延伸情况没有确切的答案,众多的科学家对此给出了不同的推论^[3-7]。为了

收稿日期:2005-07-18;修订日期:2005-11-09

地调项目:中国地质调查局地质调查项目《西藏腹心地带地质资源调查综合评价》(200313000062)资助。

作者简介:刘葵(1968-),女,副研究员,从事勘探地球物理与深部探测研究。E-mail: xizang@vip.sina.com

深入分析MHT向北的走向问题,作者对INDEPTH II阶段的2条深地震反射测线Tib3、Tib5进行了深入的处理。本文给出新处理的深地震反射结果,并结合INDEPTH I和MT结果对印度板块北缘问题进行了讨论。

1 工区的工作背景

INDEPTH项目工作组在1993—1994年开展的I、II阶段工作中做了大量的深反射地震工作,在雅鲁藏布江南做了Tib1、2、3、4、5线(图1)。1993年,赵文津等^[1]在地震剖面Tib1线上发现了MHT的反射,这组强反射位于中地壳,延伸于整个剖面,向北缓倾斜(9~13s双程走时),平均倾角 $9^{\circ}\pm 2^{\circ}$,剖面南端的反射在 (28 ± 1) km深处,北端为 (40 ± 1) km深处。本次研究工作对Tib1北的Tib3、Tib5线做了重新处理和解释。

INDEPTH项目工作组在1995年开展了从亚东—雪古拉的大地电磁(MT)工作,该测线简称MT-100,测线的位置与深反射地震剖面Tib1、Tib3、Tib5近似重合或近似平行。

2 深反射地震资料的处理方法及陡倾角问题探讨

2.1 深反射地震剖面处理方法

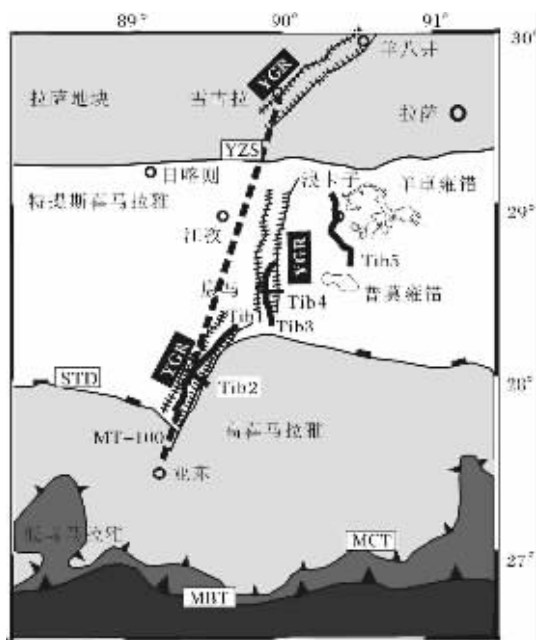


图1 INDEPTH取得的地震深反射Tib1、Tib3、Tib5和大地电磁MT-100测线的位置

Fig.1 Generalized geological map showing the location of deep seismic reflections Tib1, Tib3 and Tib5 and MT line 100 obtained by INDEPTH

MBT—主边界逆冲断裂(Main Boundary Thrust);MCT—主中央逆冲断裂(Main Central Thrust);STD—藏南拆离系(South Tibetan Detachment);YZS—雅鲁藏布江缝合带(Yarlung Zangbo Suture);YGR—亚东—谷露裂谷(Yadong-Gulu Rift)

本次处理主要是在PC机群的Omega地震资料处理系统上进行的,同时结合了Grisys和Focus的优秀去噪模块。野外采集参数采用炸药震源,记录长度50 s,采样率4 ms,偏移距200 m,道间距25 m,炮间距200 m,接收道数240道,覆盖次数15次。Tib3线177炮、Tib5线265炮,共计437炮。Tib3线和Tib5线的长度分别为41.575 km和60 km,最终可实现的处理长度为37.75 km和47.725 km。

整个处理过程中应用了弯线定义、静校正计算、球面扩散补偿,叠前、叠后地表一致性振幅补偿处理,地表一致性反褶积,叠前去噪处理,叠前振幅均衡,速度分析和剩余静校正,陡倾角偏移,面波和线性噪声的压制,以及为突出大的区域构造进行滤波比例试验。基本处理参数有:采样率4 ms,记录长度50 s,基准面高程4200 m,弯线CDP面元为 $12.5\text{ m}\times 300\text{ m}$ (即沿测线方向12.5 m,垂直测线方向300 m)。

2.2 陡倾角反射问题分析

深反射地震剖面上可观测到的最大地层倾角应满足公式^[8]: $\theta_{\max} \leq \text{tg}^{-1}(P/(1/2) \cdot v \cdot t_x)$ 。其中跨度 P 为倾斜界面反射点 R 在地面的投影点 O 相对于剖面边缘的横向距离, v 为地层速度, t_x 为双程走时, θ 为地层倾角, L 为同相轴的横向位移。随着地层倾角 θ 的增大, L 趋于 P ,当 $L=P$ 时,所对应的地层倾角为能观察到的地层的最大倾角 $\theta_{\max}$ (图2)。

在本次研究中,测线Tib5是长为60 km,记录长度为50 s的剖面,可以计算出当双程走时深度为22.5 s、地层速度为7.5 km/s时,可识别的地层最大倾角为 35° 。这就是说,在Tib5

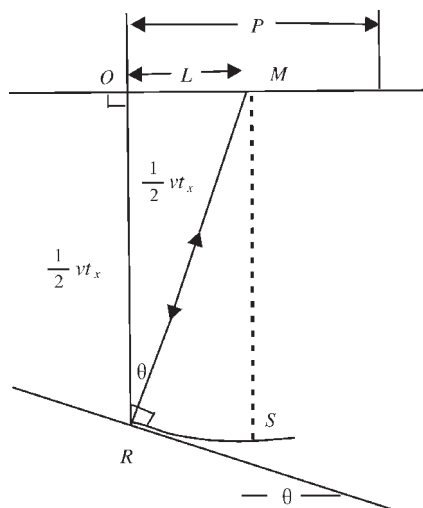


图2 地层倾角对深反射地震剖面可信度的影响
(据参考文献[8]修改)

Fig.2 Influence of the dip angle of the strata on the level of confidence of the deep seismic reflection profile
 L —同相轴的横向位置; θ —地层倾角; S —偏移前反射点位置;
 R —偏移后反射点位置; M —接受点位置; P —倾斜界面反射点 R 在地面的投影点 O 相对于剖面边缘的横向距离;
 v —地层速度, t_x —双程走时

线上当双程走时为22.5 s的深度时, 可以识别出角度小于35°的倾斜地层,双程走时越小可识别出的最大地层倾角越大。

3 深反射地震剖面解释

Tib1与Tib3、Tib5线的深反射地震剖面 and 解释的对比见

图3。在Tib1上可以看到一组北倾的连续的强反射振幅的波组,即主喜马拉雅逆冲断裂带(MHT)是逐渐向北缓倾的,其深度位于9(南)~13(北)s双程走时。从处理后的深反射剖面上可以看到,Tib3线上南端13 s处存在与Tib1线的MHT相对应的反射波组。反射波组沿Tib3线向北在Tib3的北端到达双程

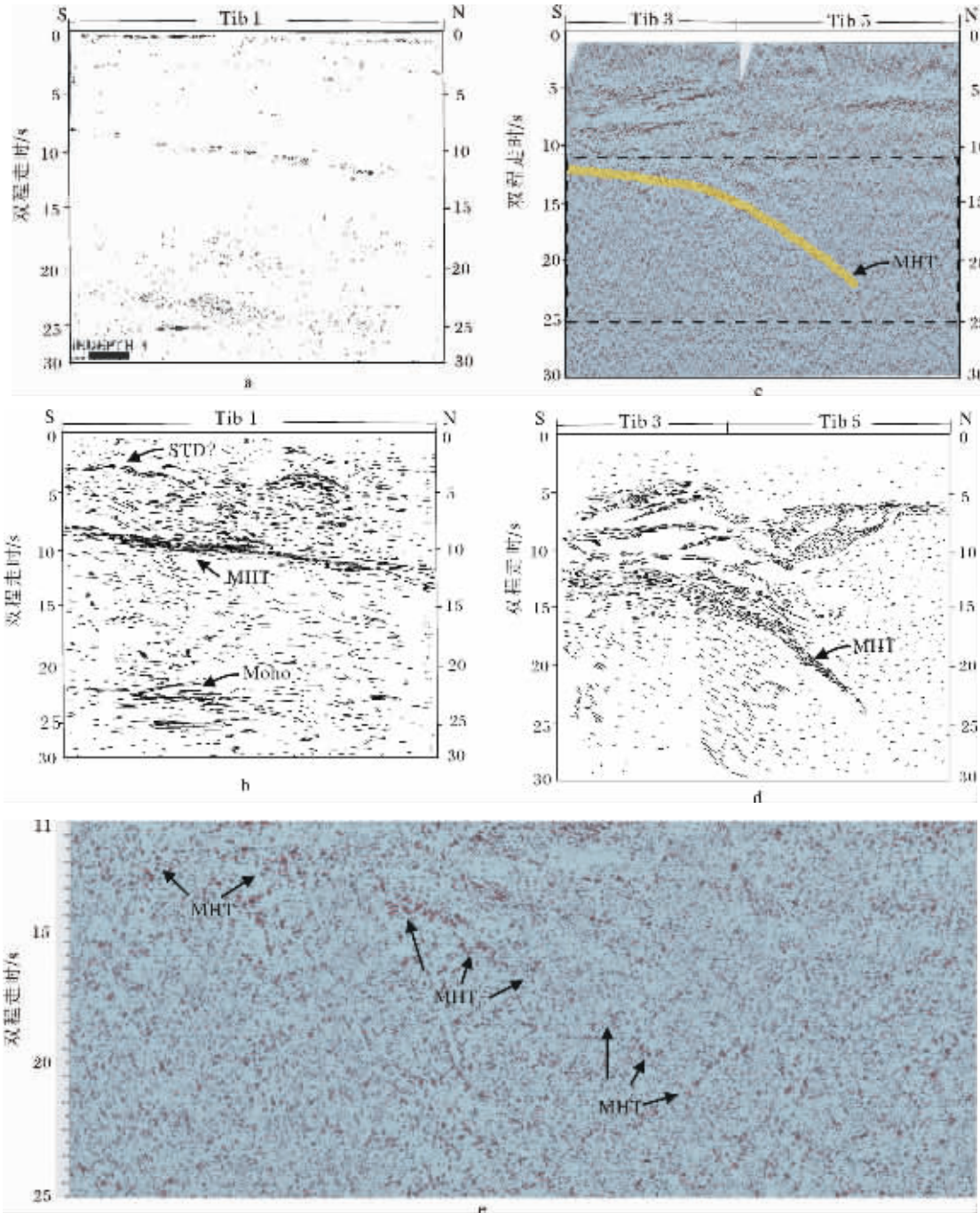


图3 Tib1、Tib3、Tib5的深反射地震剖面 and 解释

Fig.3 Deep seismic reflection profile of Tib1, Tib3 and Tib5 and its interpretations
其中a、b根据参考文献[1]中的图2修改(假定30 s以上的地壳平均速度为6 km/s,纵横比例为1:1);c、d是其北侧的Tib3、Tib5的0~30 s的深反射地震剖面 and 相应的解释;e是深反射地震剖面Tib3、Tib5的局部放大显示

走时15~16 s深度,并在这一深度与北侧的Tib5线相连接,向北追踪这一组反射同相轴可达到双程走时22.5 s深度处。这组强反射波组在向北延伸的过程中,反射振幅逐渐减弱,连续性变差。在Tib3线上的反射波组连续性好、振幅强,到了Tib5线后连续性变差,从中等连续到断续,振幅强度逐渐减弱,但仍然存在较明显的延续方向。在Tib3上其双程走时深度是13(南)~15~16(北)s,在Tib5线上的双程走时深度是15.5(南)~22.5(北)s。虽然在解释中认为,在Tib5线上MHT的反射波组北端最深达22.5s双程走时,但在22.5s双程走时深度以下仍可找到同相轴的延续方向,这种延续的反射可以隐约达到24.5s。考虑到反射波组的可靠性问题,这里研究的MHT的反射波组只取到波组相干性较好的22.5 s以上的位置。

主喜马拉雅逆冲断裂带(MHT)反射波组在Tib3、Tib5线的100 km范围内双程走时深度加深了9.5 s。若采用6.0~6.4 km/s作为地壳平均速度,在这100 km范围内MHT向下延伸到了67.5~72 km,深度增加了28.5~30.4 km,平均倾角达到15°50'~16°50',远远大于Tib1上看到的9°的倾角。在剖面中可以看到MHT向北延伸,在南端以一个较小的倾角向北倾斜,向北端倾角逐渐加大,在Tib3线上的倾角大约为11°~12°,在Tib5线上观察到的倾角可达27°30'~29°,最北端位于雅鲁藏布江南约40 km处,深度可以达到双程走时22.5 s。

从主喜马拉雅逆冲断裂带(MHT)反射波组在Tib1、3、5线上向北延伸的反射波组的特征可以看到,其倾角向北越来越大,在Tib3线上从9°逐渐增加到11°~12°,在Tib5线上迅速增加到近30°。MHT北端可信的深反射信号最深达到了70 km深度左右,这一深度到达了已公布的利用长周期台站计算出来的藏南的Moho深度65~82 km^[9-12]。从倾角的变化特征和最深的反射信号的位置可以推断,在地壳范围内,印度板块向欧亚板块俯冲的前缘就在这里。虽然本次研究的深地震反射剖面的长度,不足以在偏移剖面上看到双程走时大于22.5 s、倾角大于29°的来自更深处的可信的倾斜反射波组特征,但通过MHT的倾角变化特征及其可观察到的最大深度可以断定,MHT会以不低于29°的倾角向北俯冲。如果Moho深度达到80 km,MHT也必然在雅鲁藏布江南30~40 km以南就已经浸没于藏南的Moho之下了。这就是说,在地壳范围内印度板块的北缘在雅鲁藏布江南30~40 km。

4 MT-100线的解释

从MT-100线亚东-雪古拉剖面的电阻率模型^[13]可以明显地看到,在剖面断面的南端,地壳和上地幔顶部为高阻体,但在大约30 km深度处存在一组明显的电性梯度带,它以低角度向北缓倾,延伸到30号测点后角度开始变陡,与地震深

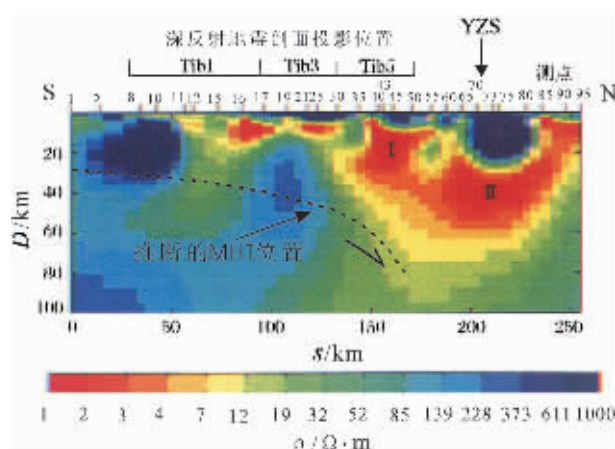


图4 亚东-雪古拉电阻率模型

Fig.4 Resistivity model of Yadong-Xuegula

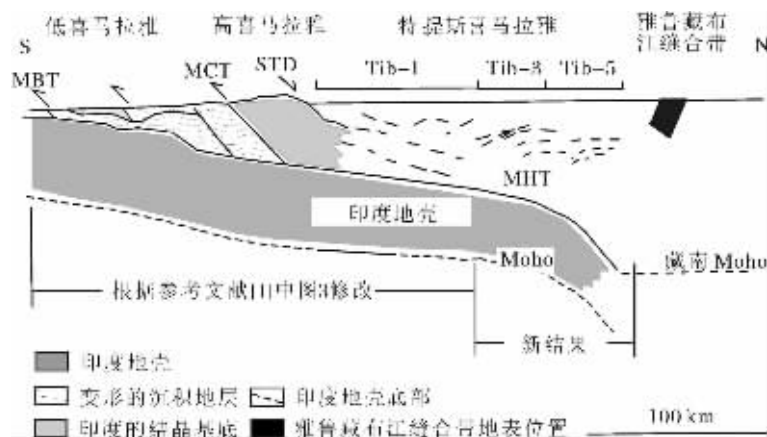


图5 根据Tib1、Tib3、Tib5和MT-100线的结果绘制的印度板块向欧亚大陆俯冲的模式

Fig.5 Model of subduction of the Indian plate beneath the Eurasian plate constructed according to deep seismic reflections

Tib1, Tib3 and Tib5 and MT line 100

反射的结果比较后发现,这个梯度带与MHT的位置基本一致。如图4中的虚线所示,MHT在南边沿高阻体的中心向北延伸,在雅鲁藏布江南30~40 km(45号测点附近)俯冲于藏南地壳之下,这与深地震反射剖面解释得到的结论是一致的。在剖面断面的北端,地壳是明显的高导体(图4中的I、II),这可能是印度板块向北的俯冲作用造成的。

5 推论

图5是对参考文献[1]中的模式的简单修改,修改后明确了MHT向北的延伸方向和印度板块向北俯冲的方向。

通过对深地震反射剖面的解释和大地电磁资料的分析,可以看到MHT在雅鲁藏布江南侧30~40 km处已经浸没在藏南的Moho之下,并可以推断印度板块沿MHT向欧亚板块俯

冲。印度板块沿MHT向欧亚板块俯冲的过程中受到欧亚大陆的阻挡,在雅鲁藏布江南30~40 km处俯冲到藏南的Moho之下,同时由于挤压作用,在雅鲁藏布江缝合带南面又逐渐在其上形成了MCT、MBT、MFT等一系列的逆冲断裂。

致谢:在研究工作中,魏文博教授在大地电磁成果解释方面给予指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1]Zhao wenjin, Nelson K D, Project Indepth Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet[J]. Nature, 1993, 366: 557-559.

[2]Brown L D, Zhao wenjin, Nelson K D, et al. Bright spots, structure, and magmatism in Southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling[J]. Science, 1996, 274(6):1688-1690.

[3]Makovsky Y, Klemperer S L. Structural elements of the southern Tethyan Himalaya crust from wide-angle seismic data[J]. Tectonics, 1996, 15(5):997-1005.

[4]Makovsky Y, Klemperer S L, Ratschbacher L, et al. Midcrustal reflector on INDEPTH wide-angle profiles—an ophiolitic slab beneath the India-Asia suture in Southern Tibet [J]. Tectonics, 1999, 18(5): 793-808.

[5]Nelson K D, Zhao wenjin, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath Southern Tibet: Synthesis of Project IN-

DEPTH results[J]. Science, 1996, 274(6): 1684-1688.

[6]Owens T J, Zandt G. Implication of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution[J]. Nature, 1997, 387: 37-43.

[7]Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671-1677.

[8]徐明才,高景华.关于深反射地震剖面采集参数的讨论[J].物探与化探,1994,18(2):113-120.

[9]Kind R, Ni J, Zhao Wenjin. Evidence from earthquake data for a partially molten crustal layer in southern Tibet[J]. Science, 1996, 274: 1692-1694.

[10]Zeng Rongsheng, Ding Zhifeng, Wu Qingju. A review on the lithospheric structures in the Tibetan Plateau and constrains for dynamics[J]. PAGEOPH, 1995, 145: 425-443.

[11]Yuan Xiaohui, Ni J, Kind R, et al. Lithospheric and upper mantle structure of southern Tibet from a seismological passive source experiment[J]. Geophys. Res., 1992, 102(B12): 27491-27500.

[12]赵文津及INDEPTH项目组.喜马拉雅山及雅鲁藏布江缝合带深部结构与构造研究[M].北京:地质出版社,2001.

[13]谭捍东,魏文博,Martyn Unsworth,等.西藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地区地壳典型结构研究[J].地球物理学报,2004,47(4): 685-690.