

岩石圈深部探测与青藏高原研究

赵文津

(国土资源部中国地质科学院, 北京 100037)

[摘要] 论述了岩石圈深部探测的作用和重大意义, 它是一项国土基础地质情况的调查, 可以为找矿预测、地震预报、能源开发及大陆动力学研究等多目标服务, 是21世纪中国区域地质调查的重要内容, 是一项伟大的科学工程; 美国、前苏联和中国此前均已作了大量工作, 但是有待深化和进一步开展调查; 简要介绍了青藏高原近些年来开展深部调查的情况和取得的主要最新成果。

[关键词] 岩石圈; 深部探测; 青藏高原

[中图分类号] P31; P51 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)02-0001-15

岩石圈深部探测是指对岩石圈, 即对地壳和上地幔盖层(或称岩石圈地幔)的探测。

地壳厚度, 中国东部为30~35 km, 青藏高原地壳最厚为75~80 km, 岩石圈地幔的厚度约为40~120 km。深部探测一般调查深度为0~40 km, 并根据需要探测到200 km, 乃至达到更深层, 即软流圈。深部探测的手段现在仍然是以深部地球物理方法为主, 并与地质、地球化学、大地测量学和深部钻探(深钻井和超深钻井)密切结合。现在近垂直反射地震法、流动地震台阵和超长周期大地电磁法的应用日见增加, 并成为主要方法。野外调查是一项大的工程。

1 岩石圈深部探测及各国开展概况

地球是人类生存和活动的场所, 当地壳发生灾害性地震(震源深度多在 $n \sim 30$ km深)时, 将带给人们严重灾难; 人类经济社会发展所需要的主要能源和各种矿产等无不是取自地下数十~ n km深处。解决上述种种实际需要都提出要对地壳深部结构及其活动性进行调查, 它们都是与地壳和上地幔深部动力作用有关。仅仅依靠地表观察而对地下深部情况作出推测, 即使是十分有经验的地质学家也

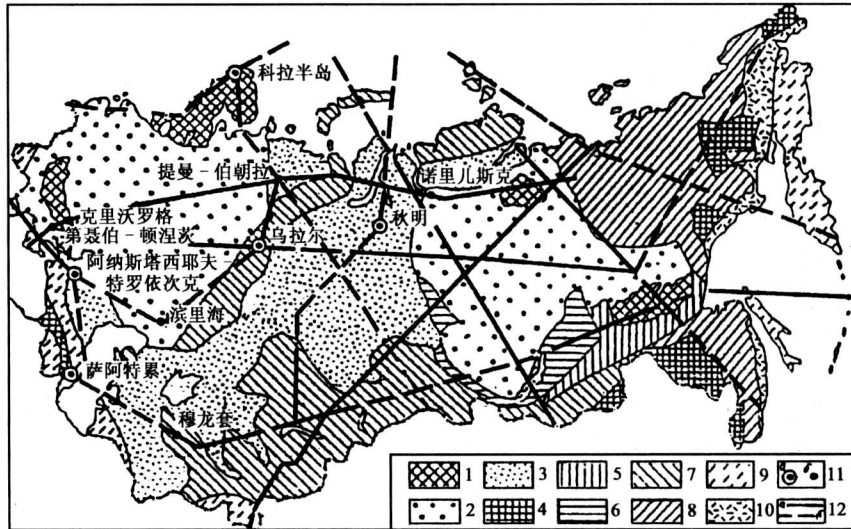
是要犯错误的。重视开展深部地球物理调查和打相应的深钻(以及海洋地球物理调查和大洋钻探), 这是近30年来地质调查的新发展和新特点。

1.1 20世纪各主要国家开展的深部调查情况

1.1.1 前苏联 深部调查工作是从1950年开始, 直到前苏联解体为止, 工作规模最大, 工作时间最长^[1]。这项工作是由前苏联地质部、石油部等部门领导的。他们把这项工作看成是为解决21世纪油气等矿产资源问题建立地质构造背景、矿产预测理论以及探测技术的储备而采取的一项重大战略措施。计划在主要含油气远景区和金属矿区以及不同的地球动力学环境区, 开展区域地质-地球物理调查(地震测深)、航天-航空地质调查以及深钻和超深钻工作, 查明地壳深部结构、深部发生的各种作用、物质组分、岩石的物理性质和状态、深部矿化作用等。计划完成12条区域地质-地球物理调查剖面, 其中近东西向剖面为3条, 近西北-东南向5条, 东北-西南向4条。到1980年已完成185 000 km测线(图1)。计划打深钻和超深钻22口, 油气区和金属矿区各占一半, 首批打10个深钻和超深钻, 其中最著名的为科拉SG-3超深钻, 它位于波罗的海地盾老变质岩区, 已打到了12 km

深以下，是目前世界上最深孔，取得了一系列重要成果。20 世纪 90 年代以来，俄罗斯又大力进行了近垂直反射地震法深剖面工作，如穿过乌拉尔的

500 km 大剖面，远东地区反射地震深剖面等给人留下深刻的印象。



1—地盾；2—古老地台；3—年青地台；4—中间地块；5—前贝加尔期褶皱区；
6—贝加尔期褶皱区；7—古生代褶皱区；8—中生代褶皱；9—新生代褶皱区；
10—火山岩带；11—钻井（a—超深井，b—深井）；12—深地震测线（a—已完成的，b—计划的）

图 1 前苏联地质—地球物理综合调查剖面分布图

（本图的国界线是按原文附图绘制的，只供参考）

Fig.1 Location map of integrated geological-geophysical profiles of former USSR

1.1.2 美国 从 1974 年开始实施“大陆反射剖面计划”（COCORPS）^[2]（图 2），同时提出“大陆科学钻探计划”，前者是用深反射地震法进行，是公益性的，目标是研究大陆地壳结晶基底及其下部的地质构造，查明矿产生成，地热资源和地震灾害发生的地质构造背景，到 1985 年已完成 6 000 km，

1995 年完成了约 20 000 km。在美国东部地区取得了很好的找油气效果，在古生代地层下发现几十个中生代油田。1989 年法国地球物理总公司美国分部的伯塔尼提出一个“巨型剖面项目”^[3]（图 3），计划用石油地震（已有 32 000 km 测线以上的资料）和 COCORPS 计划资料编东西向 3 条，南北向

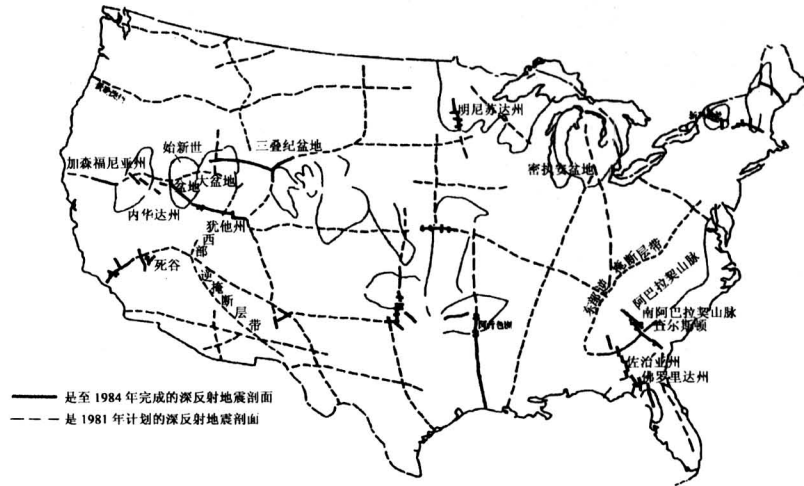


图 2 美国深反射剖面计划（COCORPS）与 1984 年完成剖面分布图

Fig.2 American COCORPS with profiles completed by 1984

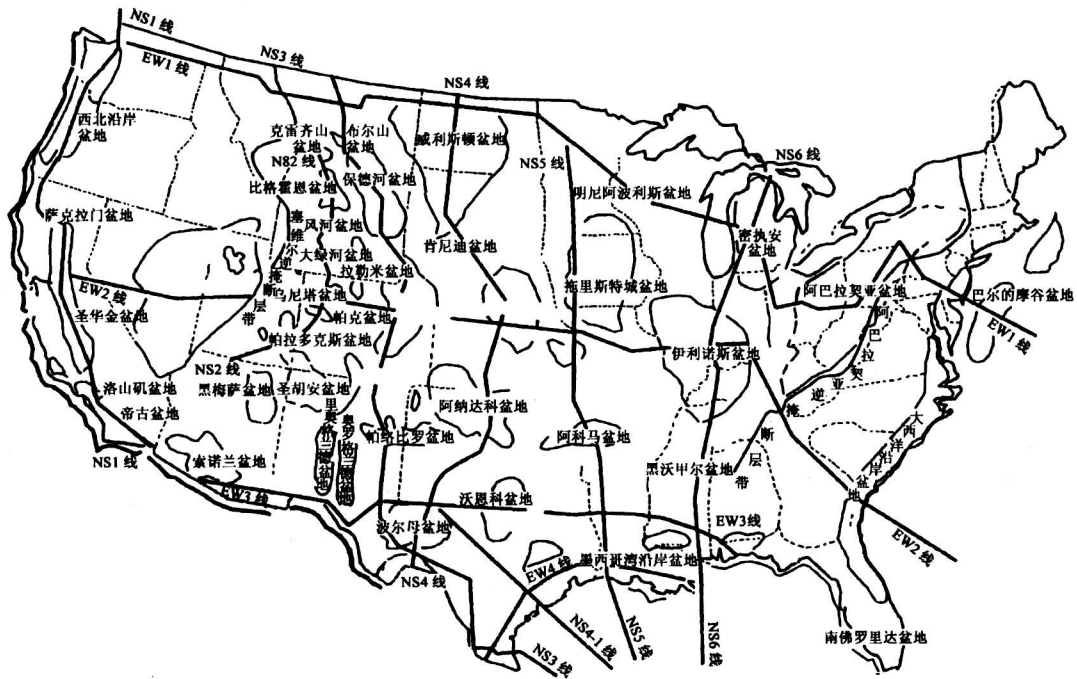


图 3 美国巨型剖面计划图 (1991)

Fig.3 American mag-regional project with nine seismic transects

6 条, 共 9 条地震剖面, 为盆地评价服务。美国“大陆科学钻探计划”计划打 2 000 口探井, 以浅井为主; 仅在重点地区打深探井 (3~10 km)。除在含油气沉积盆地内打过两口 9 km 深的基准井外, 已在旧金山地震区圣·安德列斯大断层附近打了一口 9 km 深的深井, 穿过大断层观测地应力的变化, 研究断层引起地震活动的原因。

1.1.3 中国 1958 年中科院在柴达木盆地进行了首次地震测深方法试验^[4]; 1966 年邢台大地震后国家地震局在首都圈和南北地震带等地震区开展了地震测深工作^[5], 1984 年进行了唐山地震区近垂直反射深地震试验, 以求查明强地震区的详细地质构造^[6]; 1983-1985 年地矿部在下扬子碳酸盐岩含油气远景地区进行近垂直反射深地震和地震测深等多种方法试验^[7], 目的是查明深部可能的推覆构造, 寻找深部隐蔽的含油远景区; 1980-1982 年地矿部与法国联合在喜马拉雅地区进行了大规模的广角地震探测^[8]; 1985 年中国岩石圈委员会制定了包括有 11 条大剖面的全国地学大断面计划, 以求弄清中国主要大地构造单元间的构造关系^[9] (见图 4); 1985 年国家地震局在长江三峡坝址区段进行了地震测深^[10], 研究地壳的稳定性问题等等。迄今全国已完成地震测深 (或称广角地震) 约 50 000 km, 深反射地震剖面约 5 000 km。石油部门

已在四川龙女寺构造和塔中油田各打了一口 7 000 m 深的基准井, 中国第一口科学钻井, 选在江苏北部的东海县, 计划打 5 000 m 深, 先导孔已于 2001 年 6 月开钻, 到 2002 年 5 月已钻进到 2 000 m, 计划的目标是研究超高压变质带岩石如何出露到地表的动力学问题。

其它国家如德国、法国、英国、加拿大和澳大利亚等国都有自己的深部探测计划。

1.2 深部综合调查解决的主要问题

1) 查明断裂构造的产状及其向深部延伸情况, 断裂系间深部的关系, 断裂的形成与区域构造运动的关系, 断裂的活动性和对油气盆地的作用, 深部物质的物理、化学、岩石学性质, 等等。

2) 了解出露的岩浆岩、火山岩带深部产出情况; 有无隐伏岩浆岩体带, 部分熔融体或熔融层的存在, 岩浆活动与深部构造作用与成矿作用的关系; 岩浆活动与地热资源及地热资源评价; 地热流体与成矿作用; 关于岩体深部稳定性问题。

3) 圈定地表大规模推覆构造下的隐伏盆地; 老地层或下地壳出露地表的机制; 造山作用的特点; 成盆的地质构造背景; 有无深部烃类物质的交换, 地热流对油气成熟度影响等等。

4) 岩石圈地幔在大陆地块 (板块) 碰撞地带的变形、增厚、减薄、俯冲到软流圈内的情况等,

以及其对地壳上部和下部的影响。

上述的调查研究成果应属国土基本地质背景调

查的性质,可以为找矿、地震预报、大陆动力学理论研究等各方面服务。

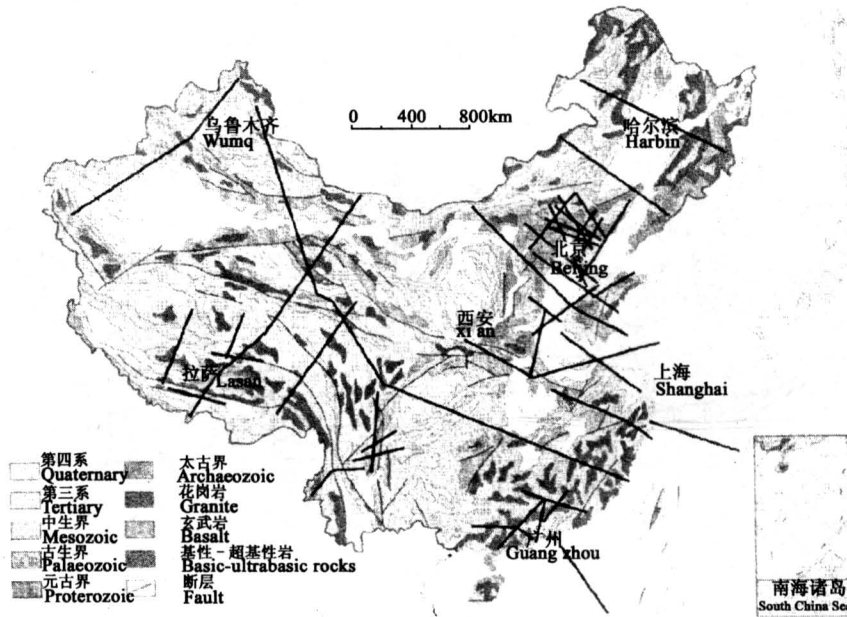


图4 中国2000年前完成的地震测深测线分布图

Fig.4 Location map of wide-angle seismic profiles completed by 2000 in China

1.3 深部调查的深远意义

如果说过去的区域地质调查仅仅是依据在地表所作的地质观察而对地壳构造演化作出推测,建立起自己的地球构造观,如果今后能将单一学科的地表地质调查与多学科深部调查结合起来,建立起新的四维地球演化观,并将这些变化的解释建立在现代物理学、化学和宇宙学的基础上,将会使地质学摆脱了主要是描述现象学的阶段,使人类对地球的认识进入到一个新层次。钱学森在《现代科学技术的特点和体系结构》中提出“天、地、生、化这四门科学,从现代科学技术观点讲,都可以归结于物理学的分支了。当然,这里要推理演算,就要用数学,数学是一个工具”^[11]。钱老指出的当代科学技术发展也应是地学发展的未来走向,深部调查工作将可为此搭起一座过渡的桥梁。

青藏高原是我国深部调查工作的热点地区之一,也是国际地学界调查研究的热点地区之一,并成为当代地球科学竞争的焦点。现对其调查研究进展情况简介如下。

2 关于青藏高原的深部调查

2.1 青藏高原深部调查有重要意义

理论上讲,喜马拉雅山和青藏高原是近代大陆

与大陆碰撞的典型地带,变形区总面积可达 3×10^6 km²,平均海拔在4 500 m,为地球上最高最大的高原。喜马拉雅山脉东西长约2 500 km,为地球上山脉之最,且形成时代最新,海拔7 000 m以上的山峰有20多座,珠穆朗玛峰即位于山脉的中部。

1979年国际板块代表团在西藏考查报告中提到:“在大地构造方面,地球上再没有任何地方存在着比印度—欧亚碰撞带更为重要、更为复杂、更能引人注目的问题了。现今的地质学家们,对大陆碰撞现象了解较差,而印度—欧亚带正是近代碰撞作用的最好范例。这种碰撞作用大约始于40或50百万年以前,显然经过不断地变化一直持续至今。这一碰撞带之所以具有特殊意义,一则是因为可以认识喜马拉雅山脉—西藏地区(包括地球上最高最大的高原)本身的特征和成因;二则是因为通过了解现代碰撞,可以促进对以前洋盆关闭和其它大陆碰撞的认识,大大有利于基础科学和应用科学的发展。”^[12]所以,国际地学界都在积极地研究喜马拉雅造山模式和青藏高原隆升机制,为建立新的造山带和高原形成的理论作出自己的贡献。这是从理论发展意义上说的。

对中国讲,青藏高原在中国,既然我们具备了这一先天条件,我们对国际地球科学的发展作出贡

献应当是责无旁贷的；青藏高原的开发又是我国当前的战略任务，我们开发它既需要深部调查成果，也需要地球科学理论的指导，因此说两者是相辅相成密切相联的关系。

青藏高原及其邻近的变形区几乎占到我国国土面积的三分之一，中国众多大江大河的发源地，也是我国西部大开发的主战场；由于本区工作程度极低，又有许多特殊之处，所以开发工作具有很大的挑战性；多年来青藏高原区域地质调查和深部调查中发现有许多重大的地质问题有待解决，如地表大断裂延伸和活动性，作为羊八井地热能基础的地下部分熔融层的分布范围，地壳厚度变化，地壳结构等等，这些问题也正是研究高原内天然地震发生的深部地质构造和动力学的背景所必需的，也是与西藏羊八井地热田的远景评价密切相关。高原南北大规模的部分熔融层及广泛的热液活动将对形成金铜等多种金属矿产是十分有利的；藏北羌塘盆地的中生代海相地层是全国惟一的尚未很好进行含油气远景评价的地区；此外，本区内多条构造岩浆带都与金属成矿前景关系密切，因此，西藏的深部调查对西藏的开发关系很直接。

2.2 过去调查简况介绍

前地矿部从 20 世纪 70 年代末开始，先后或单独或与有关国家合作开展了几个大型的区域地质调查和深部调查项目。

1980—1982 年中法合作进行的“喜马拉雅山地质构造与地壳上地幔形成演化研究”项目^[13]，作了 3 条共 1 500 km 长的广角地震剖面，以及两个湖的地热流数据，9 个点的大地电磁数据，以及大量的古地磁数据。

1986—1995 年执行了亚东—格尔木—额济那旗地学大断面计划^[14,15]，以大地电磁法、重力、磁测、地热流为主，少量广角地震，纵贯高原南北。

1992—1998 年中法合作“东昆仑及邻区岩石圈缩短机制”项目^[16-19]，首次进行了密集的流动地震台阵观测（从定日—格尔木，先后共布设了 109 个地震台站），记录了大量的天然地震资料。

1992—2002 年由中、美、德、加四国合作进行的 INDEPTH（国际喜马拉雅和西藏高原深剖面的英文字头）计划^[20,21]，从 1992 年开始，现在已进行到第三阶段，它的实施将我国岩石圈深部探测提到了一个新水平。

INDEPTH 项目的特点是：

1) 以多种高新技术探测为主。如近垂直深反射地震（探 80 km 深，是世界上的第一次！），大规模数字地震台网（整个测线先后共铺设了近 130 台流动式地震仪器，高、中、低频结合以低频或宽频仪器为主，记录时间长达 1 年），密集炮点的广角反射地震，及三种地震方法的综合地震探测；宽频及超长周期大地电磁法结合（是世界上的第一次！），深源捕虏体矿物系列分析、年代学、GPS、模拟技术等及多种新处理方法软件开发应用。这项调查具有很大的工程性，施工人员、工作车辆很多。

2) 紧紧扣着一些前沿科学问题，突出高起点，强调综合化。如第一阶段强调调查清楚断裂向下延伸情况，莫霍层有无大断裂；第二阶段发现了雅鲁藏布江北边的中壳部分熔融层后，在第三阶段则重点追踪圈定它向北的发展；对地壳内的部分熔融层，在资料处理和研究中则着重进行论证，求证。

3) 多国集资合作。多国合作，发挥各自优势，在共同取得野外实际数据后，参与国各有一份，然后分工处理，发挥自己特长，共同对比与讨论，再分头编写论文，在研究团队内部也引进竞争机制。

2.3 对这项研究的评价

前国际岩石圈委员会主席 K. Burke 教授在第 30 届国际地质大会的主旨报告中指出，“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。”^[22]这是对 INDEPTH 模式的肯定和给予的高度评价。

美国国家科学基金会大陆动力学部主任 L. Johnson 评论说，“这一研究组过去在喜马拉雅山—西藏高原区域的工作，已经对我们了解造山带和与之相关联的高原做出了重要贡献，并已赢得了全球的认可，… 您们肯定地以能在推动这样一个复杂的多国合作的新事业中的成功而获得自豪。”“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。”^[23]

中国《科技日报》基于上述两点内容，以“在地壳最深处找到两把金钥匙”为标题在头版头条地位作了报道。

国家科委组织专家评本项目为 1998 年取得突破性进展的“中国基础研究十大新闻”之一。2000 年获国家自然科学二等奖。

2.4 INDEPTH 取得的主要成果

可以分为5个方面,对过去成果有了很大的修正。INDEPTH工作布置见图5。

地质学家对组成青藏高原的地块划分和大地构

造的认识是不统一的。先后提出了多种划分方案,这里我们选用尹安2001年5月发表的划分方案^[24](图5)。

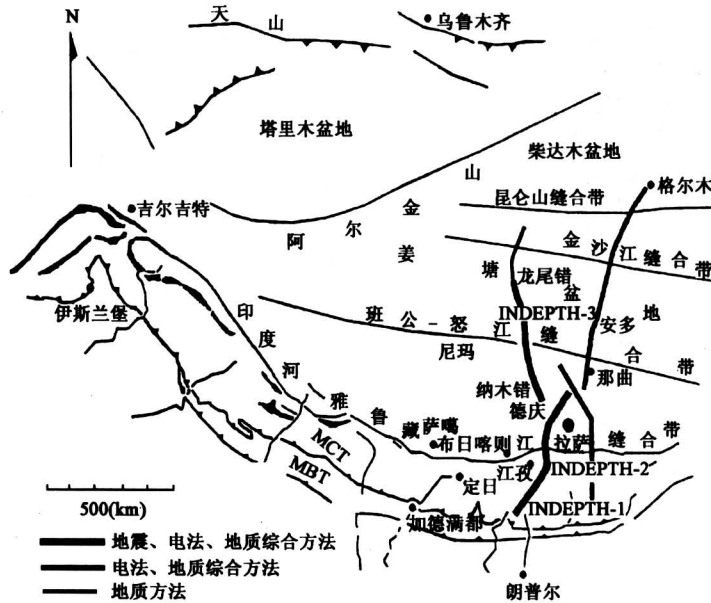


图5 INDEPTH测线分布图

Fig.5 Location of INDEPTH profiles

尹安认为青藏高原是由8个东西向伸展的条块(或称条形地块,或条形地体)组成,由南向北分别为喜马拉雅地块,拉萨地块,羌塘地块,松潘—甘孜—可可西里地块,昆北—柴达木地块,南祁连地块,中祁连地块和北祁连地块;8个地块之间由7条缝合带或大断裂所分隔,即雅鲁藏布江缝合带(YZS),班公湖—怒江缝合带(BNS),金沙江缝合带(JJS),阿尼玛卿—昆仑—木孜塔格缝合带(AKMS),南祁连缝合带(SQS),党河缝合带(DHS),北祁连缝合带(NQS)。

地质学家们对多条大断裂的向下延伸情况,断裂性质,断裂相互关系等都有不同意见,如对班公湖—怒江缝合带的性质,一种意见认为是缝合带,其南北是两个地块。另一种意见认为它仅仅是一般的断裂,其南北两地块就是一个地块。也有人认为羌塘地块中部存在一条缝合带,即龙木错—双湖—澜沧江缝合带,是南北两大陆的分界线。对地块之间的构造关系,有的人认为北边的地块向南俯冲,而另外一些人认为北边的地块向北俯冲,有的人认为南边的地块是向北俯冲;还有的人认为根本就不存在缝合带和陆内俯冲,等等。对地壳增厚意见是

一致的,但是增厚多少和增厚方式意见则不一致。下面分5个问题作介绍。

2.4.1 关于地壳的细结构与大断裂延伸^[25](见图6,图7)

1)发现了一条完全隐蔽的大型拆离层,即喜马拉雅地体内的主喜马拉雅逆冲断裂(MHT),它位于喜马拉雅山脊下26 km深,以9°的倾角向北延伸了150 km以上,在雅鲁藏布江之下加深到40 km,它将部分变质的下地壳层推到了雅鲁藏布江南侧的浅层(未出露在地表,但是有重力高显示)。

同样在拉萨地块内,确定了念青唐古拉逆冲断裂(MNT),将老的中元古代的下地壳推向浅部,后又为谷露裂谷左旋断裂推向北部,成北东走向。

在羌塘地体内也发现一条断裂,大地电磁电阻率结构剖面上显示很清楚,为向南推覆,称主羌塘逆冲断裂(MQT),沿倾向长度可达100~200 km左右,为低角度,也是发育在上、中地壳内,它们分别将深部的地壳推到浅处。

这类断裂可能是两大陆(或两地块)碰撞后最早出现的,均为低角度的拆离层,其底部成为后期上地壳内出现的多条断裂的包络面。

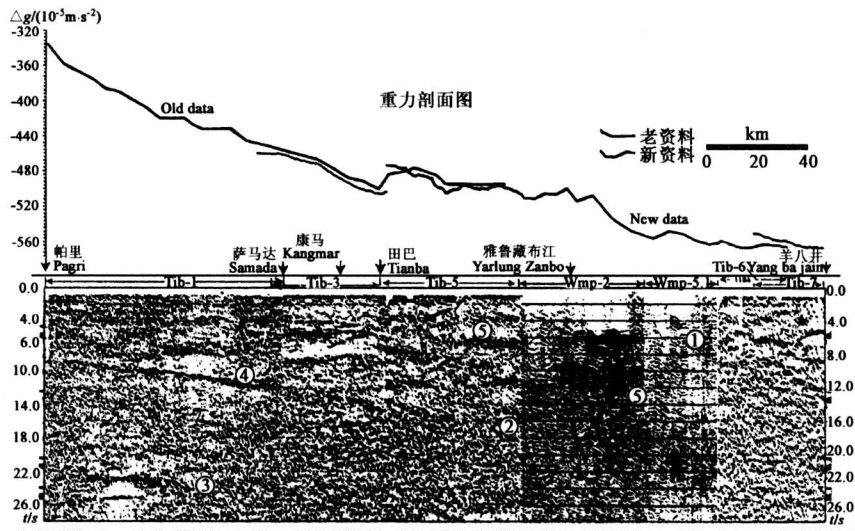
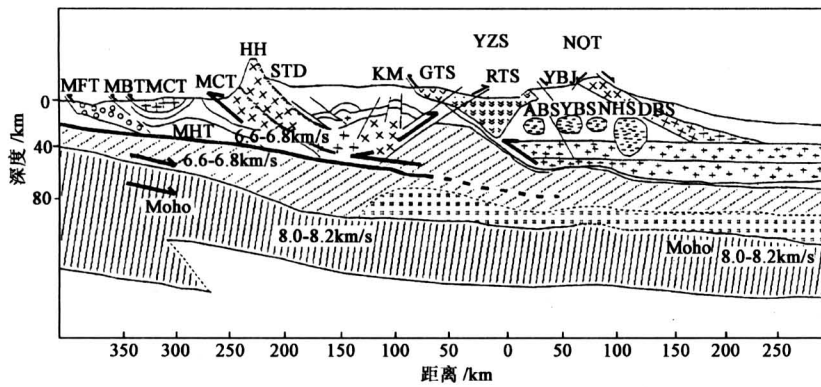


图 6 藏南深反射地震叠加剖面图

Fig.6 Deep reflection stack section beneath Southern Tibet



HH—高喜马拉雅结晶岩带；YZS—雅鲁藏布江缝合带；NQT—念青唐古拉山；YBJ—羊八井地堑；
 MFT—主前缘断裂；MBT—主边界断裂；MCT—主中央断裂；MHT—主喜马拉雅逆冲断裂；STD—藏南拆离系；
 KM—康马穹窿；GTS—冈底斯逆冲断裂系；RTS—仁布冲断裂系；ABS—安岗亮点；YBS—羊八井亮点；
 NBS—念青唐古拉亮点；DBS—当雄亮点

图 7 藏南构造模式

Fig.7 Southern Tibet structural model

2) 上述大拆离层将地壳划分为两层，而不是过去提出的三层（上地壳、中地壳、下地壳）或重叠的四层结构（上地壳、下地壳、上地壳及下地壳）。

上地壳层——脆性、相对为高电阻、速度低、密度小；下地壳层——粘塑性、低电阻普遍、高速、密度大，反射同相轴分布很不同。

3) 上地壳层内断裂发育，向南的逆冲与向北的背冲断裂并存，但是这些大的断裂向下都终结在中壳部位，变为铲式；俯冲与逆冲引起部分熔融层形成，喜马拉雅山北部的浅色花岗岩带可能即与此

有关；喜马拉雅山就是特提斯喜马拉雅结晶基底岩层向南两次或三次推覆的结果，目前这一过程仍然在进行中。未证实过去提出的中壳部位普遍存在的低速高导层。

4) 在 MHT 的控制下，在两大陆挤压过程中喜马拉雅山向南增长，并随时间的推移，依次在更南部发生新的断裂，即先是 MKT（主康马逆冲断裂），后有 MCT（主中央逆冲断裂），再后有 MBT（主边界逆冲断裂）和更新的 MFT（主前缘逆冲断裂）等，都是归并于或趋于平行于 MHT。

5) “缝合带”及若干大断裂向下延伸还没有确

定有切过中地壳的,更没有切过岩石圈的,大断裂向下伸展最终变为铲式;洋壳标志的蛇绿岩套,除高精度航磁在雅鲁藏布江蛇绿岩带上有明显的条带状异常外,怒江蛇绿岩体很分散,形不成一个带,其它蛇绿岩体上也显示不好,难以圈出,显示构造造成的破坏是严重的(图8)。

6) 大型拆离断裂与主要背冲断裂一起形成鳄鱼

鱼嘴式结构;局部地段出现大的褶皱(如康马穹窿),而碰撞带附近的逆推断裂则是在稍晚时期发生的。

概括地壳增厚方式:上下地壳是不同的,前者是以不同规模的逆冲和背冲构造,加上局部褶皱为主;后者则以挤压增厚为主,大型低角度的拆离层则是其约束因素。

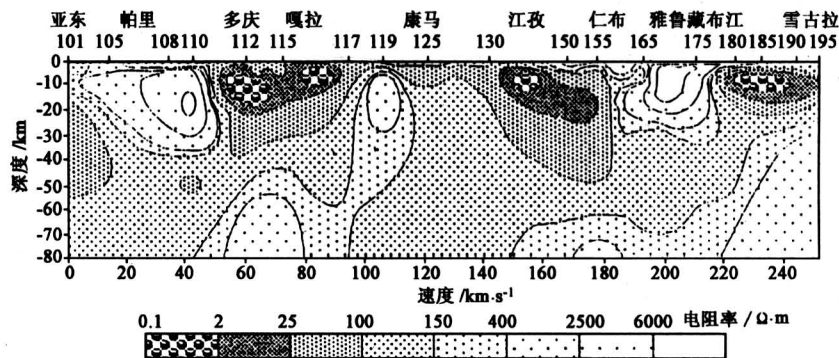


图8 藏南大地电磁剖面图

Fig.8 Magnetotelluric section beneath Southern Tibet

2.4.2 关于高原地壳厚度和莫霍层断裂问题^[25,26]

过去地质学家推测高原地壳厚度比正常地壳(35~40 km)加厚1倍,其底部的岩石圈地幔上有多条深大断裂。

1) INDEPTH用多种方法求出沿INDEPTH剖面,喜马拉雅山下地壳厚75 km(不是55 km或53 km),并成簸箕状向北缓慢抬升,到班公湖—怒江缝合带南北变为60 km±5 km,羌塘盆地地壳厚为60 km±5 km,而不是重力与地震联合反演得到的80 km,为高原地壳最厚处^[14];与以重力结果为基础,给出的“底深64 km的平底椭圆盆形,分布在全高原”^[27]的模式也不同。

在喜马拉雅山下面的莫霍层反射是复杂的,似为多层体,南北伸展有限,目前还没有一个较好的解释。

2) 喜马拉雅山下,雅鲁藏布江缝合带及班公湖—怒江缝合带均未见20 km和10 km断距的断层台阶。未证实过去广角地震扇形剖面给出的“莫霍层有7条大断裂”^[28],“地壳底部深度起伏变化很大(55~75 km深)”,一些地段“还有双层莫霍出现”等结论^[29]。

2.4.3 关于岩浆岩与火山岩问题

1) 发现在雅鲁藏布江以北尼木—当雄间一组4个地震反射亮点^[26,30~34],8种方法检验都一致,

有低重力、低速度带和高电导性异常显示,计算了拉萨地块向冈底斯岩带下俯冲可以产生足够的熔融温度,本区地温梯度高达40℃/km,推测它为含水花岗质的部分熔融层,深度为15~25 km,向北延伸达80 km,估计应为羊八井—那曲地热的深部来源。

2) 藏南各个大的中酸性岩浆岩体为高阻体,低密度体,向下延深都不会超过20 km^[26]。

3) 发现在藏北的安多—格尔木和德庆—龙尾错剖面上的一些地段也存在高导电层^[35],分布比藏南的浅一些,但是有高重力场伴随,火山熔岩中深源捕虏体分析为无水变质沉积岩和镁铁质捕虏体,相当于30~50 km深度,表明晚中新世时地壳已增厚,并具有较高的热状态;它与藏南的浅层部分熔融层有所不同;火山岩活动于3 Ma,时代较新^[36]。这一高导电层对控制地震发生,断层活动以及天雷灾害可能有重要影响,今后青藏铁路安全要考虑。

高精度航空磁测圈出羌塘地块INDEPTH工作区内的磁异常^[37],为一片北北东走向的宽阔的负异常,向上延拓几十千米强度变化不大,周伏洪等认为它很可能是磁性层底部抬升,加上磁性层受热而产生退磁的结果,不过更可能是地下浅处橄榄玄武岩层所引起^[37],这一点尚需进一步探讨。

4) 在羌塘盆地中部或唐古拉山区发现有近东西向的重力低带，推测为隐伏花岗岩带，由唐古拉山口向西北延伸，经格拉丹东，普若岗日向西伸展达 200 km，该异常带向东南伸展，可与他念他翁山相连，异常带线性强，走向长，可以与冈底斯岩

浆带对比^[38,39]；地表对岩体采样测年时间是燕山期的，为几十个 Ma；这对盆地油气评价和盆地性质及地块划分有重要意义。过去一直认为它是盆地地壳加厚所致（图 9）。



图 9 青藏高原布格重力图

Fig.9 Bouguer gravity map of Qinghai-Tibetan Plateau

2.4.4 关于上地幔盖层（或莫霍层、岩石圈地幔）的走向 迄今为止，许多人一直认为印度大陆厚的岩石圈地幔整体与青藏地壳是紧密相连接的^[40]，有人认为在藏北发生了热拆沉岩石圈地幔减薄^[41]，地学大断面用地震面波和大地电磁数据推测其厚度

为 90~120 km^[14]，而且是和地壳紧密相接着。这一问题直接关系到高原隆升现象的解释。我们作了远震体波层析成像，取得了分辨率最高的上地幔速度结构图^[42]（图 10）。

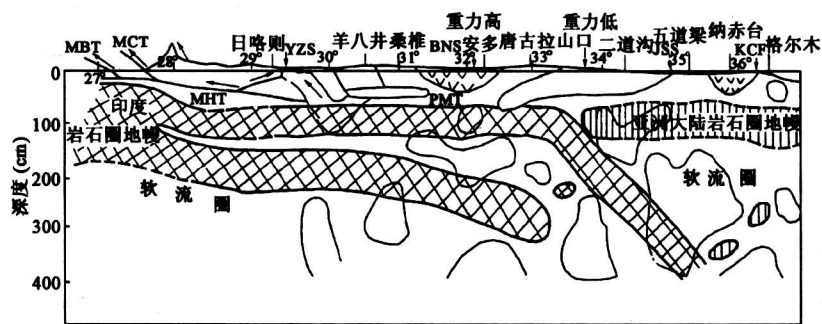


图 10 青藏高原中南部高分辨率地震层析成像构造解释图

Fig.10 Structural interpretation of high-resolution seismic tomography of Southern Tibet

1) 青藏高原南部的岩石圈地幔的厚度为 30~40 km，其深部还有一层较厚的高速层， $V_p = 8.3 \sim 8.4$ km/s，厚度约为 50~60 km，比北部的岩石圈地幔速度高，具有印度地盾区岩石圈地幔（厚度达 100 km±）的特点，相当于印度岩石圈地幔的

下半部。认为在印度大陆向北移动，并与亚洲大陆岩石圈地幔碰撞后，作为地盾型的印度大陆，其巨厚的岩石圈地幔在 100 km 距离内要加深 40 km，它将因受强烈地挤压挠曲而发生拆离，分成上、下两层，分别厚约 30~40 km 和 50~60 km。

2) 印度岩石圈地幔的上层向北延伸并穿过雅鲁藏布江缝合带、拉萨地块到达羌塘地块的中部, 在整个的碰撞挤压过程中没有增厚, 更不可能达到 200 km 厚, 在推进到羌塘地块中部后发生了向下俯冲, 或分段下落, 下落块段应为“冷”的印度岩石圈, 1997 年 J. Owens 等提出的地幔岩石圈因受热而发生拆沉变薄的模式可能是指亚洲大陆的岩石圈地幔发生了这种情况^[41]。

3) 印度岩石圈地幔的下层则从喜马拉雅山向下以 30°角直接斜向下插到软流圈内, 层析图上显示它已下插到 300 km 深度, 现在的前锋已达温泉和沱沱河之间, 即北纬 33.5°。

4) 上层分段断开处与下层斜向下插前锋处, 显示了从软流圈到地壳全空间内低速体、低速柱的出现, 一些地点上下低速带相连通, 表明热的向上传递, 可能带来部分下部物质的上移, 这可以为藏北近期火山岩活动多, 以及向北火山活动更年青的现象作出解释, 是否有地幔物质的直接上涌到地表还有待进一步求证。藏北地壳和地幔盖层的速度都是低的, 可以用这一结果解释。这一结果与 1990 年地学大断面提出的“藏北地壳最厚, 上地幔盖层加厚和冷壳冷幔”的论断是完全不同的。

5) 高分辨率层析成像图还显示, 羌塘以北的洋壳和地体的去向还不明, 可能是分段向南俯冲。

2.5 关于青藏高原隆升

高原隆升过程研究的意义, 一是通过高原隆升过程与地壳增厚、上地幔构造演化过程的对比, 进一步印证高原隆升机制的分析; 二是为研究高原隆升对周围环境, 特别是对东亚大气环流产生的影响。现在已提出多种看法, 尚未趋同。研究高原隆升依据的主要方法有裂变径迹法、热年代学以及古生物分带、海洋沉积和黄土沉积学、古季风研究等研究结果。主要看法有:

1) 高原是整体隆升还是分地块先后隆升的? 许多学者都认为是整体隆升, 隆升与地壳增厚后, 因浮力反弹而上升。最近尹安再次提出高原南北地块是在 50~40 Ma 时期内同时隆升的^[24]; 但是 P. Tapponnier 则提出高原是由三个地块分先后隆升组成的, 即喜马拉雅—羌塘地块最早隆升 (始新世, 约 50 Ma), 次为巴颜喀拉地块隆升 (渐新世—中新世, 约为 37~24 Ma), 再为昆仑山以北地块 (上新世—第四纪, 约为 5 Ma—现在), 几条大

型左行走滑断裂起着地块活化作用^[40]。

2) 对整体隆升的过程也有不同看法。有人认为是碰撞后持续挤压到一定程度后才开始隆升的, 如 Harrison 等人认为高原是从 21 Ma 开始隆升, 到 8 Ma 达到最高^[43]; M. Coleman 等认为, 高原在晚中新世以前, 即约在 14 Ma 时达到最大高度, 随后高原发生大量的东西向拉张, 标志着高原开始发生坍塌^[44]。李吉均、张青松等认为, 碰撞后持续挤压情况下高原并没有随之隆起, 而是长期保持在 1 000~2 000 m 高度, 直到 3.4 Ma 或 2.5 Ma 开始整体性强烈隆升。潘裕生等在概括各家测定成果后提出^[46], 45—38 Ma 是印度大陆与欧亚大陆碰撞的高峰期, 使岩石圈均匀增厚和垂向隆升, 为构造抬升; 25—17 Ma 时期高原内部和冈底斯岛弧带为快速构造隆升, MCT 和 MBT 活动并向南迁移; 13—8 Ma 喜马拉雅地块上的 MBT 强烈活动, 大规模逆掩推覆造成地壳增厚与重熔花岗岩侵位等; 3 Ma 前后高原的快速抬升, 随即发生强烈抬升。

3) 本项目采了藏南和藏北 6 个花岗岩样品利用热年代学求出 78—45 Ma 时为快速隆升, 25—8 Ma 为整体隆升, 8—6.5 Ma 为裂隙与差异升降时期^[48]。主要夷平时间为 40—25 Ma, 与 15—8 Ma^[51]。钱方 (Qian Fang, 1995) 利用磁性地层学方法确定藏北有三次隆升, 即 60—50 Ma, 15—12 Ma 和 5—4 Ma。两者都是三次隆升, 但是具体时间段有些不同, 可能是这两种方法不同所致。上述几家提出的高原隆升过程时段相差较大, 许多问题还有待进一步工作。

2.6 高原运动探讨

可从近几年的 GPS 观测结果^[48]来探讨高原现代运动 (图 11 (a), 11 (b)):

1) 从平面运动速率矢量图上可见, 印度大陆是向北运动的, 高原内部各个地块向北运动速率是逐渐减小的, 运动方向也逐渐转向东北方, 其中, 南部高喜马拉雅地块水平运动速率最大, 一般为 35~42 mm/a, 方向为北略偏东; 拉萨地块运动速率平均为 27~30 mm/a, 方向为北东 30°~47°, 东西向拉张速率为 10~18 mm/a; 羌塘地块有 5 个 GPS 站点, 求出运动平均速率为 (28±5) mm/a, 优势方向为北东 60°; 柴达木盆地运动平均速率则为 12~14 mm/a, 优势方向与北东 60°相近; 祁连山地块运动平均速率为 7~14 mm/a, 方向为 70°~

90°。这近似的表明，喜马拉雅弧还是主要的受力边界。

王泽民等利用地震矩张量与 6 年两期观测的 GPS 数据解算，求得珠穆朗玛峰地区水平运动为 6

~7 cm/a，方向为 54°，即除去向北运动外还有向东的走滑运动，这一结果与上述结果在运动速率和方向是一致的^[49]。

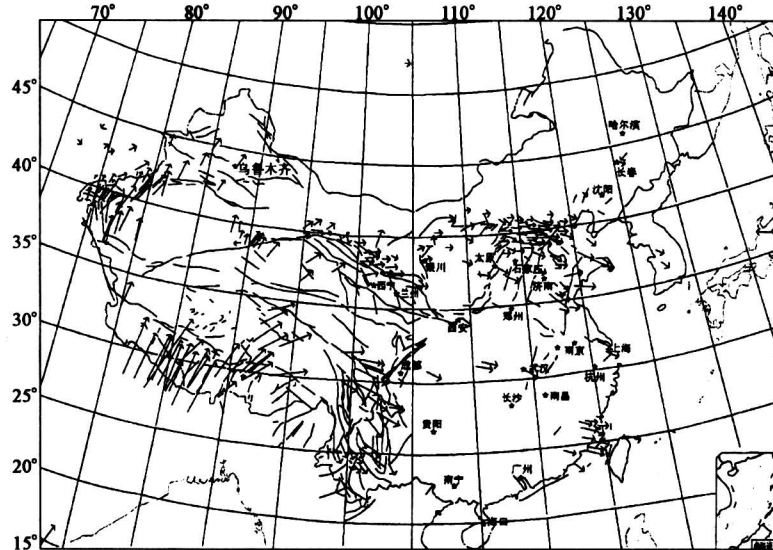


图 11 (a) 青藏高原 GPS 得出的地壳水平运动速度场 (箭头是 GPS 观测站运动速率)

Fig.11 (a) GPS derived horizontal velocity field in the Tibetan Plateau

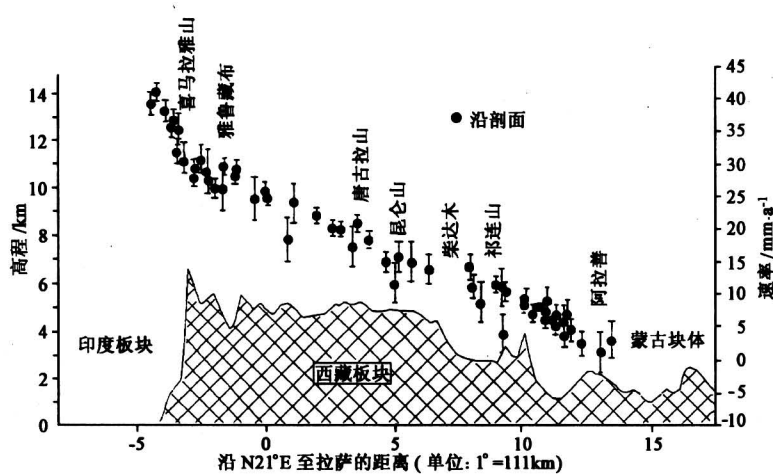


图 11 (b) 横贯青藏高原地壳运动速率剖面图

Fig.11 (b) Velocity profile across the Tibetan Plateau

GPS 观测结果表明高原内向北的挤压力是逐步减小的，力在传递过程中不断被吸收。吸收的原因一是由于高原组成的各条形地块的南部边界或是偏向西南，或是偏向西北，印度大陆向北作用力沿各条形地块边界都出现切向分量，使地块间出现相对右行或左行的走滑运动，而使垂直于条块边界的挤压力，则是向北逐渐减小的；利用天然地震资料

求出的深层物质地震剪切波的快波方向与这些走滑边界大体上可对应，这表明了深部和浅层物质运动有一定的相关性。

这种挤压力的分布使高原的南部的地壳增厚较大，向北则减薄，而构成铲式特征，这与实际探测结果是一致的，表明了各地块运动是以北向运动为主的，而不是南北向中间会聚。

挤压力减小表明地壳缩短量将减小，但是北部条形地块地壳的厚度仍然增厚并达到了近乎正常地壳 2 倍的厚度，可能原因是 GPS 测定的结果是短期的，不能代表长期的地壳运动，实际情况可能是地块平缓渐进式运动与大地震突发式错动相结合；也可能是北部地壳的增厚主要是发生在深层，因为已发现北部的表层第三纪地层有构造变形小的特征。

2) 高原地壳的垂直运动，从近几十年的水准测量结果看，变化起伏较大，总的南部还在不断抬升。图 12 (a)，12 (b) 给出了水准局域网测量

的结果^[50]。上世纪 70 年代比 60 年代藏南普遍升高 40~80 mm，藏北则下沉达 60~80 mm，低槽位于噶尔（狮泉河）到格尔木一线，成北东—南西向；90 年代比 70 年代全区则普遍下沉，但是下沉带和相对抬升带都成近南北向带状分布，拉萨—安多—格尔木一线以东沉降大，可达 40~60 mm，其西下降了 20~40 mm，为相对抬高带；萨嘎—洞错—民丰一线则又成为沉降大的地带，达 60~70 mm；升降大的地带多半与塔里木盆地、柴达木盆地和藏南的大湖区相对应。这种短期有升有降的运动与长期总体隆升的关系还未弄清楚。

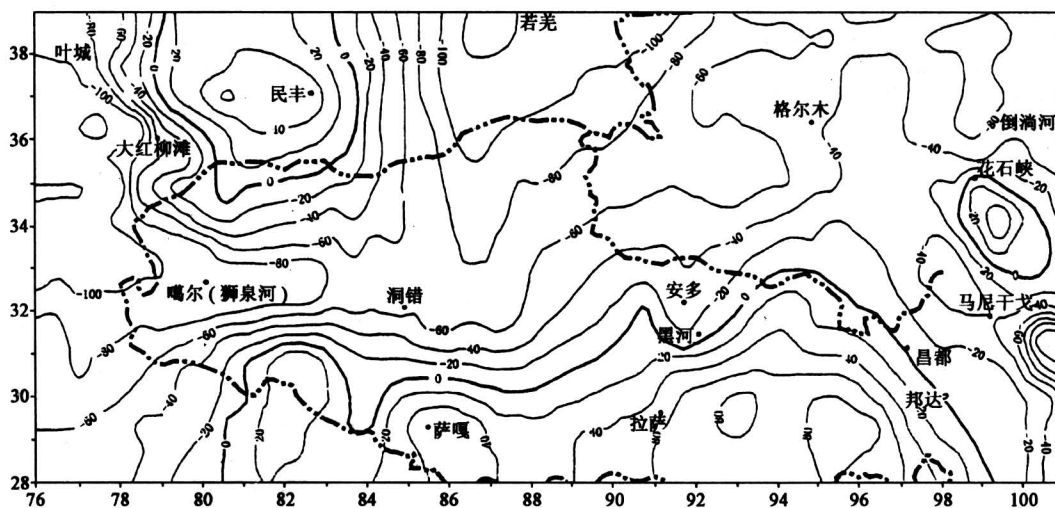


图 12 (a) 青藏地区局部网第二期与第一期高程变化量 (H2-H1) 等值线图
(引自文献 [50], 本文做了少量修改)

Fig.12 (a) The isoline map of vertical increment (H2-H1) between the second and the first leveling in the Tibet Plateau

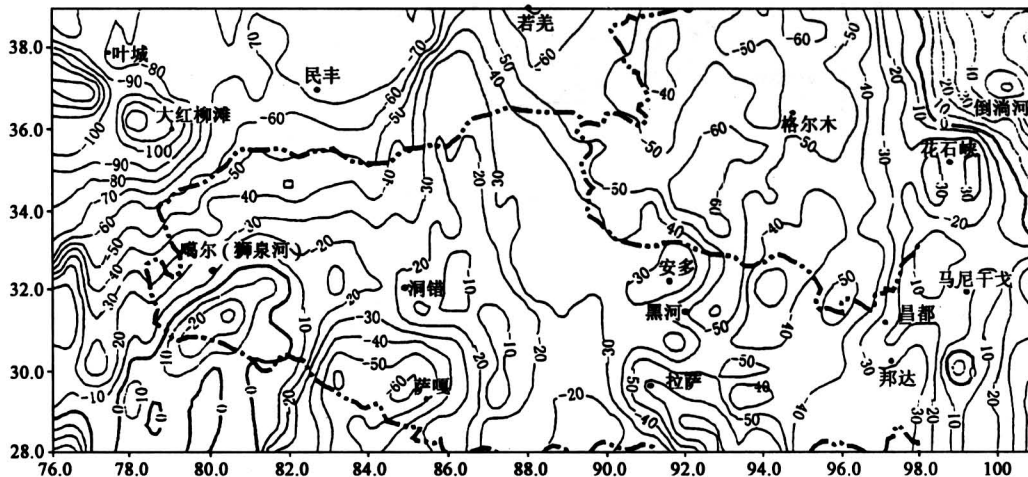


图 12 (b) 青藏地区局部网第三期与第二期水准高程变化量 (H3-H2) 等值线图
(引自文献 [50], 本文做了少量修改)

Fig.12 (b) The isoline map of vertical increment (H3-H2) between the third and the second leveling in the Tibet Plateau

关于珠峰高程变化, 近期水准测量的结果^[50]示于图 13。其中, 在珠峰北 20 km 处, 1975 年比 1966 年升高不足 10 mm, 而在 25 km 处则达到 30 mm, 在 40 km 以北才变小。1992—1998 年变化趋势和上述情况是一致的。个别点(如珠峰北 10 km 处)的高升, 设这一测量结果是肯定的, 则表明珠峰附近地带垂直运动也是不均匀, 可能与观测点位于断裂的不同位置有关。

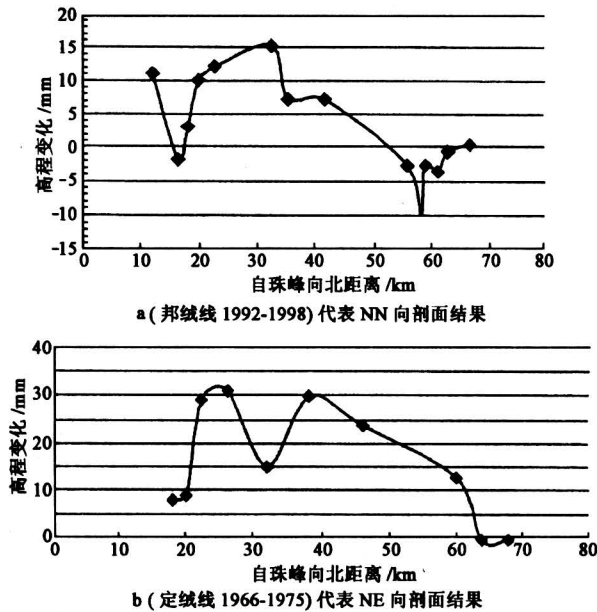


图 13 珠峰北邻近地区的地壳垂直运动图^[27] (a, b)

Fig. 13 Vertical Movements of Crust in the North of Mount Qomolangma (a and b)

3 结语

1) 应当对岩石圈深部调查的性质和意义进一步统一认识, 它不是传统意义上的地质调查, 而是一个新的领域, 要用新思路、新方法去开拓它, 加强规划, 作为一个国家的重大系统工程去抓, 要求有更大范围的合作和数据共享, 设备共享。

2) 作为 INDEPTH 项目和成果已成为国际名牌, 还应进一步作工作, 以完善它, 避免半途而废, 使之形成一个完整的重大成果, 并作为中国对世界地学的贡献, 创一个品牌不容易, 而丢掉它是很容易的。

3) INDEPTH 的成果, 不管是调查成果, 还是理论研究成果, 可以为多方面使用, 特别是应在

此基础上开展找矿和地质资源调查, 进行地质灾害和地震发生机制研究。

4) 青藏高原具有很大特殊性, 青藏高原的开发, 照搬中国东部的模式是不对的, 必须走创新之路, 如何在保护好环境的条件下求发展, 这是一个难题。

参考文献

- [1] 史崇周, 栾祖谦, 苏联地壳和上地幔综合研究计划[J]. 国外深部地质研究专辑(1), 1985, (11): 7~18
- [2] 周玉琴, 宁国明, 项仁杰, 美国大陆反射剖面研究计划[J]. 国外深部地质研究专辑(1), 1985, (11): 33~45
- [3] 地质部情报所编. 美国石油公司联合实施“巨型区域项目”—9条地震大剖面覆盖全国[J]. 地质科技参考资料, 1991, (22)
- [4] 曾融生, 阚荣举, 何传大, 等. 柴达木盆地低频地震探测结晶基底的工作方法[J]. 地球物理学报, 1960, (9): 155
- [5] 国家地震局深部物探成果编写组. 中国地壳上地幔地球物理探测成果[M]. 北京: 地震出版社, 1986
- [6] 陆涵行, 曾融生, 郭建明, 等. 唐山震区深反射剖面分析[J]. 地球物理学报; 1988. 31(1): 27~36
- [7] 陈沪生, 周雪清, 李道琪, 等. 中国东部灵璧—奉贤(HQ-13)地学断面图[M]. 北京: 地质出版社
- [8] 黄立言, 李光岑, 高恩源, 等. 喜马拉雅岩石圈构造演化 西藏高原地壳结构与速度分布特征(中华人民共和国地质矿产部地质专报第 18 号)[M]. 北京: 地质出版社, 1992. 29~35
- [9] 赵文津. 中国 GGT 计划第一个五年的回顾和说明[A]. 地质科技管理要论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 181~189
- [10] 陈学波, 陈步云, 张四维, 等. 长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究[M]. 北京: 地震出版社, 1994. 1~29
- [11] 钱学森. 现代科学技术的特点和体系结构[A]. 技术科学与展望——院士论技术科学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2002. 23~35
- [12] Bally A W, Allen C R, Geyer R B, et al. 国际板块代表团青藏高原考察报告[A]. 地质部高原地质研究所编. 青藏高原及邻区地质矿产译文集[M]. 1981. 29
- [13] 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论(中华人民共和国地质矿产部地质专报五, 构造地质, 地质力学第 7 号)[M]. 北京: 地质出版社, 1988. I~III
- [14] 吴功建, 高锐, 余钦范, 等. 青藏高原亚东—格尔木地学断面综合地球物理调查与研究[J]. 地球物理

- 学报, 1991, 34(5): 552~561
- [15] 吴功建. 格尔木——额济纳齐地学断面综合研究[J]. 地质学报, 1998, 72(4): 289~300
- [16] 姜 枚, 吕庆田, 薛光琦. 中法两国联合进行青藏高原天然地震探测地壳结构的研究[J]. 地球物理学报, 1994, 37(3): 411~413
- [17] 姜 枚, 吕庆田, 史大年, 等. 用天然地震探测青藏高原中部地壳上地幔结构[J]. 地球物理学报, 1996, 39(4): 470~482
- [18] 史大年, 姜 枚, 马开义, 等. 阿尔金断裂带地壳和地幔结构的P波层析成像[J]. 地球物理学报, 1999, 42(3): 341~350
- [19] 钱 辉, 姜 枚, 薛光琦, 等. 天然地震接收函数揭示的地壳结构[J]. 地震学报, 2001, 23(1): 103~108
- [20] 赵文津, Nelson K D, Brown L D, 等. 喜马拉雅和西藏高原深地震反射剖面(INDEPTH)概况[J]. 地球物理学报, 1993, 36(1): 122
- [21] Zhao W J, Nelson K D, Meissner R. Advances of INDEPTH—A deep profiling study in Tibet and the Himalayas[J]. Episodes, 1998, 20(4): 266~272
- [22] 伯克 K. 大陆动力学进展[N]. 中国地质矿产报, 1996-08-06
- [23] Johnson L. 给 INDEPTH 项目组的来函
- [24] 尹 安. 喜马拉雅造山带地质演化[J]. 地球学报, 2001, 22(3): 193~230
- [25] Zhao W J, Nelson K D, et al. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath Southern Tibet[J]. Nature, 1993, 336: 557~559
- [26] 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
- [27] 马宝林, 刘若新. 中国大陆地壳结构与孕震环境[A]. 现代地球动力学研究及其应用[C]. 北京: 地震出版社, 1994. 136~142
- [28] Alfred H, Alexandre N, Martine S, et al. Lhasa block and bordering sutures—A continuation of a 500 km Moho traverse through Tibet[J]. Nature, 1984, 307: 25~27
- [29] 高 锐, 吴功建. 青藏高原亚东—格尔木地学断面地球物理综合解释模型与现今地球动力学过程[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(3): 242~250
- [30] Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, et al. Partially molten middle crust beneath Southern Tibet: Synthesis of project INDEPTH results[J]. Science, 1996, 274: 1684~1690
- [31] Brown L D, Zhao W J, Nelson K D, et al. Bright spots, structure and magmatism in Southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling [J]. Science, 1996, 274: 1684~1690
- [32] Makovsky Y, Klemperer S L, Ratschbacher L, et al. INDEPTH wide-angle reflection observation of p-wave to s-wave Conversion from orustal bright spots in Tibet [J]. Science, 1996, 274: 1690~1691
- [33] Kind R. Evidence from earthquake data for a partially molten crustal layer in Southern Tibet [J]. Science, 1996, 274: 1690~1691
- [34] Chen L S, Booker J R, Jones A G, et al. Electrically conductive crust in Southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying[J]. Science, 1996, 274: 1694~1696
- [35] Wei W B, Unsworth M J, Jones A, et al. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies[J]. Science, 2001, 292: 716~718
- [36] Hacker B R, Gnos E, Ratschbacher L, et al. Hot and dry deep crustal xenoliths from Tibet [J]. Science, 2000, 287: 2463~2466
- [37] 周伏洪, 姚正煦, 刘保军, 等. 青藏高原中部北北东向深部负异常带成因及其意义[J]. 物探与化探, 2002, 26(1): 12~17
- [38] 孙文珂, 金宜生, 涂承林, 等. 重点成矿区带的区域成矿构造文集[M]. 北京: 地质出版社, 2001. 130~137
- [39] 赵政章, 李永铁, 叶和飞. 青藏高原大地构造特征及盆地演化[M], 北京: 科学出版社, 2001. 69
- [40] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. Science, 2001, 294: 1671~1671
- [41] Owens T J. Zandt G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan Plateau evolution[J]. Nature, 1997, 384: 37~43
- [42] 赵文津, 薛光琦, 等. 印度岩石圈地幔拆离俯冲与挤压断裂下落的高分辨率地震层析的证据(待发表)
- [43] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet, Science, 1992, 255: 1663~1670
- [44] Coleman M, Hodys K, Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14 Mye age from a new minimum age for east—west extension[J]. Nature, 1995, 174: 49~52
- [45] 李吉均. 青藏高原隆起的时代幅度和形式探讨[J]. 中国科学(B辑), 1979, 608~616
- [46] 潘裕生, 孔祥儒. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 381~384
- [47] 吴珍汉, 江 万, 周继荣, 等. 青藏高原腹地典型岩体热历史与构造—地貌演化的热年代学分析[J]. 地质学报, 2001, 75(4):
- [48] 张培震, 王 琪. 中国大陆现今地壳运动和构造变形及青藏高原岩石圈现今变动与动力学[M]. 北京: 地

- 震出版社, 2001. 21~35
- [49] 王泽民, 陈俊勇, 庞尚盖, 等. 珠峰地区及青藏高原地壳垂直运动特征研究及青藏高原岩石圈现今变动与动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2001. 36~43
- [50] 张全德, 张燕平, 李国智, 等. 青藏高原亚板块近期垂直形变运动的状态及青藏高原岩石圈现今变动与动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2001. 44~53

Deep Exploration for Lithosphere With Special Reference to Qinghai-Tibet Plateau

Zhao Wenjin

(CAGS/Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China)

[Abstract] A brief introduction of nation-wide deep profiling and deep drilling, carried out in Russia, USA and China respectively is given in this paper. It is suggested that deep exploration is a significant development following regional geological survey. Understanding of the four-dimensional structure of crust and upper mantle enables people to get structural pattern of earth shallow depths (at least down to 100 km) in detail, allowing deepening people's knowledge of earth. The results of deep exploration, thus, can provide multi-purpose services, and it is of completely new significance, for example, in predictive evaluation of mineral resources, in study of geological environment, in theoretical study of continental dynamics, and so on.

Taking the Qinghai-Tibet Plateau as an example, the paper introduces newest results of deep exploration in the Plateau, such as the fine structure of crust, which is characterized by structural complexity of upper crust and strong rheological property of lower crust. There is a the limitation of downward extension of the surface dislocation, and no trans-lithosphere faults exist there. It is found out that hidden or half-hidden large decollements or thrusts are the restrictions for downward continuation of the faults above. Some buried partial melting layers or magmatic chamber or magmatic rock zone are discovered, and it is of great significance for geothermal evaluation and prospecting prognosis. The stability of Moho undulation in depth is verified, and existence of large faults is not determined. For the first time the newest results of high-resolution seismic tomographic imaging of teleseism body waves are introduced. It is suggested that after the collision of Indian lithosphere mantle with Asian lithosphere, i. e. with downward movement of the Indian lithosphere mantle at a steep angle to the north, it was detached into upper and lower layers. While the lower layer was sub ducting down to asthenosphere, the upper layer extended to the north of Wenquan, where it was dislocated and fell into asthenosphere. A test integrated interpretation, in which the deep detection results were interpreted in consideration with GPS and leveling survey, was made in this paper.

[Key words] lithosphere; deep exploration; Tibet Plateau