

喜马拉雅山及雅鲁藏布江 缝合带深部结构与构造

—— INDEPTH 项目译文集

主编： 赵文津 张肇元

地质出版社

喜马拉雅山及雅鲁藏布江 缝合带深部结构与构造

——INDEPTH 项目译文集

主编：赵文津 张肇元

编委：赵文津	D. Nelson	L. Brown
J. Kuo	J. Martyn	R. Meissner
S. Klemperer	A. Jones	张肇元

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书共收录论文 25 篇。这些论文通过分析地震及大地电磁资料,建立地震剖面,研究了西藏地区的地壳、地幔结构与变形,以及岩浆活动,从不同侧面和深度上对青藏高原的隆升机制进行了研究。

图书在版编目 (CIP) 数据

喜马拉雅山及雅鲁藏布江缝合带深部结构与构造——INDEPTH 项目译文集/赵文津,张肇元主编. -北京:地质出版社,2002.10
ISBN 7-116-03654-7

I. 喜… II. ①赵…②张… III. 大地深部构造-研究-青藏高原-文集 IV. P542-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 061738 号

责任编辑:渠洁瑜 江晓庆

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508 (邮购部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787mm×1092mm^{1/16}

印 张:18.25

字 数:444 千字

印 数:1—800 册

版 次:2002 年 10 月北京第一版·第一次印刷

定 价:42.00 元

ISBN 7-116-03654-7/P·2290

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

编者的话

INDEPTH 由 “International Deep Profiling of Tibet and the Himalaya” 英文字头拼合而成，原文为 “国际喜马拉雅和西藏高原深剖面”。

这一计划是中美双方代表于 1991 年进行合作谈判时拟定的，1992 年中美双方正式签定了合作协议，并于同年在 100 km 长的测线上开展了野外近垂直深反射地震试验。

为什么要开展深反射地震法探测试验呢？当时我们已进行了 “喜马拉雅地壳上地幔的研究”（中法合作，1980~1982），中法双方又在酝酿着新一轮的青藏高原合作研究，深部探测将以地震仪阵列方法记录天然地震为主；“亚东—格尔木地学大断面”研究也已完成（1985~1990），应用了广角地震、大地电磁、重力、磁法、地热等深部探测技术，取得了不少成果。但是，这些方法探测的精细程度是不高的，得出的地质结论问题较多，用于研究地壳增厚和缩短的构造机制是很不够的。所以我们就想试验一下近垂直深反射地震方法，看一看这一高分辨率的反射地震方法能不能大幅度提高探测的精细程度，以更有力地说明深部地质构造问题。

西藏地壳厚 75~80 km，比中国东部地壳的厚度（30~35 km）大一倍，在这种条件下，用近垂直深反射地震技术能否获得深部地壳细结构的信息呢？中外地球物理学家都是没有经验的。经过探索，藏南 100 km 的深反射地震试验取得成功，发现了特提斯喜马拉雅地区地壳深部的精细结构，特别是新发现了主喜马拉雅逆冲断裂（MHT）和 75~80 km 深的莫霍界面，这给大家很大鼓舞，因而才有了第二阶段的试验。

INDEPTH 的第二阶段工作是从喜马拉雅山脊南的亚东，向北过雅鲁藏布江缝合带，直到当雄，在 400 km 长的测线上铺开的，我们应用了多种新技术新方法（包括新的处理软件的开发和应用），并加强地面地质调查和地球化学工作，实现了调查研究的地球物理、地质、地球化学的综合。这是本项目的两大特点。

完成这项地学大工程，一要有较多的资金，二要有新技术设备，三要有新一代有活力的年青人积极参与。美国、德国和加拿大都表示了极大的诚意和热情。在大家的共同努力下这些困难都得到了较好的解决。项目顾问，前国际岩石圈委员会主席 K. Burke 教授在 30 届地质大会的主题报告中指出 “中国地球科学家在西藏所建立起来的国际性协作模式很可能被世界其他重要的

科学研究领域所效仿”。这是对我们创造的经验，即在对地学前沿性问题上，走开放、开展国际合作的道路给予的高度评价。这也是本项目的第三个特点。

美国参与项目活动的各大学都吸收了博士、硕士研究生参加，他们结合研究需要和编写毕业论文的要求争相提出一些新的创意，这对项目研究的深化很有意义，读者将可在有关文章中获得不少启迪。应当指出，对方在研究地球物理资料时都从多个方面尽量探讨它们在构造地质方面的含义，他们的诸多作法和钻研精神值得我们很好地学习。

在本文集检索过程中共收集了 40 余篇文章，但遗憾的是，由于种种原因，其中包括一些出版单位的有关版权事宜，而未能悉数译出并发表。但总的来说这些已发表的文章标志着当时的认识水平，现在随着研究的深化许多观点已经有了一些变化，这当然是十分正常的情况，请读者在读文章时不要仅仅关心这样那样的结论，更要注意他们研究方法的运用以及创新取得的成果，关注最新发表的文章。

目前 INDEPTH 的第三阶段研究即将告一段落（1998 ~ 2002）。第三阶段是在西藏腹地——羌塘地块南部和拉萨地块北部进行的，测线布置是以班公湖-怒江缝合带为中心进行的。这一地区既有一系列地质难题又有许多显著的地球物理异常现象，如何对这些异常现象进一步加以肯定并予以解释是新阶段的主要任务。初步成果看来还是很有意义的，也表明了探测深度已不能仅仅限于地壳深度了，需要探讨上地幔的细结构。

最近面波研究的结果（1998）令人关注，它给出青藏高原下部有一高速层，这又再一次提出 Barazangi 等（1993）和张禹慎等（1994）多年前提出的看法，即高原下部存在一个高速的厚的上地幔盖层，代表了印度上地幔盖层俯冲到西藏的 2/3 的地段或俯冲到高原之下的特提斯海洋壳。不过，这些结果的分辨率还很粗，面波仅为 350 km 以长，S 波的水平 and 垂直分辨率分别为 3000 km 和 250 km。要求准确确定西藏地壳和其下的地幔盖层的关系是很困难的，这需要有新的成果来论证。

INDEPTH 的第四阶段正在酝酿中，2002 年 2 月还专门在夏威夷召开了会议，大家一致认为还需要更上一层楼把 INDEPTH 项目搞好，向北须跨越金沙江缝合带和昆仑山。我们对未来寄予期望。

本文集编者十分感谢英国《Nature》杂志社、美国 AAAS《Science》杂志社、美国 AGU《Tectonics》杂志社、美国 AGU《Journal of Geophysical Research》杂志社、美国 GSA《Geology》杂志社以及各篇的作者们慨然允诺我们选用他们的文章，并高度评价罗永国、王立文、崔霖沛、石宏仁和纪忠元等国土资源部信息中心研究员们按要求为本文集提供的译文，中国地科院西藏屋的郑玉

坤研究员和徐立同志为本文集的出版做出的大量编务和技术性工作，在此谨向他们表示由衷的谢意。

本文集因篇幅关系，各篇文章的参考文献均从略，如欲参照，请查阅原文（编者注）。

目 录

印度板块俯冲到藏南之下的深反射证据·····	(1)
西藏-雅鲁藏布缝合带之下地壳构造的地震填图·····	(6)
西藏和喜马拉雅深剖面研究 (INDEPTH) 的进展·····	(12)
藏南下面部分熔融中地壳——INDEPTH 项目结果的综合研究·····	(22)
根据 INDEPTH 地震反射剖面测量结果得出的西藏南部的亮点、构造和岩浆活动·····	(28)
根据西藏地壳亮点看 P-S 波转换的 INDEPTH 广角反射观测·····	(32)
地震资料为西藏南部部分熔融地壳层提供了证据·····	(35)
根据 INDEPTH 大地电磁测量结果看西藏南部的导电地壳·····	(39)
西藏下面存在拆离的印度岩石圈地幔的地震证据·····	(42)
西藏热和干的深部地壳捕虏体·····	(47)
地壳性质变化对青藏高原演化模型的意义·····	(52)
从INDEPTH 项目深部地震反射剖面看青藏高原拉萨地体的地壳变形·····	(61)
从INDEPTH 项目的深反射剖面看东经约 90°喜马拉雅造山带的地壳结构·····	(81)
根据 INDEPTH 项目共中点数据折射分析得出的西藏南部亚东-谷露裂谷的浅部构造 ·····	(103)
INDEPTH 广角剖面上的中地壳反射层：在西藏南部印度-亚洲缝合带下面有蛇绿 岩岩板吗？·····	(120)
中喜马拉雅东部（东经 89°~90°）亚东横切构造和藏南拆离构造·····	(139)
根据广角地震资料得出的南特提斯喜马拉雅地壳的构造要素·····	(157)
根据被动源地震试验结果得出的西藏南部岩石圈和上地幔结构·····	(168)
南喜马拉雅-西藏碰撞带下面的地震各向异性·····	(181)
一种对窄孔径、有噪声地震反射数据进行偏移校正的简单方法及其在 INDEPTH 项目深地震剖面中的应用·····	(195)
从GPS 测量结果看印度-欧亚碰撞带的运动学特征·····	(202)
藏南亚东-谷露裂谷北段亮点的地震性质——西藏中地壳内游离水质流体的证据·····	(221)
藏南雅鲁藏布江缝合带——一条以广角地震测量为依据的地壳剖面·····	(259)
特提斯喜马拉雅地震剖面上可能的上地幔反射组构：鉴别和构造解释·····	(262)
西藏卫磁低：西藏地壳中广布的熔融体证据？·····	(281)

印度板块俯冲到藏南之下的深反射证据^①

赵文津, K·D·Nelson 及 INDEPTH 研究队^②

摘要 喜马拉雅和相邻的青藏高原, 构成了地球上最大的高原和异常厚地壳的地区, 是印度板块与亚洲板块新生代碰撞的结果, 并被认作是典型的陆-陆碰撞^[1,2,3]地带。此文报道了用深地震反射剖面方法进行本区地壳成像的第一个结果; 试验的 100 km 长剖面, 布置在特提斯喜马拉雅 (Tethyan Himalaya), 并显示了在地壳中部有一强反射带。它可能代表了一个活动的逆冲断裂, 而印度板块就是沿此断裂俯冲到了藏南之下; 上地壳反射使人们联想到上地壳存在着大规模的叠瓦状结构; 莫霍反射来自本区双倍正常地壳厚度的巨厚地壳的底部。这些结果, 对由于印度大陆地壳整体俯冲到包括特提斯喜马拉雅在内的呈叠瓦状上地壳之下, 而使西藏最南端地壳增厚的观点, 给予了实质性的支持。

关键词 深地震反射 印度板块 亚洲板块 陆-陆碰撞

INDEPTH (International Deep Profiling of Tibet & the Himalaya) 项目是中国地质科学院与美国康奈尔、锡拉丘兹、哥伦比亚、斯坦福等几所大学的地球科学家开展合作的项目。1992 年夏采集了喜马拉雅地区深地震反射数据。试验剖面位于藏南亚东 (Yadong)-谷露 (Gulu) 裂谷的南部 (图 1), 亚东-谷露裂谷是一系列南北走向横穿喜马拉雅和青藏高原南部的第四纪地堑中的一个⁽⁴⁾。INDEPTH 剖面所在的亚东-谷露裂谷地段位于特提斯喜马拉雅, 地表主要为古生代和中生代冒地槽沉积, 它们沉积于印度大陆北部边缘, 随后于晚第三纪印度板块与亚洲板块碰撞时, 发生褶皱并向南逆冲^(5,6)。在特提斯喜马拉雅内与碰撞有关的压缩变形带明显地又遭受了一期南北向伸展作用, 这一作用主要由藏南滑脱系 (STD) 的发育而显示出来。STD 为一低角度北倾韧

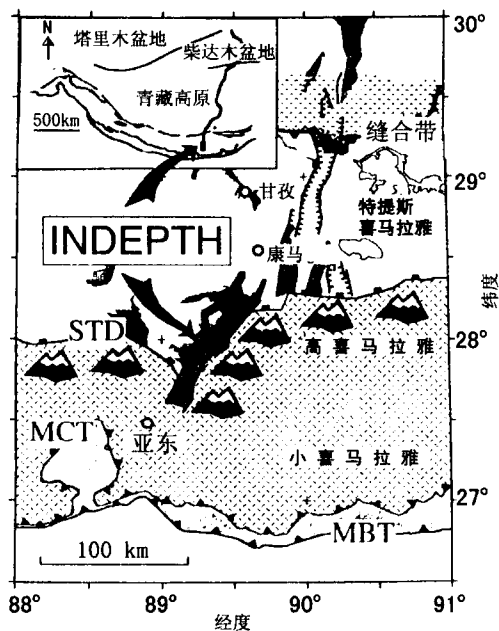


图 1 INDEPTH-I 深反射剖面位置图
MBT—主边界逆冲断裂; MCT—主中央逆冲断裂;
STD—藏南拆离断裂

① 国家自然科学基金资助项目。

② 参加工作的有, 中国: 车敬凯、郭景如、卢德源、刘先文、徐中信、武长得等; 美国: L. D. Brown, M. L. Hauck; J. T. Kuo; S. Klemperer, Y. Makovsky。

性正断层，现在成为特提斯喜马拉雅沉积地层和南边的高喜马拉雅结晶岩席之间的界限⁽⁷⁾。推测在同一幕期间形成了其它伸展构造，包括若干脆性正断层。它们切穿或者活化了特提斯喜马拉雅内的逆冲断裂以及一个围绕着结晶质康马（Kangmar）穹隆较大的头向北的韧性剪切带。康马穹隆位于特提斯喜马拉雅内刚好在 INDEPTH 剖面以北⁽⁸⁾。年代学数据表明，STD 是在印度板块和亚洲板块会聚时形成的，而活动的逆冲断裂发生在喜马拉雅南翼地势较低的地带。发生在喜马拉雅南翼之下的壳中地震具有逆冲型初动（first motion），表明印度板块和藏南之间正继续汇聚。⁽⁹⁾

INDEPTH 地震反射剖面是 15 次叠加共中点（CMP）的叠加剖面；用炸药做震源每 200 m 放一炮，每炮 50 kg 炸药；每 6 km 放一个 200 kg 炸药的大炮，50 m 检波器组合间距（每组 36 个检波器）和 50 s 记录时间（图 2）。资料处理包括高度静校正、叠前增益平衡、带通滤波、反褶积、正常动校正（NMO）、CMP 叠加、NMO 校正后去噪、叠后增益平衡、显示。在野外工作时还利用移动式 REFTEK 地震仪记录了长偏移距和旁线数据。在 INDEPTH 地震剖面上可以看见的最明显的侧向伸展特征是中壳有一组强反射，它延伸于整个剖面，

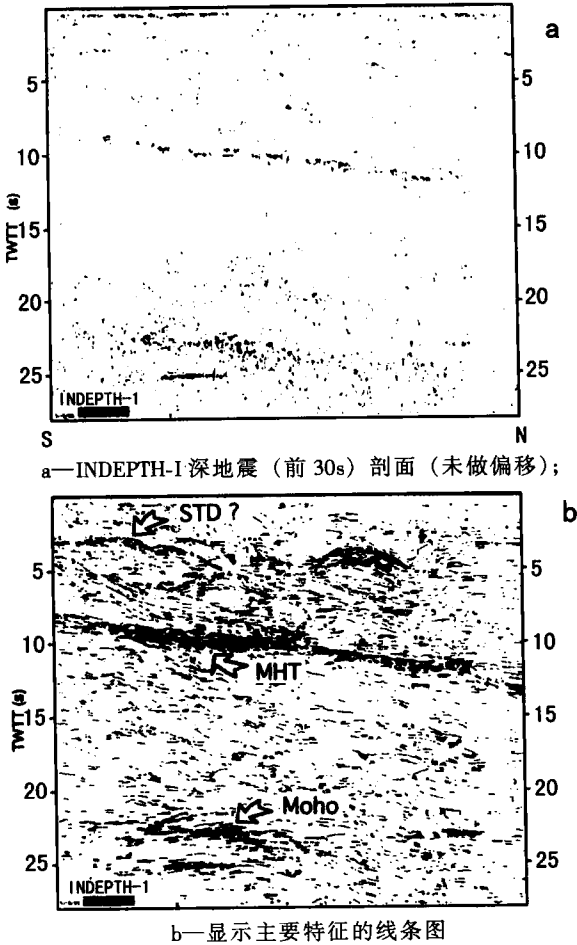


图 2

MHT—主喜马拉雅逆冲断裂；STD—藏南拆离层；Moho—藏南之下的印度大陆壳底部的莫霍面

比例尺为 1:1（图左下角比例棒相当于 10 km 长）；假设上地壳平均速度为 $6.0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

向北缓倾斜 (9 ~ 13 s 双程旅行时, 图 2)。80 年代初, 中法合作在特提斯喜马拉雅采集到的折射数据表明, 这一层之上平均地壳速度为 $6.0 \sim 6.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,⁽¹⁰⁾ 用这一范围内的速度值把回声时间转换成深度, 并将反射剖面投影于南北向剖面上, 得出这一反射是北倾的, 平均倾角为 $9^\circ \pm 2^\circ$ 。剖面南端的反射在 $(28 \pm 1) \text{ km}$ 深处, 北端则为 $(40 \pm 2) \text{ km}$ 深。布置在 CMP 剖面以北的 REFTEK 记录到的广角反射结果表明, 这一层至少可以从测线北端向北延伸 30 km。

与已知的天然地震和地质数据进行对比, 提出这一反射层表明为一逆冲断裂, 目前印度大陆正沿着这一断裂俯冲到藏南之下, 并将其命名为主喜马拉雅逆冲断裂 (MHT)。图 3 表示了 INDEPTH 剖面与在 MHT 位置上存在的地震学约束的空间关系。反射数据已被投影到南北向剖面上, 并在地震数据参考位置以北的适当距离上定了位。虽然反射剖面定位是近似的, 但肯定的解释是, 在剖面上成像的中壳层是活动的印度-亚洲板块之间逆冲断裂 (MHT) 的北延。穿过尼泊尔喜马拉雅东部的地质平衡剖面 (利用地表地质资料绘成的), 说明在高喜马拉雅之下的 MHT, 其深度约为 30 km, 与在 INDEPTH 剖面南端所解释的 MHT 反射深度基本上是一致的。反射数据表明了 MHT 下盘的印度大陆地壳在藏南平缓地向北倾斜, 并且至少向北延伸到特提斯喜马拉雅中部——喜马拉雅逆冲断裂前缘 (MBT) 以北约 200 km 的地方 (图 1)。这要比最近的地震学约束的位置更往北, 但仍然在印度板块和藏南之间约 440 km 总汇聚量以内, 这一数据是由古地磁数据估算的, 是从喜马拉雅碰撞开始 (约 45 Ma) 以来发生的。本地区深剖面探测的基本目标只是确定印度地壳在高原下向北延伸的实际范围。

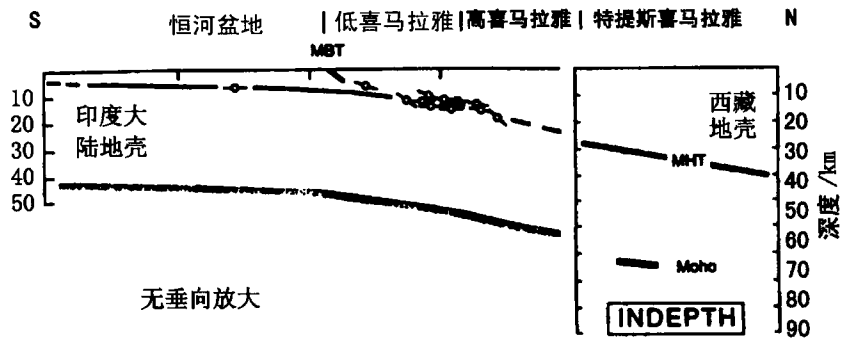


图 3 在喜马拉雅北边的 INDEPTH 地震剖面和很好确定的逆冲型天然地震的空间关系

该逆冲型天然地震确定了在喜马拉雅南侧下面的印度-亚洲拆离带

(由参考文献 6 的图 16 修改得到的); MBT、MCT、MHT、Moho 同图 1、图 2;

短粗虚线为重力资料得出的高喜马拉雅之下的 Moho。—○—代表天然地震震源及其性质

INDEPTH 剖面大范围的显示说明, MHT 之上的地壳有一系列弧形和北倾的反射, 一般说来都比 MHT 反射幅度小。后者一般在 MHT 处或其上有变平现象。虽然这些反射的专门解释还有待对这些数据作偏移处理, 也有待和地表构造相对比; 但是反射特征的总貌和地表地质研究得出的看法是一致的, 地表地质认为在特提斯喜马拉雅之下的上地壳呈大规模的叠瓦状结构。在剖面南端上地壳所看到的特别明显的反射向北倾斜, 并且似乎和 MHT 合并起来, 大体上处在 STD 反射的那个位置上 (图 2)。为检验这一关系, 尚需在 INDEPTH 南端附近作进一步的地表地质研究。

最后，地震剖面的一个值得注意的特点是，在回波时间上相干反射，在典型的大陆地区，出现了，它相当于上地幔的反射。在剖面南部见到了特别明显的两组反射——上部带在 23~24 s（双程走时），下部不连续的反射在 25.2 s（图 2）。23~24 s 的反射几乎可以肯定是来自俯冲到藏南的印度大陆地壳底部的莫霍面（图 4）。中法合作研究所测得的折射数据⁽¹⁰⁾表明，在 INDEPTH 调查地段附近的地壳总厚度达 75 km，平均压缩波速度为 $6.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，给出期望的莫霍垂直入射的回声时间为 23.8 s。这和上部带的回声时间是一致的。虽然莫霍反射在剖面南部最明显，但似乎是断续地延伸在整个剖面上。把这些反射资料和每天的噪声记录一起来分析，显示出的这些反射视振幅的横向变化，是由于沿剖面噪声水平变化所致，其中大部分是风引起的。对于在 25.2 s 更深部反射的解释是有争议的，为了取得约束深部反射几何形状的资料，在剖面南部的堆纳（Duina）附近布置了一条短的横剖面，结果表明，有一个向东倾斜的反射同相轴。偏移后表明，这一反射体位于剖面之西的下部地壳内，相反地解释为莫霍的反射则位于剖面的平面内。

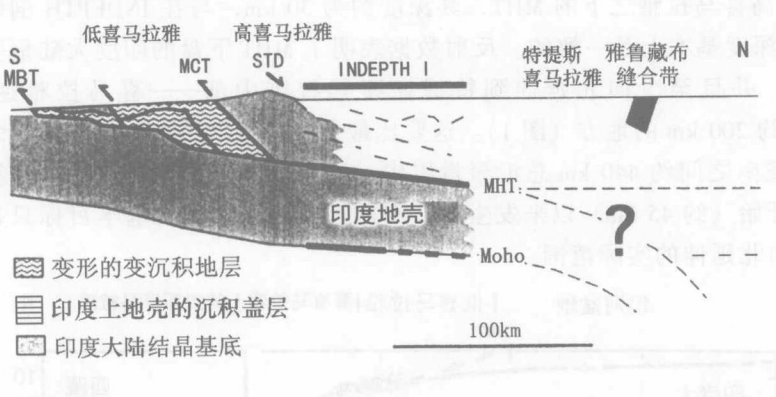


图 4 喜马拉雅和西藏高原南部地壳横截面概略图和 INDEPTH 剖面位置以及现在的地壳结构（~1:1）
喜马拉雅山脊南的上地壳结构的简化图；
MBT、MCT、MHT、STD、Moho 的注释同图 1 和图 2

将 INDEPTH 剖面与现有的地质学和地震学的约束结合起来考虑，认为基本上完整的印度大陆地壳剖面已俯冲到南部特提斯喜马拉雅之下。在剖面上莫霍反射最明显的地方，所解释得到的印度地壳厚度，即 MHT 与莫霍之间的厚度约为 43 km。这一厚度与以前已经确定的恒河盆地以南，即印度东北部未变形地壳的厚度—40 km，（据地震折射和重力数据联合解释的结果）⁽¹⁴⁾。相差不是很大。地表地质资料表明，在 MHT 以上的地壳主要由逆冲——叠瓦状的沉积和变质地层组成，这些地层是在喜马拉雅碰撞初期从印度板块前缘拆离出来的^(5,6)。而反射数据意味着在 MHT 之下的地壳基本上是完整的印度大陆地壳，它俯冲到这一叠瓦状堆积体之下（为连续性汇聚的结果）。虽然 INDEPTH 数据并没有直接约束剖面南部莫霍的形状，但在喜马拉雅前陆与特提斯喜马拉雅南缘之间，莫霍是区域性地向北倾，倾角约 15°，与以前根据重力模拟⁽¹⁵⁾所作的估计是一致的，相容的。

在地震剖面上所看到的倾斜的反射段，位于所解释的俯冲印度地壳范围内，可能是某些内部应变的显示；然而，经下部板块地壳厚度的推算未显示出俯冲的印度地壳发生了分布式的缩短（增厚），同样地，在 INDEPTH 剖面上清楚地显示出俯冲的印度大陆莫霍没有

明显的错断，虽然往北边或者往南边均可能存在这类错断⁽¹⁶⁾。

感谢原中国地质矿产部、美国国家科学基金会和中国国家自然科学基金会的决定性支持；对中国地质矿产部中南石油地质局第五物探大队的职工很好地完成了野外施工，西藏自治区科委和军区各级领导、干部的指导和帮助，INDEPTH 项目科学队成员（M. Barazangi, C. Burchfiel, K. Burke, W. Kidd, P. Molnar 和 J. Oliver）的参与以及中方 INDEPTH 项目科学顾问们（张炳熹、李廷栋、刘光鼎、曾融生、李庆忠、欧庆贤、吴功建等）的指导和帮助也一并致谢。

参考文献 16 篇略去。

注：本文的英文稿发表在 1993 年 12 月 9 日的《自然》杂志上（Vol. 366, pp557 ~ 559），本译文由第一作者翻译并作了一些增删。

附件

正确合作可以拯救生命和移动“大山”

——美国《科学》杂志介绍 INDEPTH 项目情况

1995 年 11 月 17 日发刊的美国《科学》杂志第 270 卷，第 1144 ~ 1147 页上刊登了该杂志副主编 Jeffrey Mervis 的撰文——正确合作可以拯救生命和移动“大山”报道和评述了中美合作“西藏和喜马拉雅国际深剖面测量”（INDEPTH）项目的一些情况。现全文译出如下。

“政治的现实不可能抹煞 INDEPTH 项目中地球物理学家的贡献。INDEPTH 即西藏（T）和喜马拉雅（H）国际（IN）深剖面（Dep）测量。锡拉丘兹大学地球物理学家 Doug Nelson 花费了美国国家科学基金会 400 万美元用来探测造成喜马拉雅隆升的构造动力。Nelson 教授于 1984 年到中国访问西藏后参与了这项工作。美国国家科学基金会大陆动力学计划部主任 Leonard Johnson 称 INDEPTH 为“世界上在大陆碰撞方面进行的首次试验”。

Doug Nelson 在西藏用了两个夏天的时间，沿 100 km 长测线布置了爆炸炸药和接收地震震动，他是美方起“推动力”作用的人物。但是，没有中国地质科学院高级科学家和前副院长赵文津的努力，INDEPTH 将永远不会起动。赵说，他花费了非常多的时间，探索了这一在政治上很敏感的地区内，在同外国科研人员开展合作的研究道路上，如何解决所面临的种种困难。“当听到军事部门的首长签署同意在西藏开展工作的命令时，我们是多么高兴啊！”赵回忆时说。赵把主要精力用来协调中方参加合作的各个单位之间的关系。特别是一组美国研究人员突然在这一禁区内工作而使当地军事部门的有关人员激发发火时，他设法消除误会并获得了他们的理解和支持。

赵文津所起的重要作用也体现在本项目第一篇论文作者的排序上。这篇论文发表在《自然》杂志 1993 年 12 月 9 日号第 557 页上，赵是第一作者，Nelson 是第二作者。Johnson 解释说：“中国人是好的谈判对手”，并补充说作者的排序问题仅仅是他们列出的几百个待讨论问题中的一个。Johnson 还说，美国国家科学基金会支持合作的“唯一理由”就是“好的科学项目”。中国方面由深剖面可以得到大量的潜在社会收益，如在油气和矿产勘查方面抢了先，获得了新技术，赢得了国际上对中国专家们的承认。

该文还在第 1144 页上刊登了赵文津的一张个人照片和一张 INDEPTH 野外工作照片。

西藏-雅鲁藏布缝合带之下 地壳构造的地震填图

赵文津, J. Mechie, J. Guo, R. Meissner,
L. Ratschbacher, H. Steentoft, S. Husen,
H. J. Brauner, D. Jiang, W. Frisch, S. F. Hauff

摘要 沿着平行于主剖面的中-美 INDEPTH-II 反射测线以介于 70 与 130 km 之间的偏移距密集炮点的记录, 提供了跨越雅鲁藏布缝合带的地壳图像。其主要特征是: 在该缝合带露头之下大约 20 km 的深度上存在一些非常明显的反射, 这些反射在该缝合带露头以北和以南延伸大约 20 ~ 30 km; 在该缝合带以北具有北倾的反射层。对这些反射可能有三种不同的解释。①它们代表一个可能属于冈底斯逆冲断层系的滑脱断层。在这种情况下, 在西藏东南部填绘出来的冈底斯逆冲断层的地表显示是一种撤裂断层, 其滑脱面继续向南延伸, 或者终止为一个盲逆冲断层, 或者发生断坡上升作用而成为最北部特提斯大陆架层序之内的逆冲断层之一。②这些反射代表片麻岩内的组构, 并部分地被到达地壳不同层位的侵入体所消除。这些反射带可以按属于印度地壳的变形作用或沉积构造、增生杂岩体以及冈底斯带基底加以解释。在该侵入体可能与缝合带以南的特提斯淡色花岗岩(仁布淡色花岗岩), 及其以北的冈底斯岩浆弧有关。③这些反射代表该缝合带以北和以南不同特征的偶然巧合。该缝合带以南, 这些反射可能记录的是印度地壳的基底-盖层界面, 或者是特提斯大陆架中的一个逆冲断层系。在该缝合带以北, 它们可能组成冈底斯带及其基底范围内的不同层位。虽然在没有补充信息的情况下不可能判别所提出的这些情况孰轻孰重, 但是地震填图表明, 使该缝合带受到改造的碰撞后的(渐新世-中新世)构造具有重要意义。

一、引言

在 1992 年和 1994 年, 来自美国和中国研究机构的科学家开展了横穿西藏南部的深部地震剖面测量工作, 以便确定青藏高原主要地壳单元的几何学特点以及帮助阐明有关高原形成方面的各种问题 (Zhao et al., 1993)。在 1994 年工作期间 (Nelson, et al., 1994), 来自德国和中国研究机构的科学家记录了由放炮产生的地震能量, 这些炮眼沿着一些深部地震反射测线 (图 1 中的 “5 ~ 11”) 布置在剖面以西 70 ~ 130 km 处大约 30 个地震测站上。这些测站排列成 3 条大致呈南北走向的测线, 每条测线大约有 10 个测站 (图 1 中的 “1 ~ 3”)。测线 1 部分位于日喀则弧前盆地, 部分位于印度河-雅鲁藏布江缝合带 (ITS) 的蛇绿岩上, 部分则位于特提斯大陆架沉积层序中。测线 2 和测线 3 主要是位于冈底斯岩浆弧的深成岩中。尽管主要反射剖面按设想是提供剖面之下的二维构造图象, 但是也布置了 30 个线外测站, 为的是增加二维测量, 并提供三维构造变化情景, 特别是提供 ITS 附近三

维构造变化情景。希望对不同构造界面所做的广角测量的反射观测结果能够达到这一目的。本文的目的是介绍并讨论在主反射剖面以西大约 30~40 km 横穿 ITS 的地方在大约 20 km 深部表现突出的反射。

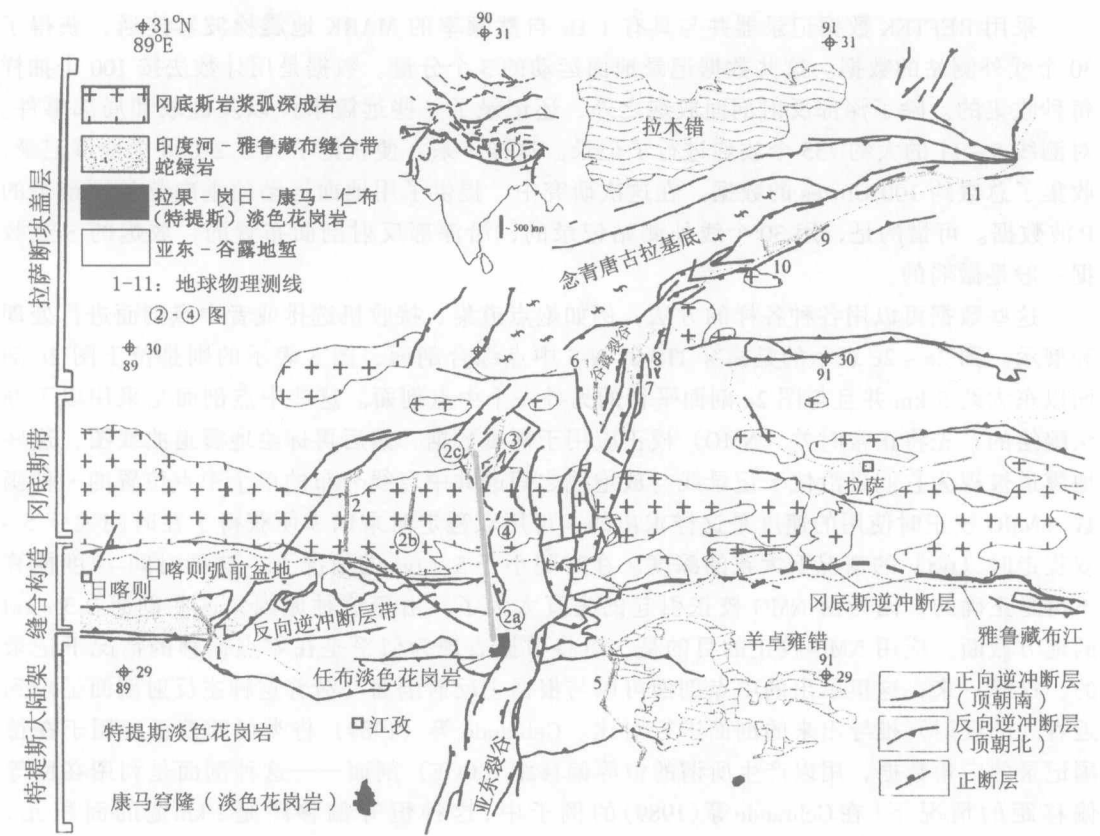


图 1 表示德国-中国广角记录测站位置的地质图

这些测站沿着测线 1~3、INDEPTH-II 陡角反射测线 5~11 以及处于测线 1~3 与陡角反射测线之间的中点测线分布。此图是根据 Burg and Chen (1984)、Kidd 等 (1988)、Ratschbacher 等 (1994)、Yin 等 (1994) 的资料编制的

ITS 包括位于亚洲与印度之间的第三纪早期碰撞带 (图 1), 是组成西藏南部表现最突出的地质构造之一。青藏高原平均海拔大约 5 km (Fielding et al., 1994), 这与高原下面 65~75 km 的地壳厚度有关 (Hirn et al., 1984a, 1984b; Molnar, 1988)。已经提出 3 种模型来解释这种厚度的地壳: ①印度整体俯冲到亚洲下面 (Argand, 1924; Ni and Barazangi, 1983; Powell, 1986); ②随着印度与亚洲发生碰撞以及印度插入亚洲之内, 无论是亚洲还是印度的地壳都缩短和增厚 (Dewey and Bird, 1970; Dewey and Burke, 1973; England and McKenzie, 1982; England and Houseman, 1986); ③印度地壳注入西藏极其软弱的下部地壳中并与其同化, 由于这种注入作用引起青藏高原的水压一致地上升和增大 (Zhao and Morgan, 1987; Nelson et al., 1996)。圈定西藏之下地质构造的几何范围, 包括圈定 ITS 附近地质构造的几何学轮廓, 应当能够阐明青藏高原形成时所涉及的作用过程以及大致阐明碰撞构造。

二、资料、处理和地震解释

采用 REFTEK 数据记录器并与具有 1 Hz 自然频率的 MARK 地震检波器连通, 获得了 30 个线外测站的数据。这些数据记录地面运动的 3 个分量。数据是用计数法按 100 个抽样每秒收集的。除了深部反射剖面放炮之外, 还记录了一些远震事件以及区域和局部事件。对测线 5~11 的大约 735 个放炮进行了记录。这样一来, 便获得了大致 21000 个地震记录, 收集了总数约 100 Gbytes 的数据。在这次研究中, 提供了用地面运动的垂向分量所记录的 P 波数据。可惜的是, 用 30 个线外测站记录的, 沿深部反射剖面布置的, 放炮的 S 波数据一般是微弱的。

这些数据可以用各种各样的方法, 例如炮点道集、接收机选排或者中点剖面进行处理和展示。图 2a~2c 表示的是横穿 ITS 的 N-S 中点综合剖面, 图 3 表示的则是位于图 2c 剖面以东大约 5 km 并且与图 2c 剖面平行的另外一个中点剖面。这些中点剖面是采用以下办法编绘的: 先将正常时差 (NMO) 校正应用于地震数据, 然后再标绘地震道曲线图, 这些地震道被视为它们是沿位于记录线与放炮线之间的共中点线分布的单个中点位置的一种函数。NMO 校正时使用的速度是这样求出的: 可用双程走时乘以 3 便获得了在时间大于 5 s 双程走时 (twl) 的情况下大致的深度。在时间小于 5 s twl 的情况下, 这种时间-深度换算不再是正确的, 因为由 NMO 校正引起的失真太大了。由于这种原因, 这些剖面在 3 s twl 的地方截断。应用 NMO 校正的目的是, 可将数据表现为似乎是在零点偏移的情况下记录的, 这样一来, 这里示出的中点剖面可以与根据主反射剖面 (沿着这种主反射剖面记录到近直立的反射) 推导出来的剖面进行对比。Gebrande 等 (1989) 将类似的校正应用于在德国记录的广角数据, 用以产生所谓的恒等偏移距 (COF) 剖面——这种剖面是利用在恒等偏移距的情况下 [在 Gebrande 等 (1989) 的例子中, 这种恒等偏移距是 2 km 宽的面积元,

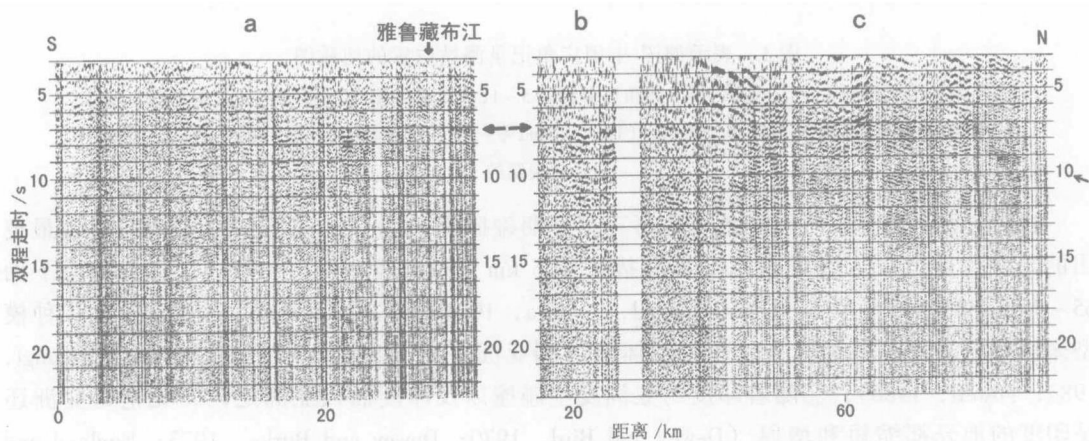


图 2 横穿印度河-雅鲁藏布江缝合带未偏移的综合中点剖面

a—为测线 2 和测线 5 标绘的中点剖面图; b—为测线 1 和测线 6 标绘的中点剖面图; c—为测线 2 和测线 6 标绘的中点剖面图。中点测线的位置见图 1。这些数据是带通滤波的 (1~10 Hz), 做过正常时差校正的, 标绘数据的曲线图, 这些数据被视为它们是沿一条位于记录线与放炮线之间的共中点线分布的单个中点位置的一种函数。箭头指向大约 7 s twt 的反射以及剖面北端的北倾的反射

也就是说,所有的偏移距与中央偏移距的距离不超出 1 km 的范围] 记录的资料编制出来的。由于这次研究所能利用的资料比起 Gebrande 等 (1989) 可供利用的资料少得多,因此笔者很难说能够编制 COF 剖面。在这次研究中,偏移距的变化范围是:从 75 ~ 150 km (图 2a) 经过 115 ~ 145 km (图 2b) 和 70 ~ 90 km (图 2c) 到 80 ~ 105 km (图 3)。

中点线的位置示于图 1。最南部的中点线 (图 2a) 位于 ITS 以南,并且正好处在亚东-谷露裂谷以西的特提斯大陆架沉积层序中。中点剖面的中部 (图 2b) 处在 ITS 以北的冈底斯带深成岩石中。北部 2 个中点剖面 (图 2c 和图 3) 横穿冈底斯带深成岩与北面拉萨断块沉积和火山层序的边界。

在中点剖面上可以观测到达到 12 ~ 14 s twt 的强反射率 (大的振幅)。在时间大于 12 ~ 14 s 的情况下,振幅一般小。在这些剖面上表现最突出的 2 个特点是:①一些大约为 7 s twt 的颇为连续的反射从 ITS 以南大约 15 ~ 20 km (图 2a) 延伸到 ITS 以北大约 30 km 处 (图 2b ~ 2c 和图 3); ②在 2 个最北部剖面的北端,具有北倾重要分量的反射从其南端的 5 ~ 7 s twt 变为其北端的大约 9 s twt (图 2c 和图 3)。这 2 个特点也可以在向东 30 ~ 40 km,包含主反射剖面以及同线广角记录的一个剖面上识别出来 (Makovsky et al., 1995; Brown et al., 1996)。特别是在这次研究中识别出来的 7 s twt 反射,被认为是与在同线广角数据中见到的雅鲁藏布江缝合带反射 (YSR) 相当 (Makovsky et al., 1995)。据认为,YSR 是一个与沿着主反射剖面在亚东-谷露裂谷更北面成象的“亮点”反射不同的事件 (Makovsky et al., 1995)。这些“亮点”反射被认为是标志着一套岩浆堆积体的存在 (Brown et al., 1996; Nelson et al., 1996)。

但是,大约 7 s twt 表现突出的反射横跨该剖面,其特征并不是一样的。在 ITS 以南,这些反射的特征是,在一个其它方面并不怎么协调一致的反射地壳中隐藏着一个强大的单旋回脉冲 (图 2a)。在 ITS 以北,在最北部 2 个剖面北端,表现突出的大约 7 s twt 反射以及北倾的反射是以大约 1 s 宽的带出现的。在这些带之下,比较协调一致的反射以短的近水平或者略微北倾的组成要素形式向下延伸到大约 12 ~ 14 s twt (图 2b ~ 2c 和图 3)。

三、地质解释

现按照目前对西藏南部地质和构造演化的认识框架 (Burg and Chen, 1984; Yin et al., 1994; Ratschbacher et al., 1994) 来解释这些反射带。ITS 蛇绿岩片和增生杂岩体以南的构造包括一个逆冲断层-褶皱带,它使特提斯大陆架沉积岩呈叠瓦状排列,并且在局部地方

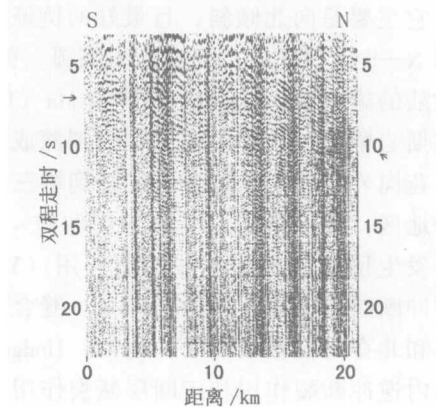


图 3 位于图 2c 所示的中点剖面以东 5 km 并且与该中点剖面平行的,介于测线 2 与测线 7、测线 8 之间的,未偏移的中点剖面。中点线的位置见图 1。数据是带通滤波的 (1 ~ 10 Hz),做过正常时差校正的,然后再标绘这些数据的曲线图,这些数据被视为是沿一条位于记录线与放炮线之间的其中点线分布的单个中点位置的一种函数。箭头指向大约 7 s twt 的反射以及剖面北端北倾的反射

使结晶基底岩石呈断坡上升到地表,形成西藏中南部范围内康马穹隆以及相关背形的核部(图1)。沿着特提斯大陆架沉积岩的中部,偶尔在其北部,产有运动同期到运动期后侵入的淡色花岗岩(拉果-岗日-康马和仁布花岗岩类)。特提斯大陆架北部沉积岩的厚度达到15 km。ITS从北到南是以日喀则弧前盆地层序、日喀则蛇绿岩和特提斯增生杂岩体为标志。它主要是向北倾斜,且最好的例证是最早期的碰撞构造向北倾斜以及下述大地构造单元的N—S出现顺序:冈底斯岩浆弧,弧前盆地,蛇绿岩和增生杂岩体。缝合带的形成以及大陆的碰撞始于或者说早于50 Ma (Ratschbacher et al., 1994)。缝合带以北的构造包括冈底斯岩浆弧,在局部地方剥蚀到深成岩的部位,造成这种现象的原因是向北的掀斜和抬升。花岗岩类侵入大部分石炭纪到第三纪早期的基底中,火山岩则覆盖在这种基底之上。这个地区,特别是缝合带,在大约27~17 Ma的时候,由于沿着冈底斯逆冲断层系岩浆岩层序发生顶部向南的逆冲断裂作用(Yin et al., 1994),以及更年青的顶部向北(反向)的逆冲断裂作用而重新活动起来。缝合带的重新活动大致与沿喜马拉雅山脉(主中央逆冲断层和北喜马拉雅正断层;例如:Hodges et al., 1992)和特提斯大陆架层序中部大规模的大陆内逆冲断裂作用和正断层断裂作用是同时发生的。

在上述框架范围内,对在大约20 km深度上观测到的反射有各种不同的解释(图4)。下面又讨论了这些可能性中的3种情形,并提议读者可以参阅其它可供替代的解释(Makovsky et al., 1995; Nelson et al., 1996)。

(1) 这些反射层标示出冈底斯逆冲断层系的滑脱面。在这种情况下,在西藏东南部通过填图查明的冈底斯逆冲断层的地表显示是一条撇裂断层,其滑脱面向南延续,不是作为一种盲逆冲断层终止就是作为逆冲断层之一在特提斯大陆架最北部层序内呈断坡上升(图4b)。如果承认沿着冈底斯逆冲断层发生了30~50 km顶部向南的逆冲断裂作用(Yin et al., 1994),那么几乎所有的反射都是在该缝合带印度地壳或增生杂岩体(它们俯冲到冈底斯带深成岩之下)内产生的。假定剖面(图2c和图3)北端北倾反射带的走向或多或少与ITS平行,那么在移动过程中,这些反射带向上和朝南运动到位于该滑脱面之上的一个位置上。因此,这些反射带可能代表冈底斯岩浆弧岩石范围内的变形带。在缝合带以北20 km与40 km深度之间存在一个宽广的、相干性较强的反射带,它可能代表位于由最上部反射带给定的滑脱面之下俯冲的特提斯沉积层序或增生楔状体-蛇绿岩杂岩体范围内的沉积构造和/或变形构造。

(2) 反射层构成先存的反射的地壳构造。这些构造部分地被区域性分布的侵入体所消除(图4c)。缝合带以南,这些深成岩体可能是特提斯淡色花岗岩,它们于运动同期或运动期后侵入到印度地壳范围内的变形带中(如沿着更南面的康马断层系分布的淡色花岗岩就是如此)。羊卓雍错以西的仁布淡色花岗岩处在使三叠系堆叠到白垩系岩石顶部的一逆冲断层系的上盘之中,该淡色花岗岩组成西藏南部活动裂谷系(亚东地堑)上盘断块的一部分。在缝合带以北,这些深成岩体可能组成冈底斯岩浆弧范围内的不同层次(图4c)。反射能力是由属于印度地壳、增生楔状体-蛇绿岩杂岩体和冈底斯岩浆弧基底的不同变形构造或沉积构造产生的。另外,位于该岩浆弧之下20 km与40 km深度之间的反射较强的带,代表熔融作用过程的残存构造,由于这种熔融作用过程,便产生了目前在上部20 km的地壳中所见到的深成岩石。

(3) 缝合带以北和以南的反射意外地吻合。对这种情形的反射带有多种解释。例如图