

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

地震层析对印度板块向北俯冲的认识

薛光琦¹⁾, 宿和平²⁾, 钱辉²⁾, 姜枚²⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要: 通过对中美合作 Hi-CLIMB 项目在尼泊尔境内及西藏萨嘎以南采集的宽频地震数据的分析研究, 笔者用远震层析反演方法对喜马拉雅—西藏碰撞带之下一些关键地段的关键性深部信息进行探讨, 进一步证实印度板块在向北俯冲时, 引发最剧烈的构造变形发生在其前缘并展示了向北缓倾的主边界断裂(MBT)和3次出现在剖面上的主中央断裂(MCT)的赋存特征; 另外, 自尼泊尔南缘至雅鲁藏布江断裂处有一条向北缓倾的界面, 南端深为10km左右, 北端约为25km; 由于俯冲、挤压和缩短造成了高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅地壳增厚并由此造成了热地壳以及壳内局部熔融存在的现实。

关键词: 喜马拉雅; 逆冲断裂; 地震; 速度

从地质科学出现以来, 大陆的成因和演化问题就一直一直是地学家关注的对象。由于喜马拉雅和青藏高原南部形成的时限很新, 边界条件和动力学约束条件相对简单明确, 又完整记录了大陆碰撞的全部过程, 因此它是认识地球本身奥秘的关键地区之一, 被誉为大陆动力学研究的野外实验室, 其大陆动力学模式已被广泛应用于解释发生在全球其它地区的古今大陆演化。

国内外地学界多认为青藏高原是由众多地体由南而北相继拼合而成, 其间多被蛇绿混杂岩分隔开(肖序常等, 1988); 发现印度板块被动大陆边缘发生大规模拆离, 形成藏南拆离系(以下简称 STD)(Burg et al., 1994; Chen et al., 1990); 揭示了青藏高原上地幔塑性流动变形及对地壳变形的控制(曾融生等, 1992)等。以赵文津和 Nelson 为首的地球物理、地质学家自 1992 年以来采用高分辨深反射地震探测以及广角地震、新一代大地电磁测深等当代一流的技术与方法对喜马拉雅及青藏高原进行了新一轮的深部综合探测研究(INDEPTH 计划), 取得了非常丰富的研究成果(赵文津等, 2001), 尤其是发现在喜马拉雅构造带之下存在一个强反射带, 为一低速拆离带, 相当于一个陆内俯冲带, 称之为喜马拉雅主逆冲断裂(以下简称为 MHT), 证明印度大陆地壳确实向北向下俯冲。时至今日, 仍有不少多国合作

项目在探索高原隆升的奥秘(Vera Schulte-Pelkum, 2005)。

中国地质科学院与美国伊利诺大学和美国俄勒冈大学共同承担的 Hi-CLIMB 项目完成了一条贯穿低、高、特提斯喜马拉雅的宽频带地震探测剖面(自尼泊尔南界的比尔根杰至西藏腹地), 其野外地震数据采集工作已于 2005 年 9 月结束。

本论文利用(2002 年 9 月至 2004 年 9 月)尼泊尔境内及西藏萨嘎以南的宽频地震数据, 采用远震层析方法对喜马拉雅—西藏碰撞带之下一些关键地段的深部信息进行研究, 进一步探讨了印度板块在俯冲前缘地段的几条边界断裂的深部赋存状态。

1 资料及模型

此次宽频地震探测使用的记录仪为美方投入的 RefTeck 三分量地震仪器, 检波器分别为 100s、120s, 记录到的体波震相清晰。用于远震层析反演的地震台站为 76 个, 台站平均间距为 4km, 使用了不小于 4.5 级的地震事件 441 次, 地震射线为 7543 条。

本文的反演技术与中法合作在《Science》上登载的阿尔金山层析成果所使用的方法相同(Wittlinger, 1998; Aki, 1977)。参考前人在该区的结果, 模型的建立采用了 9 层结构, 浅层水平分辨率为

注: 本文为国土资源部“青藏高原的碰撞造山作用及其效应专项”项目(编号 2001010206)、中国地质调查局“中国重要成矿带找矿模型及技术方法”项目(编号 1212010561605)及美国 NSF(编号 EAR99-09609)资助的成果。

收稿日期: 2006-04-12; 改回日期: 2006-06-26; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 薛光琦, 女, 1950 年生, 研究员。地球物理专业, 主要从事深部地球物理研究。通讯地址: 100037, 北京西城区百万庄大街 26 号, 地质科学院矿产资源研究所; Email: xueguangqi@cags.net.cn。

10~15km,垂直分辨率为5~10km;在400km深处水平分辨率为45km;垂直分辨率为100km。反演前的走时残差方差为0.21018,反演后的方差为0.04359,层析反演数据的改进值为86%。

2 关于碰撞前缘逆冲断裂的空间展布

研究区间自尼泊尔南缘始,跨越了主边界断裂MBT、主中央断裂MCT、藏南滑脱系STD,经过了低喜马拉雅、高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅,中止于雅鲁藏布江断裂以南(图1)。

2.1 地震层析剖面图的解析

印度大陆北缘在两大板块的碰撞力的作用下,产生了以MBT和MCT为代表的强烈逆冲断裂活动和大幅度的水平褶皱,进而使地壳增厚,并造就了喜马拉雅山系。

其中,在尼泊尔南部的主边界断裂(MBT)是断裂下盘锡瓦利克阶的沉积岩与上盘低喜马拉雅中等变质沉积岩的界限,而后者又是MCT的下盘,上覆深变质岩。在地震层析图上,MBT与MCT共同表现为一条向北倾斜的高低速度分界带(图版I-1、2),其向下延深的深度在绝对速度和相对速度图上均大于10km,参照尼泊尔国家地震中心的资料(图2b),这条分界带中还有地震活动出现,暗示着目前依旧有逆冲断裂活动的迹象,即两大板块的碰撞、挤压活动仍在继续。

主中央断裂(MCT)再次出现在巨大褶皱的北端(图版I-1、2)、(图2a),由于遭遇北部前震旦纪老地层的阻挡,使得该逆冲断裂向南倾,在层析图中表现为一高低速度分界带,该分界带向下延深约为10km,其下方也有地震活动带出现。穿过MCT,是大片的前寒武—古生代地层(图2a),在层析图上则表现为深达10km的高速扰动带(图版I-1)。这条高速带以北第三次出现了MCT,在相对速度扰动层析图中高低速度的差异十分明显。沿着该速度界面还有不同深度和强度的地震出现,尼泊尔境内地震分布图所显示的地震活动最剧烈的地带就集中在后两次出现的MCT之间,且深度不超过30km(图2b),这一方面暗示着MCT的活动性,也从另一角度论证了碰撞引发的激烈构造活动多发生在中上地壳中。另外,在MCT北侧还有两条逆冲断裂出现(图2a),这

两条北倾的逆冲断裂已进入高喜马拉雅地段。

上述描述论证了两大板块的碰撞在尼泊尔境内引发了低喜马拉雅地段剧烈的地质构造活动。印度板块向北俯冲的轨迹由一系列逆冲断层组成(图版I-1、2),俯冲带倾斜角度很小,界面平缓。印度板块俯冲的轨迹也延绵至中国西藏境内。在高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅下方,层析结果(图版I-1)表现为一条十分明显的高低速度分界面,南端深为10km左右,北端位置在雅江断裂带,其深度约为25km。上述俯冲轨迹在绝对速度图中表现为数条 $V_p=6.2\text{km/s}$ 至 6.4km/s 的向北缓倾的速度等值线(图版I-2)。

进入中国境内后,高喜马拉雅地段仍为前寒武纪地层及喜山期的花岗岩(图2a)。在吉隆附近是地质上定义的藏南拆离带(STD)。藏南拆离带是一个韧性正断层系统,向北倾斜,被认为是特提斯喜马拉雅与其南侧的高喜马拉雅之间的界线(Burchfiel et al., 1992b)。

层析图结果(相对速度扰动)所显示的STD是一条夹在高低速度分界线上向北缓倾斜的构造,深度在10km左右(图版I-1);在绝对速度图中(图版I-2)STD是一条向北倾斜的速度梯度带,其附近有地震活动出现,这是否说明STD仍具活动性?穿过大面积分布的喜山中期的花岗岩带及白垩侏罗纪灰岩砂岩,就是向北陡倾的雅鲁藏布江断裂带。

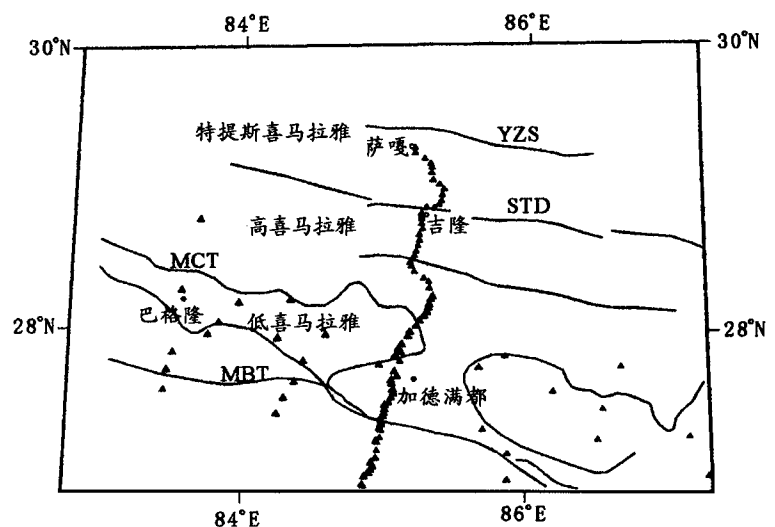


图1 研究区构造及地震台阵位置图

Fig. 1 Tectonic sketch with the location of the profile
其中三角形为布设的台站位置;实线为断裂带;点划线为国界
The triangles make the array; the solid line stands for faults;
and dotted line shows the border between China and Nepal

上述地震层析剖面与地质特征对应关系的描述旨在试图反映曾发生于青藏高原前缘及南部的若干条逆冲断裂在浅部的基本赋存状态。

2.2 地震层析水平切片中 MBT、MCD、STD 的赋存状态

0~5km 深度:在纬度 27.5°处,一条北西倾向高低速度扰动分界线(图版 I-3)所对应的恰是地表地质所定义的 MBT、MCT;北纬 28.2°附近 MCT 的突出标志也是一条北西向的高低速度扰动分界带;高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅的分界带 STD (北纬 28.9°一带)两侧同样出现了明显的速度扰动差异。地震层析在 5~15km 深度所反映的速度结构

状态与该层的情况大同小异。

15~27km 深度:该层深度上,横亘于 27.5°左右的 MBT、MCT 仍旧明显;剖面的北部即特提斯喜马拉雅地段有一明显的低速扰动体;沿着剖面零散分布的高速体逐渐相连且面积加大。

60~100km 深度:高速扰动连成一体分布在高低喜马拉雅地段;在特提斯喜马拉雅地区则以低速扰动为主。

由此看出,在印度板块向北俯冲的过程中,尼泊尔境内和藏南的数条逆冲断裂带仅分布在浅层地壳中。而在 100km 深度时,印度板块向北俯冲的岩石圈边界是没有到达雅鲁藏布江断裂的。

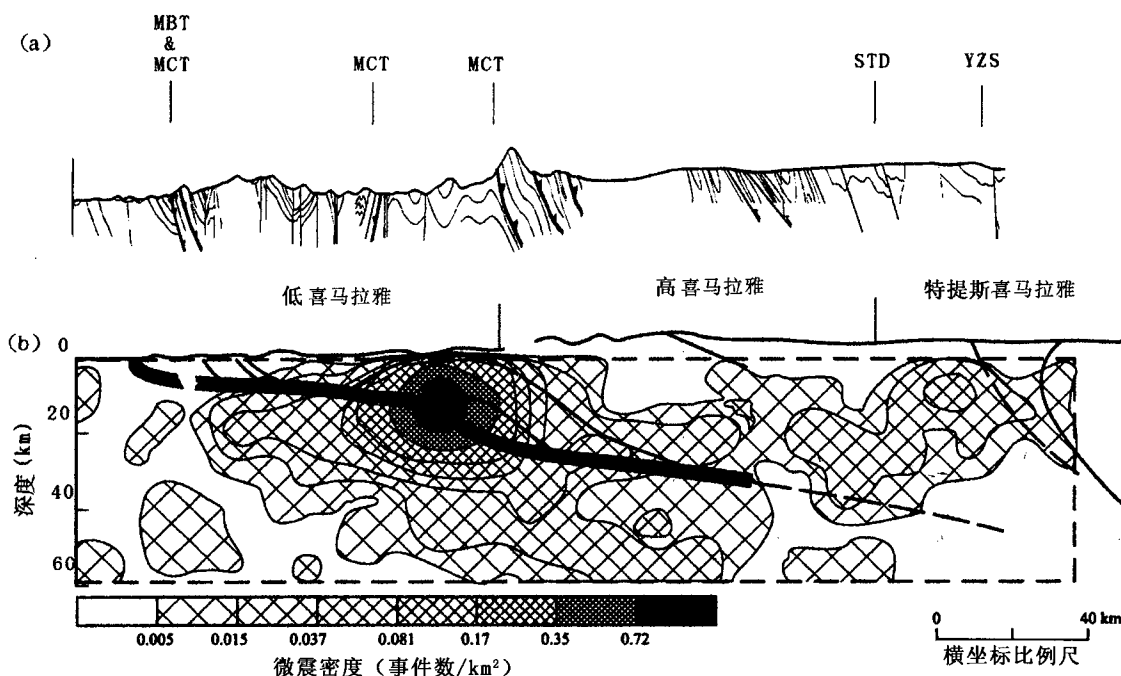


图 2 研究区间的地质构造断面及微震分布图

Fig. 2 Tectonic and microseismic sections of the study area

(a)一构造图:粗线为断裂带(参考尼泊尔矿山地质部出版的 1:25 万地质图及 1:100 万中华人民共和国地质图);(b)一微震事件分布断面图(摘自尼泊尔国家地震中心绘制的 1:100 万尼泊尔喜马拉雅震源位置图,1998);其中等值线所示为微震分布的数目;实线表示断裂、印度板块俯冲的轨迹及 Moho 界面

(a)—Tectonic section; thick lines stand for faults (with reference in the geological map of 1:250000 by the National Seismological Center of Nepal and the geological map of China of 1:1000000); (b)—density of microseismic events (referred to the Epicentre Map of Nepal Himalaya at 1:1000000 by the National Seismological Center of Nepal, 1998); The contour stands for the number of microseismic events, and the solid line shows faults, the subduction trace of the Indian Plate and Moho

3 特提斯喜马拉雅下方的低速扰动体

在 10~40km 深度间,也就是在中地壳高喜马拉雅与特提斯喜马拉雅下方有一楔状低速体切入(图版 I-1),该低速体似被作了轮廓勾画一般,被大

小小的地震所环绕。由于地震带的分布往往受到构造带的控制,而高低速度的分界线常与构造断裂相关联。频繁发生在高速区或是高低速结合部位的地震活动预示着该区有正在进行的构造运动,也说明了青藏高原仍在变化、生长。

该地段出现的低速体在水平层切片上也十分清晰(图版 I-3)。在 15~100km 的深度间(三至六层的水平切片),纬度 28.5°以北的特提斯喜马拉雅地区存在的低速体,极可能反映了由于地壳的缩短增厚而在壳内产生的大范围局部熔融物质。

目前关于喜马拉雅和青藏高原形成演化过程的一种比较流行的观点认为,喜马拉雅高级结晶杂岩的出露和青藏高原的向外生长是高原中下地壳物质向外塑性流动的结果(Beaumont et al., 2001),也就是说,发生在中地壳的流体使得高原在向外增长。我们在沿剖面上的地表地质工作中,也发现在马拉山口等高喜马拉雅地段出现有千枚岩、片麻岩等浅—深层变质岩。推测是来自深部的变质岩历经岁月的剥蚀,将地质构造演化状况呈现在我们面前。而我们的地震层析反演(图版 I)也再现了高原物质向外增长的变迁过程。

4 结论

(1) 在尼泊尔境内,MBT 与 MCT 共同表现为一条向北倾斜的高低速度分界带(图版),其向下延深的深度在绝对速度和相对速度图上均大于 10km,结合对地震资料的综合研究,目前依旧有逆冲断裂活动的迹象。主中央断裂(MCT)3 次出现在这条剖面上,地震活动最剧烈的地带就集中在后两次出现的 MCT 之间,也就是碰撞引发的最激烈构造活动多发生在高低喜马拉雅分界地段。

STD 是特提斯喜马拉雅与其南侧的高喜马拉雅之间的界线,其产状为向北缓倾斜构造,向下延深约在 10km 左右。

(2) 在高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅下方,印度板块向北俯冲的轨迹由一系列逆冲断层组成,倾斜角度很小,俯冲界面平缓,速度界面十分清晰,其南端深为 10km 左右,北端在雅江断裂带处约为 25km 深度。

另外,一直到 100km 深度,仍未见到印度板块的岩石圈边界到达雅鲁藏布江。

(3) 目前在 MCT 和 STD 之间发现的高喜马拉雅深变质混合麻粒岩以及千枚岩等浅层变质岩可以解释为,由于俯冲、挤压和缩短造成了高喜马拉雅和特提斯喜马拉雅地壳增厚并由此成就了热地壳以及壳内局部熔融。当中地壳的流体造成高原不断向外增长的同时,大自然的剥蚀也在发挥它的作用,将这些来自深部的构造演化状况逐一地呈现在我们面前。

致谢:感谢几年来在青藏高原采集地震数据的

中方、美方、台湾及尼泊尔的地球物理学者和全体工作人员所付出的辛勤劳动;感谢在本文撰写过程中,肖序常院士所给予的热情指导及帮助。

参 考 文 献

- 肖序常,李廷栋,李光岑,等. 1988. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论. 北京:地质出版社.
- 曾融生,孙为国. 1992. 青藏高原及其邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论. 地震学报, 14(增刊): 534~563.
- 赵文津及 INDEPTH 项目组. 2001. 喜马拉雅山及雅鲁藏布江缝合带深部结构与构造研究. 北京:地质出版社.
- Aki K, Christofferson A, Husebye E S. 1977. Determination of the three-dimensional seismic structure of the lithosphere. J. Geophys. Res., 82(2): 277~296.
- Beaumont C, Jamiesont R A, Nguyen M H, et al. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. Nature, 414: 738~742.
- Burchfiel B C, Chen Z L, Hedges K V, Liu Y P, Liu L H, Royden C R, Xu J N. 1992. The South Tibet Detachment System. Himalayan orogeny: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt. Geol. Soc. Am. Special Paper, 269: 1~41.
- Burg J P, Davy P, Martinod J. 1994. Shortening of analogue models of the continental lithosphere: New hypothesis for the formation of the Tibetan plateau. Tectonics, 13: 475~483.
- Chen W P, Molnar P. 1990. Source parameters of earthquakes and intraplate deformation beneath the Shillong plateau and the northern indoburman ranges. J. Geophys. Res., 95: 12527~12552.
- Vera Schulte Pelkum, Gaspar Monsalve, Anne Sheehan, et al. 2005. Imaging the Indian subcontinent beneath the Himalaya. Nature, 435(30): 1222~1225.
- Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, et al. 1998. Tomographic Evidence for Localized Lithospheric Shear Along the Altyn Tagh Fault. Science, 282: 74~76.
- Xiao Xuchanng, Li Tingdong, Li Guangcen, et al. 1998. Tectonic evolution of the lithosphere of the Himalayas general principle. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zeng Rongsheng, Sun Weiguo. 1992. Seismicity and focal mechanism in Tibetan Plateau and its implications to lithospheric flow. Acta Seism Sinica, 14 (Suppl.): 534~563.
- Zhao Wenjin & the Group of INDEPTH. 2001. The study of Himalaya and the Deep Structure in Yaluzangbu Suture. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

图 版 说 明

地震层析反演结果

1. 地震层析速度扰动断面图;图中的白色圆环是分布在该区的地震;黑色的粗线为断裂;红色的粗线表示高低速度扰动分界面。
2. 地震层析绝对速度断面图;白的粗线表示速度梯度突变带。
3. 地震层析水平切片图;其中主要构造单元的注释参照 60~100km 水平切片图幅。

Seismic Tomographic Constraint on the Northward Subduction of the Indian Plate

XUE Guangqi¹⁾, SU Heping²⁾, QIAN Hui²⁾, JIANG Mei²⁾

1) *Institute of Mineral and Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

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

Abstract

Based on a study on the broadband seismic data obtained by Hi-CLIMB project in Nepal and areas south to Saga, Tibet, the deep information over some key sections under the Himalayan—Tibetan Collision Zone is discussed in this paper, using teleseismic tomography. It is further approved that along with the northward subduction of Indian Plate, the strongest tectonic deformation occurs at its front edge, and the hosting state is also illustrated on the slightly north dipping Main Boundary Thrust (MBT) and the Main Central Thrust (MCT) presenting 3 times along the section. On top of that, a north flat-dipping interface is shown from southern border of Nepal through the Yarlung Zangpu Fault, with a depth of $\sim 10\text{km}$ at the south end and $\sim 25\text{km}$ at north. It is concluded that the crustal thickening over High-Himalayan and Tethys—Himalayan is caused by the subduction, extrusion and shortening, giving birth to a hot crust and partial melting in the crust.

Key words: Himalayan; thrust; earthquake; velocity

~~~~~

