

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

加强地表层与深层调查的结合,深化对中国大地构造特征的认识

——纪念黄汲清先生100周年诞辰

赵文津 吴珍汉

中国地质科学院,北京,100037

内容提要 本文向读者推荐黄老1982年写的一篇论文,这篇文章标志了黄老将多旋回槽台说发展到了一个新的高度。他将多旋回槽台说与当代板块构造学说结合起来,并深刻地阐明了两者的关系,总结并指出今后大地构造学的发展途径。黄老对板块构造学说给予了高度评价,指出“板块构造学说虽然还有赖于进一步实践加以检验,但它确已成为地学界一股强大的思想潮流,推动着整个地球科学迅猛向前发展。”“多旋回学说与板块构造学说不但互相排斥,而且可以互相补充,密切结合。板块学说可以部分地解决多旋回学说的运动机制问题,而多旋回学说的规律性总结,板块学说也必须予以认真考虑,并纳入其模式中。”指出“近一、二十年来,随着海洋地质、地球物理、地球化学、同位素地质、实验地质、深部地质等地质学科的发展,随着数、理、化等基本学科与地质学的日益结合,随着各种新技术、新方法的广泛使用,随着各学科之间的相互渗透和相互结合,大地构造学家已日益注意到应把大陆构造与海洋构造、区域构造与全球构造、深层构造与表层构造、定性分析与定量分析结合起来进行研究,才能解决一些重大的全球性构造问题。……就使大地构造学的研究进入一个新的发展阶段。”这对中国大地构造学的发展是一个很好的总结也是今后的努力方向。本文第二部分介绍了INDEPTH项目10年的主要研究进展,具体说明深部与表层研究相结合,多学科结合开展构造研究等确实如黄老概括指出的那样,这是一条今后深化认识地球构造运动的新路子。

关键词 多旋回槽台说 板块理论 多学科结合 INDEPTH

黄汲清先生是中国地质界的一代宗师,他在1945年发表的《中国主要地质构造单位》(Huang, 1945),以大地构造的槽台学说对中国陆块的基本特征作了精辟的划分和概括总结,这一理论思路影响了几代中国地质人,成为人们思考中国地壳运动和构造中国矿产分布规律的基本地质构造框架。许多观点今天看来仍然是很有意义的。值此黄老百年诞辰之际,我们纪念黄老,怀念黄老,要进一步向黄老学习,重温黄老的一些新思想,并继续发展深化这一学说是十分必要的。

在此,我愿向大家推荐黄老和任纪舜先生于1982年联合发表的《关于大地构造研究的几个重要问题》(黄汲清等,1982)一文。文中阐述了许多重要科学思想和体现的科学精神非常重要,使我学到了很多,很受启发。下面我借此机会谈一些体会,目的是宣传推广黄老的宝贵思想,希望广大地质界能了解它,学习它,发展它,以适应新世纪地学发展的要求。谈体会的同时也结合着向同行们介绍一下

最近十年我们INDEPTH项目研究的成果,不当之处敬请读者指正。

1 具有里程碑性质的一篇重要文章

从上世纪60年代以来发展起来的板块构造学说,在国际上喻为一场划时代的地学思想革命。在国外地学革命迅猛发展时期的70~80年代研究成果大量涌现,而我们中国正在进行史无前例的无产阶级文化大革命以及后文化大革命的地质工作的调整。1978年党中央召开了十三届三中全会提出了“改革、开放”的方针,地质部门一方面要理顺文化大革命搞乱了的各种思想;另一方面要通过改革开放调整好各项工作,迎接国家发展的新时期。当时地质部门的职工对这次世界地学革命的进展情况很不了解,对中国地球科学未来的走向议论纷纷,黄老发表的这篇文章及其前后一系列文章,对当时我国地学思想起到了积极推动并开创新阶段的作用;这篇文章的发表,应当说也是对他自己几十年来坚持和发

收稿日期:2003-10-29;改回日期:2004-02-12;责任编辑:章雨旭。

作者简介:赵文津,中国地质科学院研究员,中国工程院院士,地球物理学家,近年来主要从事“国际喜马拉雅和西藏高原深剖面”(INDEPTH)研究。

展的多旋回槽台学说的一个新的总结和评价,明确了多旋回槽台学说与新兴起的板块构造学说的关系,指出我国新时代大地构造学发展方向和途经,它是今后我国大地构造学说发展新纲领的宣告,这是具有里程碑性质的一篇重要文章。

1.1 黄老高度评价了板块构造学说

对板块构造学说,黄老给予了高度评价。板块构造学说是60年代地球科学革命的主要成果,怎么样对待这一新学说,当时大家的看法很不一致,虽然有傅承义、李春昱等诸位老先生的倡导,但是,局面并未很好打开,槽台学说仍然是在地质界居于统治地位的思想,黄老在此时发表文章正面阐述了对新地学革命的态度,黄老文中明确地宣告应当肯定这一新的大地构造学说,他说:“板块构造学说虽然还有赖于进一步实践加以检验,但它确已成为地学界一股强大的思想潮流,推动着整个地球科学迅猛向前发展。”

这里黄老还强调指出“近一、二十年来,随着海洋地质、地球物理、地球化学、同位素地质、实验地质、深部地质等地质学科的发展,随着数、理、化等基本学科与地质学的日益结合,随着各种新技术、新方法的广泛使用,随着各学科之间的相互渗透和相互结合,……就使大地构造学的研究进入一个新的发展阶段。”而板块构造学说就是这一发展阶段的产物,它是在大量新资料的基础上提出来的,特别是“对于古地磁和海洋磁条带的研究”。黄老充分肯定了板块构造学说对地球科学发展所起的重大作用,而不是像中国某些地质学家那样,把板块构造学说简单地斥之为“毫无事实依据的”“胡说八道”,表现出一个伟大科学家的尊重事实、实事求是的宽阔胸怀。他不因学派门户之见,而闭眼不看这些年来发现的大量新事实。

1.2 板块构造学说与槽台学说的关系

关于板块构造学说与槽台学说的关系,黄老作了一个十分精辟的阐述。他说“导源于对古地磁和海洋的研究而产生的板块构造学说与从研究大陆构造逐步形成的地槽学说是地球科学不同发展阶段的产物,它们之间并不互相矛盾。板块构造学说把地槽学说提高到一个新的认识阶段。很显然,在用板块构造学说研究大陆构造的过程中,只能是修正和改进简单的模式去接近更为复杂的客观事实,而不能是歪曲事实去适应预想的模式。”这里黄老是把两者作为“地球科学不同发展阶段的产物,它们之间并不互相矛盾。”他说“多旋回学说与板块构造学说不但互不

相排斥,而且可以互相补充,密切结合。板块学说可以部分地解决多旋回学说的运动机制问题,而多旋回学说的规律性总结,板块学说也必须予以认真考虑,并纳入其模式中。”这些话说得何等之好啊!

应当说地球就像是一头大象,人们研究它总像是“瞎子摸象”那样,很难有一个全貌,不同学派有不同的研究侧面,但是地球又是一个统一体,各个地区地球运动的表现,有其独特的一面,但也一定会有其共性的一面,我们只有了解地壳运动的共性和不同地区显示的地壳运动的特性才能更好地了解地球的运动规律。新的构造学说应当能够概括和解释更多的地质现象,否则就没有优越性了。所以它不仅要考虑“多旋回学说的规律性总结”,而且也应考虑其他大地构造学说总结的规律性事实,如地质力学总结的构造体系的总结,地台活化学说等,因为这些总结应当说都是客观地质事实的组成部分。

黄老指出“板块学说可以部分地解决多旋回学说的运动机制问题”,这样我们也可以说推动板块学说的发展就可以更好地解释多旋回槽台学说的机制问题。从这一点讲,作为一项科学学说,多旋回学说的认识必须深化,就必须对多旋回槽台构造现象发生的机制问题加以研究,只有将机制认识不断深化,才能更好地了解地球运动的本身,而谈机制问题就不能离开与数学、物理、化学的结合。而大陆动力学或地球动力学就是这一结合的发展,两者应当说是相辅相成的。

应指出板块构造学说是从研究海洋地质归纳出来的规律性认识,这一学说不仅需要结合最近时期海洋调查发现的新事实以进一步发展板块构造学说,更应当结合大陆实际,探讨板块构造学说一些原则用于解释大陆地质构造特点的途经。黄老的多旋回学说主要是立足于大陆地质研究的。由于大陆构造存在的时间延续很长,大陆地壳的力学性质与大洋板块的相差很大,构造运动引起的结构变化更为复杂,如何依据板块构造学说的基本原理阐述大陆构造问题的研究工作尚不够,许多情况还很不明确,未来的发展空间是很大的。

1.3 进一步发展我国大地构造的学说

从上面引用黄老的一段话可以清楚地说明黄老已明确地提出了新时期我国大地构造研究的特点和现在大地构造学研究所应遵循的基本方法,今天读起来仍然是十分新鲜和亲切。他概括和总结的5点是:①广泛使用“各种新技术、新方法”。②将地球各学科之间进行相互渗透和相互结合。③将深部调

查与表层构造研究结合起来进行。④将“定性分析与定量分析结合起来进行研究”,把数、理、化等基本学科与地质学结合起来,进行物理和数学模拟,开展高温高压条件下岩层的物性研究,进行动力学分析。⑤将地球作为一个行星看待,吸收全球构造及行星地质、宇宙学发展的新成果,以便从更大范围去寻求地球内部运动和演化的规律。地质家的视野要扩大到一个新的空间。

这五点内容都很重要,也是相互关联着的。但是我认为当前我国应优先考虑的内容是“深部构造与表层构造”、“定性分析与定量分析”和不断应用“各种新技术、新方法”这三点。下面将对此作出进一步讨论。

1.4 将深部构造与表层构造研究相结合

关于深部构造与表层构造研究的结合问题,这一点是核心内容,十分重要。这是因为过去我们采集的地质资料绝大部分都是地表观察的结果,而地表观察结果与地下深部情况很不相同。目前我们对地球深部情况的了解还很有限。研究大地构造需要了解各个地块的基本结构特征及地块间的相互作用的关系,而仅仅从地表对地块作调查是远远地不够的,是得不到深层结构情况的。黄老十分重视深部调查的结果,在《关于大地构造研究的几个重要问题》一文许多段落中都谈到地壳、地壳与地幔、岩石圈的结构、贝尼奥夫带、洋壳、大西洋型大陆边缘和太平洋型大陆边缘等等的深部特征,十分重视将这些概念与槽台学说的概念联系在一起,这是十分难能可贵的。

地球半径是6370 km,地壳厚度在中国东部为35 km左右,中国西部为50~75 km,地壳是地球深部多种作用的复合结果,特别是地壳与上地幔内多种物理化学作用的结果,而地表层是地球深部作用与地表水圈、大气圈及生物圈共同作用的结果。而在地表层覆盖厚时地表观察就不能对地下甚至浅部地质情况作出正确的判断;就是地表没有第四纪覆盖,仅仅依据地表观察来推测深部情况也是靠不住的。多年深部调查的实践证明,地表与地下地质构造情况可以相差很多,而我们要讨论的大地构造问题要涉及到地块划分及岩石圈的结构及其运动特征的。

1976年唐山大地震之后,为了了解深部断裂活动情况和地震产生的地质背景(地震源点多位于地下10~20 km深),国家地震局开展了大量的地震测深调查,在1986年的深部工作十年总结(国家地震局《深部物探成果》编写组,1986)中他们提出:“在

深部探测资料缺乏的地区,过去常将表层构造向下延伸来代替深部构造,现在越来越多的资料证明地表构造与深部构造之间并不完全一致;……以往认为地壳结构随着深度增加而趋于简单的说法,现在看来也是值得怀疑的。深部探测资料表明华北地区结构十分复杂,不仅深大断裂发育、断距较大,而且深部界面起伏剧烈,呈波浪式,有厚壳区、薄壳区及地壳厚度梯级带(过渡带),在上地幔内高导层也存在着隆起和拗陷。”

对藏南地表层见到的大断裂,如1977年黄汲清先生判断的雅鲁藏布江断裂为1条超岩石圈深大断裂,认为它是切过岩石圈进入软流圈内的深大断裂;法国人Allegre等(1984)则依据地震测深扇形剖面结果提出地表的6条断裂向下都切穿了地幔岩石圈。但是后来经过INDEPTH项目组使用了以近垂直反射地震为主的多种地球物理新方法检验,发现地表缝合带附近的大断裂向下延伸都是有限的,不超过40 km深的中地壳部位,而下地壳韧塑性很强,本身在不断地发生着流变(Zhao et al., 1993; 赵文津等, 1996; Alsdorf, 1997; Alsdorf et al., 1998a, 1998b; Nelson et al., 1996);这里说明仅仅用地表层的观察是不能得到现在深部地质构造情况的。同样,仅仅使用分辨率不高的地球物理方法(如地震测深)也得出不了地下构造的正确概念。前苏联开展了大量的地震测深调查,得出了大量的近垂直深大断裂,依据这些结果提出了“深大断裂理论”,我国也风行过一时,许多人信奉这一结论。经过多年近垂直深反射地震工作后,现在已有较多的人接受了这一事实,即地球的上地壳脆性强,发生的断裂多,断裂向下到地壳都形成铲式断裂,不能下延下去。这是因为下地壳具有较大的韧塑性(或粘滞性),在上地壳的重压下是会发生流动的,地壳上部断裂很难切穿下地壳,并将这一个切痕一直保留在下地壳内。INDEPTH工作从藏南到藏北,跨越了四个地块,发现西藏高原的深断裂常常是延伸到了下地壳时断层面就变成向北伸出的铲式断裂,这是与印度大陆长期向北持续推挤,下地壳向北增厚又逐步向北伸展变薄所致。此外,还有沉积层厚度,隐伏的岩浆岩带,地壳的深部结构地壳内发育的部分熔融层,地壳内温度分布状况等等都是地表观测所得不到的数据。

为了得到深部地质构造和物质分布的情况,第一,用单一地球物理方法是极其不够的,必须采用多种地球物理方法;第二,要想对其深部调查成果作出较好的地质解释,必须加强多学科研究,特别是地球

深部物质的研究,包括地球化学调查,取得来自深部能说明物质性态的样品;高温高压试验研究,现在的封闭系统的高温高压试验,如何做得与自然的开放系统相似等等,仍应大力改进。

1.5 将定性分析与定量分析相结合

将定性分析与定量分析相结合,黄老提出这一点十分重要,也是当前被人们忽视的核心问题。大地构造问题就是地壳运动问题。黄老在文中也强调“从地球动力学角度看”问题,即不仅仅分析发生了什么构造运动还要对其作动力学分析,将构造运动分析从定性发展到定量,将数、理、化基本学科与地质学结合起来。这是符合现代大陆动力学与地球动力学研究要求的,应当说没有这种力学分析就没有动力学研究。

通过多学科调查,并作出综合地质解释,这种地质地球物理的解释看上去是合理的,但是,只能是个概念模式,还必须作出动力学分析,即进行数值模拟和物理模拟,以进一步从数学、物理上肯定这些运动构造推测的合理性。即使如此,由于地下情况的复杂性而人们对地下情况了解的有限性,所以模拟工作做起来很困难,只能在多个假设条件下做出试探,因而模拟的相似性较差,模拟方法本身也有待大大改进提高。这方面工作,北京大学、中国科学院研究生院和中国地质科学院地质力学研究所做过不少工作。

做好模拟,人们就可以通过模拟再现构造的演化过程,不同的力和不同性质的地质体相互作用会产生什么样的变形和构造以及其变形演化过程,从而使人们的认识会深化一大步。

目前对地下物质及其物理化学性质还说不清,对地下物质的物理性质参数也不很了解,加之问题的复杂性作数学计算和物理模拟难度很大,虽然也做过不少工作,但是与野外调查工作量相比还是很少,综合研究、模拟试验研究与野外调查研究还有很多脱节处,这是今后要注意改进的。

1.6 应用各种新技术、新方法

黄老强调应用各种新技术、新方法是必要的,也是切中我国当前的时弊。

为了得到地下地质构造情况,多获取一些地下有用的数据,探测技术与探测方法是基本手段,具有第一性的意义。这里包括有地球物理的、地球化学的、大地测量的、深部钻探取样技术、测试分析技术以及室内模拟技术等等。国外特别重视这方面的研究,在中国则一直是个薄弱环节。

过去中国同位素测年数据测了很多,但是能够得到国内外认可的则很少,现在我们买进了先进的仪器,制定了一套保证测量精度规程,并与国外公认的同位素实验室建立了相互检查的关系,因而保证了测年的质量要求,所测数据已为国外同行接受,这样效益就大大增加了。这是一条好经验。

地球物理探测设备,则要复杂一些。为了得到高质量的数据,一要有好的仪器设备,二要有一套好的数据处理方法和软件,三要有一个好的部署和观测系统,四要有联系地质情况做综合分析解释这些数据的人才,四者缺一不可。

比如,青藏高原区域的大地电磁场很弱,而下地壳直到上地幔的导电性又普遍较高,电磁信号衰减严重,而我们用几千周的较高频率的仪器去探测是很难得到可靠的深部信息的。我们选用了LIMS仪器,最大的周期为20000~30000s,一个测点上要观测一个多月,以达到多次信号叠加,提高信号与噪声的比,保证数据可靠。这种仪器国内还没有。先后两种仪器观测的数据又用不同反演方法做处理,得出的地下电性结构图与以前得到的结果差别很大。这也是地球物理方法本身不成熟性所致。现有的方法需要改进的地方还很多。

做深反射地震工作的仪器,我国石油勘查部门进口多台,都是比较先进的,可以选用,不过,深反射地震工作与石油地震勘探工作有很大的不同,最主要的内容是,深反射不仅仅在有第四纪覆盖的盆地内作测量,更常常是在造山带,岩浆岩分布区进行调查,而接收到的深部(几十千米至百余千米)地下反射信号又很弱,这样就带来一些新的方法技术问题。它的地质解释难度也更大一些,需要中国人自己积累经验。

现在国内又出现买流动地震仪记录天然地震的热潮,这里的问题更多。装备什么仪器,如何使用这些仪器等一定要与需解决的科学问题联系起来。

总之要瞄准科学前沿问题,如果想解决些前沿科学问题,靠“小米加步枪”是不行了,必须高新仪器设备。下面我将结合INDEPTH所取的新结果再进一步讨论这一问题。

2 INDEPTH项目主要成果简介

INDEPTH是“国际喜马拉雅和西藏高原深剖面”的缩写,它是以青藏高原为对象做重点解剖,研究大陆构造研究中最具有代表性的地质事件——碰撞、造山、隆升作用。出发点就是探索板块构造学

说提出的许多原则用于大陆构造研究的可行性。这是一件很复杂的事情,我们工作时间仅仅12年,成果当然还是初步的,我们距离黄老指出的对当代大地构造研究的要求还相差甚远。

这一项目是从1991年踏勘谈判并签订合作协议,1992年夏正式开展了喜马拉雅地区近垂直深反射地震野外100 km的调查,到现在为止已进行了三个阶段,先后完成两条测线,从喜马拉雅山,经冈底斯山,唐古拉山,直达北部的可可西里的多格错仁强错和昆仑山的格尔木,总长近2000 km的多学科多方法的调查(图1),其中深反射地震测线为400 km。2003年开始了第四阶段踏勘和地质调查工作。

四个阶段的任务是:① INDEPTH-1 阶段 重点研究喜马拉雅山碰撞造山带深部结构构造特征。② INDEPTH-2 阶段 重点研究雅鲁藏布江缝合带的深部结构构造特征。③ INDEPTH-3 阶段 重点研究班公湖—怒江缝合带的深部结构构造特征。④ INDEPTH-4 阶段 重点研究金沙江缝合带及昆仑造山带的深部结构构造特征。

整个工作部署是以缝合带为中心的,而与过去的以地块为中心的思路是不同的。

INDEPTH项目的特点是:多国合作,多学科结合,用高新技术,开展高起点的研究,力争有新的发现。具体应用了近垂直深反射地震法、密集流动数字地震台阵、多炮点广角地震、宽频(320~2000周/秒)与超长周期(10~30000 s)相结合的大地电磁观测,高精度重力,构造地质以及综合研究等八种调查技术等。

前三个阶段取得的一些成果,主要有:

2.1 高原的地壳厚度

以上地幔顶部的莫霍面深度作为地壳的厚度,藏南地壳厚,藏北变薄,成簸箕状。

印度大陆在恒河平原下地壳厚或莫霍面深度为35±3 km,到高喜马拉雅山下(帕里)很快地加深到75 km,再北(萨马达)为80 km(Molnar, 1988; Zhao et al., 1993),再向北又变浅,到羌塘地块下变为65 km左右(Zhao et al., 2001, Shi et al., 2004),到柴达木地块为55 km左右(高锐等,1995),准确度在

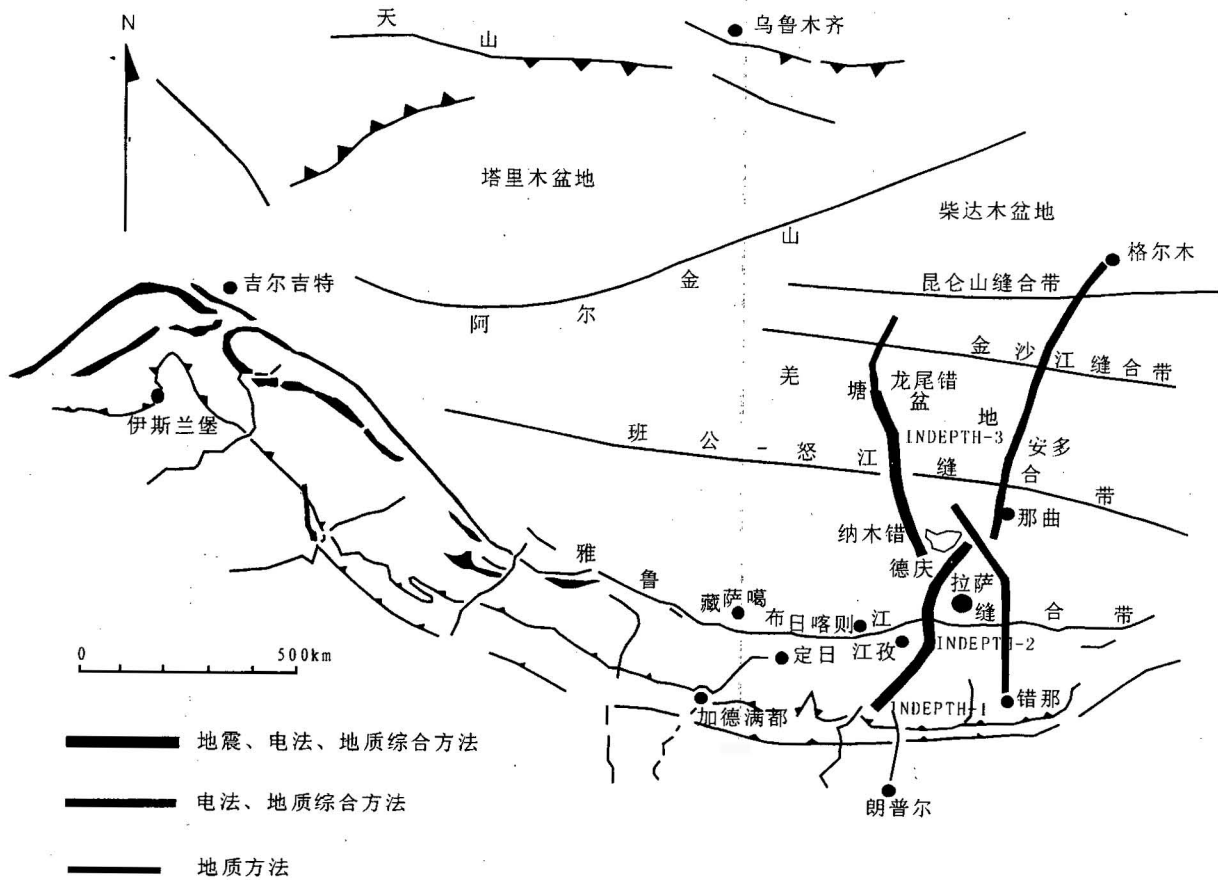


图1 INDEPTH路线分布图

几千米;南部拉轨岗日深凹(70~80 km 深)仍存在,北部羌塘深凹(80 km 厚)不存在;直接证实了 Lyon Caen 和 P. Molnar (Molnar, 1988; Zhao et al., 1993)依据重力资料所作的推论,他们认为在喜马拉雅山不可能出现印度大陆莫霍层的向北推覆,深度变浅。未证实高喜马拉雅山有浅层莫霍层的存在。

地壳的平均速度,藏南为 6.2~6.3 km/s,拉萨地块为 6.28 km/s,南羌塘地块为 6.17 km/s,北羌塘又增加到 6.23 km/s,总是藏南速度变化不大,藏北速度变小。

未证实雅鲁藏布江缝合带和班公湖—怒江缝合带下面过去推测的莫霍层有 10~20 km 大错断的存在。也未发现其他 3 条大错断存在的证据。

2.2 高原地壳分两层

高原地壳分为上地壳和下地壳两层,总体上是高原上地壳脆性强和下地壳粘塑性大,两者性质很不相同,多种方法的结果显示了这一特征。

上地壳的纵波速度为 5.8~6.4 km/s,下地壳速度为 6.5~7.3 km/s,另有速度小于 5.8 km/s 的沉积盖层(熊绍柏等,1985;Zhao et al.,2001)。大体上藏南上、下地壳厚度相近,而藏北的下地壳略薄一些。反射地震图上显示,上地壳反射同相轴数多而清晰,构造现象丰富,脆性较强;下地壳则反射同相轴较少,图案简单,反射同相轴多为近乎平行分布,内部构造现象不多,显示以粘塑性为主。

电性结构图(Chen et al., 1996; Wei et al., 2001)上显示的是,藏南到藏北,上地壳以高电阻率为主,电性变化大,高低电阻率区分布图案很复杂,岩性、断裂显示很清楚,信息丰富;而下地壳整体都显示为低电阻率的特性,局部出现更低的特性;康马以南下地壳则为高电阻率分布区。雅鲁藏布江缝合带深部为极低电阻率区,可低到几欧姆·米,低电性区扩展到江孜一线;纳木错西的德庆以北地区地壳电阻率相对要高一些。西藏高原总的导电率(电阻率的倒数)为 3000~20000 siemens(稳定的大陆区为 20~1000 siemens),表明深部广泛发育有部分熔融层;没有发现从南到北普遍存在的高电阻率的下地壳层,也未见地壳内规则分布的上、下两层高导电层。

从藏北 3 Ma 火山活动时从深部带上的橄榄粗玄岩中无水变质沉积岩和镁铁质捕虏体可以测得北部地下 30~50 km 深处的温度为 800~1000℃(Hacker, 2000),即同样的包体被加热了 200℃,可以使云母发生脱水熔化的,认为在藏北导电层主要位

于 30~50 km,主要由岩层的部分熔融引起的,这一部分熔融层可能是由大规模的构造剪切作用生热及深部热源引起的。这也表明晚中新世时地壳已经增厚了,并具有较高的热状态,而且在北部 3 Ma 时仍有火山活动;综合上述特征可以认为下地壳的增厚与 Zhao & Morgan 提出的挤压增厚方式相近。估计下地壳形成现在的结构需要一定的蠕变过程时间。2000 年《科学》杂志发表了这一结果(Hacker et al., 2000);江万等(2000)也在国内发表了这一成果。

热状态,从电性和地震波速度变化分析,藏南藏北地壳地幔普遍是较热的,即属于热壳热幔型,其中藏南地壳更热,而藏北地幔温度更高;沿雅鲁藏布江缝合带和金沙江缝合带,念青唐古拉山深部与唐古拉山(普若岗日,格拉丹东等)更是地热异常带(Wei et al., 2001)。地表地热流测量(沈显杰,1992)显示藏南地热流高,而藏北地热流低,这与上述我们对藏南的分析是一致的,藏北地热流低可能是因为藏北地表普遍发育冻土层,因而地热流观测深度有限,与吴功建等(1989)得到的结果有所不同。

海洋岩石圈的洋壳很薄,仅厚几千米,地幔岩石圈则较厚,温度较低,刚性较强。而高原大陆岩石圈为三层结构,即上地壳和地幔岩石圈(以下简称岩石圈或岩石层)为刚性强的层,中间的下地壳厚度较大,属于韧塑性强,流变性好,总体构成一“三明治”典型结构,温度较高;陆陆碰撞所发生的变形与构造与洋壳与陆壳碰撞所发生的构造变形会有很大的不同。

2.3 西藏高原地壳内发育有大规模的主拆离带

发现西藏高原地壳内发育有大规模的主拆离带,对上、下地壳分层增厚起着控制作用。如喜马拉雅地块下面有一条隐伏的大型逆冲拆离带,由一条深地震反射剖面探测出来,它从喜马拉雅山脊下 26 km 深,以 9~10°角度向北延伸到雅鲁藏布缝合带下面 42 km 深,延伸总长在 150 km 以上,5~6 km 厚,为一低速层,代表一低速拆离层,地震断面解表明它是一条逆冲型断裂,命名为主喜马拉雅逆冲断裂(MHT)(Zhao et al., 1993)。

由于其上、下反射特征很不同所以推测它是喜马拉雅地块上、下地壳的分层增厚的界线;再向北则沿着中地壳部位伸展出去,可能与拉萨地块下冈底斯断裂的下延段相连接。它是在两大陆于 50 Ma 左右碰撞和印度大陆向北持续挤压过程中首先发生的,使北部亚洲板块的拉萨地块的部分下地壳沿一条大的逆冲断裂(可能是缝合带深部的主体断裂)向

南推到雅鲁藏布江南或地表缝合带之南附近的浅部,并在以后的印度大陆持续向北挤压过程中由北向南先后形成了一系列向南的逆冲岩推覆,如冈底斯岩带沿冈底斯逆冲断裂系(GDT,发生在30~24Ma)、KMT(康马逆冲断裂,约发生在40Ma),NHT(北喜马拉雅逆冲断裂,约发生在40~30Ma),MCT(主中央逆冲断裂,约发生在22Ma),RBT(仁布背冲断裂,向北推覆,约发生在19~10Ma),MBT(主边界逆冲断裂,约发生在11Ma),MFT(主前缘逆冲断裂,约发生在<10Ma)(崔军文等,1996);这些逆冲断裂向下延伸后都变成了铲式断裂,归于这一拆离层。多条向南的逆冲断裂与少量的向北背冲推覆构造(如仁布背冲)一起构成藏南上地壳增厚的基本模式,这里MHT(主喜马拉雅逆冲断裂)起着重要控制作用。

1993年《自然》杂志刊出这一结果(Zhao et al., 1993),强调了这是印度地壳向亚洲地壳俯冲下去的直接证据;1995年《科学》还为此发表专论文章(Mervis, 1995),强调了这一发现的重要意义和中方所作的主要贡献。

又如羌塘地块下面也发现一个大拆离层——主羌塘剪切片理化带(MQT)(赵文津等, 2004a, 2004b),由大地电磁法发现,并有广角地震、深反射地震资料的佐证。也是位于中地壳部位,深度在30~45km,延伸可达300km以上,以低电阻率带的形式出现,局部电性更低。其上部也分布有一系列的向南逆冲断裂和深反射揭示的深部少数向北仰冲断裂。

2.4 喜马拉雅山的造山作用

根据藏南地壳的精细结构和尼泊尔的干城章嘉峰出露的双重构造剖面表明,在30~40km深度以上,总体上为一向南的双重逆冲推覆构造,使老的结晶基底岩层向南推覆抬升很高,经强烈地表风化剥蚀[Dewey(1988)给出剥蚀掉20km]后,形成了现在高耸的喜马拉雅山脉。广角地震求出结晶基底可能为20km厚,而高喜马拉雅的老结晶岩层出露的厚度较大,所以需要再作核对,也可能是向南推覆三次,因为老变质地层的厚度比预期的要厚得多,而一旦发生推覆,进一步发展相对容易一些。估计还可能其他的构造岩浆活动参与。

2.5 雅鲁藏布江缝合带的深部结构

关于雅鲁藏布江缝合带的深部结构,地球物理的探测结果比较复杂:

在人们认为是缝合带的位置处电性有个明显变

化,在0~25km深度区间其北为高电阻率区,其南为低电阻率区,两区界限分明,垂直产出。

而在缝合带南50km处的江孜城下方出现一极低电性带,低到<2.5 Ω -m,以34°倾角向北延伸了25km,这一高导电带与地表沿29°N纬度线伸展的雄如一尼拉逆冲断裂相扣合,深反射地震同相轴图案在20km深处也显示有一组强反射带,近水平产出,而断裂位于其南端中断处,表明可能因断裂使这一强反射带中断。对这一强反射带,重力拟合表明下面存在一高密度的下地壳物质,而有地震AVO方法推测其可能为洋壳残片,两种方法推测结果应当说是一致,都是属于玄武质或辉长岩类的反映。

在缝合带南部边缘沿高阻区向下出现另一条强地震反射带,由于地跨雅鲁藏布江地震施工不便,成像质量较差,显示不好,但是仍然可以看出有一条与冈底斯逆冲断裂相对应的强反射带,从雅鲁藏布江向北倾斜延伸下去,从20km深向北延长可达80km以上,并加深到50km。因此,可以推想雅鲁藏布江缝合带的主体是在江孜,在两大陆碰撞(55~50Ma)挤压达到一定程度后,沿缝合带先发生了向南的逆冲推覆,再发生向南的冈底斯逆冲断裂(27~18Ma),第三才发生仁布一泽当向北的背冲断裂(18~8Ma),蛇绿岩套又再次被推向北部。按雄如一尼拉逆冲断裂作为雅鲁藏布江缝合带主体考虑,它的产出应是向北倾斜34°,延伸到了25km深。

以前将冈底斯逆冲断裂作为缝合带主体考虑,则其地表近直立产出,向下则与深部45~50km的拆离层相会,这一深部拆离层很可能就是MHT向北的延伸(Zhao et al., 2001)。欧洲《新地学》杂志对跨江的强地震反射带作了介绍(Zhao et al., 1997)。

2.6 念青唐古拉山的深部结构

深反射地震在念青唐古拉山东侧沿羊八井—当雄地堑在安岗、羊八井、当雄等处发现存在4个地震反射亮点,5种方法均证实其为低速体,可能一为含水的部分熔融层,属于花岗质岩浆层,深15~20km,厚约20km;与观测到的地温梯度推测的结果是一致的;按俯冲模式所作的理论计算得到的温度分布结果(石耀霖, 1992)与实测的模式也是一致的,它直接与羊八井地热资源的评价与开发有关。1996年《科学》杂志上刊出一组5篇文章(Nelson et al., 1996; Brown et al., 1996; Kind et al., 1996; Chen et al., 1996; Makovsky et al., 1996),对这一结果给予了很高的评价。Zhao等(1999)对此作了进一步评论。随后进行的区域地质调查(吴珍汉等, 2001,

2003)及羊八井深部构造研究(江万等, 2000)进一步证明,念青唐古拉山是以花岗岩体为主体,边部年龄老(20~18 Ma),表明山体是最近20 Ma才隆起成山;中间年龄新(8~6 Ma),山体是由深部岩浆不断上涌形成的,而深部的部分熔融层是其岩浆来源,这一岩浆重熔作用现在还在进行中。

2.7 班公湖—怒江缝合带深部结构

班公湖—怒江缝合带是否存在?位置在哪里?洋壳与陆壳的俯冲方向等等,争论很多,尚没有定论。尹安(2001)提出在安多、双湖南、改则等四处地点见到侏罗纪地层逆冲到第三纪地层之上,并认为拉萨地体沿着这一逆冲断裂俯冲到羌塘地体之下至少约200 km,羌塘地块中部的钙碱性火山岩(40~20 Ma)与这一俯冲作用有关。赵政璋等(2001)认为拉萨地块北部的岩浆岩带(早白垩世),为班公湖—怒江洋向南俯冲到拉萨地块之下形成的,更南部还有中、晚侏罗世的或中、晚白垩世(100~60 Ma)的火山岩带。

INDEPTH-3 确定,以班公湖—怒江缝合带南以班戈花岗岩为界,北以双湖为界出现一个低速楔体(5.5~5.8 km/s),上宽(达100 km)下窄,南侧是向北倾斜,倾角较大,北侧向南倾斜,倾角较缓,下延深度可大于20 km,这一低速楔体包括有伦坡拉盆地和南羌塘盆地;楔体南侧,沿班戈岩体北侧出现显示有一窄的低电阻率带($<10\Omega\cdot\text{m}$),向北倾斜,倾角可达 30° ,向下延伸可与主羌塘剪切带相连,深度不超过40 km。南侧地表层地质观测到多条断裂都是向南推覆向北倾斜的,而深反射地震表明4~5 km深处地壳内反射界面是向南倾斜的,但是在深层又改为向北倾斜。这样的结构说明什么构造现象,一时还肯定不了。初步推测,这一低速凹槽是早期的班公怒江残余洋盆叠合上了弧后拉张盆地,后者是班戈带之南多条蛇绿岩逆冲岩片所代表的多昌茶玉(或嘉黎)缝合带闭合后形成的。

电性结构图上的中壳大规模的低电阻性层表明下地壳向北俯冲将使羌塘地块上下地壳之间发生大规模的剪切作用,并发育了剪切片理化带,其间局部地段还发生部分熔融现象;将这一巨厚的剪切片理化带命名为主羌塘逆冲带(MQT),即前面所提到的主羌塘剪切片理化带(MQT)。在其北部,即唐古拉山、格拉丹东一带,出现有火山岩岩浆岩带地面重力测量还发现有一条低到-570 mGal的重力负异常,与其相扣合,异常带向西北延伸出去,直达 88°E (改则以北)与三个地点火山岩岩浆岩带位置相扣合,向东

南延伸到他念他翁山中。从其线性特征和强度特征看可以与冈底斯岩浆带和昆仑岩浆岩带的重力反映十分相近。

这一结构可能表明了早期班公湖—怒江洋是向南俯冲时,派生出东巧一带蛇绿岩发生向南仰冲,并有班戈岩带的出现(年龄为100~60Ma);在怒江洋闭合后,拉萨地块与羌塘地块相碰撞,并进一步发生陆内俯冲,上地壳产生了鳄鱼状构造,而拉萨地块的下地壳则反而向羌塘地块下俯冲,形成更新的岩浆岩火山岩弧,即尹安(2001)给出的羌中火山岩岩浆带,时间为40~20 Ma或29~20 Ma。不过还需要对这些断裂和岩浆岛弧形成是否配套加以查证,作大量研究。

2.8 高原的上地幔

高原上地幔的精细结构成像确定了高原的上地幔特征为印度的岩石圈伸展过来,并在藏北与北部地块不同速度的岩石圈(可能是欧亚大陆的或是冈底斯大陆的其他块体的)交会,并发生断落。

我们利用了中法与中美合作取得的远震走时残差取得了高分辨率的上地幔的地震层析成像,确定(赵文津, 2004a, 2004b; Tilman, 2003):

(1) 高原下的岩石圈厚度,我们求得拉萨地块北部和羌塘地块南部岩石圈厚度为30~40 km,法国人Jobert等(1985)、庄真等(1992)求得藏南的厚度也是30~40 km,滕吉文等(1999)也探讨了这一问题。北部的欧亚大陆岩石圈以速度低($P_n < 8.0$ km/s)为特征,但是这方面数据还太少,还需要作补充求证。

(2) 在上地幔岩石圈下的低速带(Condie, 2001)内出现两条向北倾斜的长达200~300 km的高速条带,在北部也出现两条很短的向南倾斜的高速条带(也可能是向北倾斜!)。在上地幔内的高速条带仅有两种可能来源:一是印度的岩石圈,一是海洋岩石圈,速度值都可以达到8.3~8.5 km/s。印度大陆与欧亚大陆碰撞挤压造成青藏高原地壳的缩短与增厚,印度大陆的岩石圈在这一过程中是增厚了还是没有增厚?岩石圈地幔与上覆地壳间的关系,是仍然依附在一起,还是发生拆离?拆离后的地幔岩石圈到哪里去了?这是一个与高原隆升机制的解释密切相关的重大问题。上述成像结果显示了:①根据其速度和厚度的特征,上述高速岩石圈应为印度大陆岩石圈,因为公认为它是高速的($P_n = 8.2\sim 8.5$ km/s)(Ni et al., 1983; Molnar et al., 1988),在其向北在高喜马拉雅山之下迅速加深(遭受了强力的

挠曲后)时发生拆离,分成上层(厚约 30~40 km)和下层(可能为 50~80 km 厚);上层在 75~80 km 深度上,向北部延伸,并逐步变浅,在伸展到达温泉北的雁石坪时与欧亚大洲的岩石圈对挤到一定程度后开始断裂,并向下掉落到下部的低速层内;下层则从高喜马拉雅山之下开始便以较陡的角度(30°)俯冲下去,直达到 350~400 km 的软流圈内,本区内 Dewey (1989)给出的结果是 150 km 以下即为低速层,也就是说最后上层与下层是以不同方式先后进入了软流圈内;两层都未与北部地块的岩石圈发生叠加增厚或发生拆沉。②相反,北部的不大的高速条块,则可能是原来的大洋岩石圈(姚伯初等,1994; Rob Van der Voo et al., 1999),是大洋闭合后插到软流圈中的残存大洋岩石圈,也可能还是残存印度大陆岩石圈。由于北部数据过少情况还不明朗。关于地幔岩石圈分层问题可查看任向文等(2002)及 Kopylova et al., 2000)的文章。

这一结果比较符合一般活动构造区的特点。反之,如仍然认为高原下的岩石圈也是巨厚的,则出现与稳定区同样的地幔岩石圈的特征,这就令人费解了。

2.9 进一步揭示了金沙江缝合带下面的低速体

远震地震层析成像揭示了在 35°N 处的金沙江缝合带下面 150 km 深处出现一负(4%~5%)的低速体,沿剖面宽度约 150 km,下延有 250 km,与 Wittlinger (1996)层析成像得到的低速体有所偏移,但是大体是一致的。这一低速带断断续续向上形成一个很宽的带,总体向北陡倾斜,使地壳速度也有所变小。这一结果可以很好地说明藏北火山活动、各向异性及 P_n 速度偏低的现象。它可能是印度岩石圈和北部大洋岩石圈在 34°N~35°N 下方相对俯冲产生的,相对俯冲发生的时间晚,在地表产生的火山活动就变新。不大可能是由于后期沿北部缝合带大型走滑造成的地幔再活化所引起的,因为地块之间大型走滑断裂仅仅涉及到上地壳,对下地壳将是另一种情况,而岩石圈这个层次不会受其影响的。这一低速带是从青海杂多向北西方向延伸到西金乌兰湖的深部。这一特点与高原大的构造线相一致,其形成将不是偶然的。

这一结果比 Kosarev 等(1999)利用 INDEPTH 及 PASSCAL 资料所得的俯冲图象更为清楚可信。也比最近 Griot 等(1998)、Tapponnier 等(2001)和苏伟等(2002)发表的面波成象结果要精确得多。面波结果都给出了高原深部存在一个厚的高速层,它

与地壳相附着,由于其结果的垂直分辨率在 350 km(我们的结果优于 80 km),水平分辨率在 3°~4°(我们的台站距为 5~20 km),结果的可靠性也缺乏说明,更增加了面波结果的不确定性。

从这一结果也可以看出冈底斯带不存在“去根”作用,羌塘地块也不存在岩石圈地幔的增厚作用。

藏北地幔各向异性强与地幔流向问题,本地区先后三次天然地震观测结果(McNamara et al., 1994; Sandvol et al., 1997),均得出快波方向异常强,与藏南相比有较大的变化,快波指向方向从北转向东北,从向东又转向东南。一般研究成果的结论是引起地震横波各向异性的原因,一是地下发生大规模的糜棱岩化片理化带,造成矿物和裂隙取向所引起;二是地下物质流动中如橄榄石类矿物取向所引起。藏北情况下,大型走滑的方向多为近东西,而与快波方向很不一致,所以藏北各向异性异常主要由上地幔内软流圈,特别是低速层内物质(橄榄石是大量的)引起的。从德庆—龙尾错剖面的层析成像分层结果看,这一现象较清楚,上面的印度岩石圈拆分后,将随着低速层内的物质在北进中又向东并向下,可能呈旋流式下沉。

2.10 高原下 410 km 和 660 km 深处的间断面

天然地震的接收函数法及面波波形模拟均得出了高原下 410 km 和 660 km 深处的间断面的清晰成像(Kind et al., 2002; Yuan et al., 1997)。

两个间断面代表了上地幔的最低层(也有人称之为上、下地幔之间的过渡层),最近发表的文章认为这两个界面分别代表两个相变面,前者是橄榄石向尖晶石相过渡,后者则是尖晶石相向钙钛矿和镁方铁矿相过渡面;印度岩石圈向下插到 410 km 的间断面,没有迹象是穿过了这一间断面,所以我们设想这可能是岩石圈向下掉的一个界限。因为再深物质的密度变大,一般轻物质向下掉入是困难的。

两个间断面向北有加深趋势,但数量不大。

2.11 小结

以上的分析都是基于高原内各地块持续不断碰撞挤压条件下作出的。现在 GPS 观测结果再次以实际数据证明这一结论(Wang, 2001)。各地块有向北,向东还有向南(喜马拉雅地块)的运动,各地块之间还有运动差异。但是地质历史上,特别是冈瓦纳大陆解体后各地块是如何运动的,是不是一个地块一个地块先后分别向北拼贴组成的青藏高原,现在也还有争论。

本项目所确定的藏南地壳细结构和构造,深化

了对人们对喜马拉雅碰撞造山带的认识,为人们认识更复杂的造山与高原形成作用提供一种模式,这是对大陆动力学理论的发展作出的重要贡献,也是有利于青藏地区水资源评价、找矿预测、地热能评价与地震发生的深部构造背景研究以及其他应用。

这些成果引起国外的广泛重视,仅中方为主的 INDEPTH-2 的文章被引用达 181 次,加上其他 INDEPTH 文章,共被引用达 757 次(到 1999 年)。

前国际岩石圈委员会主席 K. Burke 教授在 30 届国际地质大会的主旨报告《大陆动力学进展》中提出“中国地球科学家在西藏建立起来的国际性协作模式很可能被世界上其他重要的科学研究领域所效仿”。就是说这为今后解决重大地学基础问题找到了一种好的工作方式。

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作出了重要贡献,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很大的自豪”、“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”。

INDEPTH 项目第三阶段即将完成,已取得了一系列的重要发现,正在发表论文之中。已在《科学》《自然》杂志上发表了 5 篇文章介绍了部分成果。

参 考 文 献

- 高锐,成湘洲,丁谦. 1995. 格尔木—额济那旗地学断面的地球动力学模型初探. 地球物理学报, 38(增刊 II): 3~14.
- 国家地震局《深部物探成果》编写组. 1986. 中国地壳上地幔地球物理探测成果. 北京:地震出版社.
- 黄汲清,任纪舜. 1982. 关于大地构造研究的几个重要问题. 见:中国地质学会构造地质专业委员会编. 构造地质学进展. 北京:科学出版社. 1~3.
- 江万,吴珍汉, Hacker B, 李有社, Kidd B, 毕思文. 2000. 青藏高原羌塘地区新生代火山岩中发现麻粒岩包体. 见:中国地质学会,编. “九·五”全国地质科技重要成果论文集北京:地质出版社.
- 任向文,吴福元. 2002. 大陆岩石圈地幔形成与演化研究的新进展. 地球物理学进展, 17(3): 514~524.
- 沈显杰,张文仁,杨淑贞,管焯,金旭,张菊明,汪辑安,沈继英,张容燕. 1992. 青藏热流和地体构造热演化,地质专报. 北京:地质出版社.
- 苏伟,彭艳菊,等. 2002. 青藏高原及其邻区地壳上地幔 S 波速度结构. 地球学报, 23(3): 193~200 (in Chinese).
- 石耀霖,朱元清,沈显杰. 1992. 青藏高原构造热演化的主要控制因素. 地球物理学报, 35(6): 710~719.
- 滕吉文,张中杰,等. 1999. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆—陆碰撞新模型. 地球物理学报, 42(4): .
- 吴功建,肖序常,李廷栋. 1989. 青藏高原东—格尔木地学断面. 地质学报, 63(4): 285~296.
- 吴珍汉,江万,周继荣,李冀湘. 2001. 青藏高原腹地典型岩体热历史与构造—地貌演化过程的热年代学分析. 地质学报, 73(4): 468~476.
- 吴珍汉,叶培盛,胡道功,等. 2003. 青藏高原腹地的地壳变形与构造地貌形成演化过程. 北京:地质出版社.
- 熊绍柏,滕吉文,尹周勋. 1985. 西藏高原地区地壳厚度和莫霍面起伏. 地球物理学报, 28(增刊): 23.
- 姚伯初,曾维军, Hayes D E, Spangler S, 等. 1994. 中美合作调研南海地质专报. 北京:中国地质大学出版社.
- 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. 地球学报, 22(3): 193~230.
- 赵文津, Nelson K D, 车敬凯, Brown L D, 徐中信, Kuo J T. 1996. 深反射地震揭示喜马拉雅地区地壳上地幔的复杂结构. 地球物理学报, 39(5): 615~628.
- 赵文津, 薛光琦, 吴珍汉, 赵逊, 刘葵, 史大年, Nelson D, Brown L, Hearn T, Mechiel J, Guo J R. 2004a. 西藏高原上地幔的精细结构构造——地震层析成像给出的启示. 地球物理学报, (3):
- 赵文津, 薛光琦, 赵逊, 吴珍汉, 史大年, 刘葵, 江万, 熊嘉育及 INDEPTH 研究队. 2004b. INDEPTH-III 地震层析成像——藏北印度岩石圈俯冲断落的证据. 地球学报, 25(1):
- 庄真, 宋仲和, 傅竹武, 等. 1992. 青藏高原及邻近地区地壳与上地幔剪切波三维速度结构. 地球物理学报, 32(6):
- Alle'gre C J, Coartillot V, Tapponnier P, Hirn A, Mattauer M, Coulon C, Jaeger J J, Achache J, et al. 1984. Structure and evaluation of the Himalaya—Tibet orogenic belt. Nature, 307(5): 17~22.
- Alsdorf D. 1997. A simple method for migrating narrow aperture, noisy seismic reflection data and application to project INDEPTH deep seismic profiles. Journal of Geophysical Research, B, Solid and Earth Planets. 102(8): 17807~17811.
- Alsdorf D, Makovsky Y, Zhao W J, Brown L D, Nelson K D, Klemperer S, Hauck M, Ross A, Cogan M, Clark M, Che J, Kuo J. 1998a. INDEPTH multichannel seismic reflection data; description and availability. Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets. 103(11): 26993~26999.
- Alsdorf D, Brown L, Nelson K, Makovsky Y, Klemperer S, Zhao W J. 1998b. Crustal deformation of the Lhasa Terrane, Tibet Plateau from Project INDEPTH deep reflection profiles. Tectonics, 17(4): 501~519.
- Brown L D, Zhao W J, Nelson K D, Hauck M, Alsdorf D, et al. 1996. Bright spots structure and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling. Science, 274(5293): 1688~1690.
- Chen L S, Booker J R, Jones A G, Wu N, Unsworth M J, Wei W B, Tan H D. 1996. Electrically conductive crust in southern Tibet from INDEPTH magnetotelluric surveying. Science, 274(5293): 1694~1696.
- Condie K C. 2001. Mantle Plumes and Their Record in Earth History. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang Chengfa, Sun Yiyin. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. Phil. Trans. R. Soc. Lond., 327: 379~413.
- Dewey J F, Cande J F S, Pitman W C. 1989. Tectonic evolution of the India/Eurasia collision zone. Eclogae Geol. Helv., 82(3): 717~734.
- Griot Daphne — Anne, Jean — Pau Montagner, Tapponnier Paul. 1998. Phase velocity structure from Rayleigh and Love waves in the Tibet and its neighboring regions. Journal of Geophysical Research, B, 103(9): 21213~21232.

- Haines Seth S., Simon Klemperer, Larry Brown, Guo Jinru, James Mechie, Rolf Meissner, Andrew Ross and Zhao Wenjin. 2003. INDEPTH-III seismic data: From surface observations to deep crustal processes in Tibet. *Tectonics*, 22(1):1001.
- Hacker B. R., Edwin Gnos, L. Ratschbacher, Marty Grove, Michael McWilliams, Stephen V. Sobolev, Jiang Wan, Wu Zhenhan, 2000. Hot and Dry Deep Crustal Xenoliths from Tibet. *Science*, 287: 2463~2466.
- Huang T K. 1945. On Major Tectonic Forms of China. *Geological Memoirs, Ser. A.*, Jobert N, Journnet B, et al. 1985. Deep Structure of Southern Tibet inferred from the dispersion of Rayleigh waves through a long-period seismic network. *Nature*, 313: 386~388.
- Kind R, Ni J F, Zhao W J, Wu J X, Yuan X H, Sandvol E A, et al. 1996. Evidence from earthquake data for a partially molten crustal layer in southern Tibet. *Science*, 274(5293): 1692~1694.
- Kind R, Yuan X, Saul J, Nelson K D, et al. 2002. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian Plate subduction. *Science*, 298: 1219~1221.
- Kopylova M G, Russell J K. 2000. Chemical stratification of Cratonic lithosphere; Constraints from the Northern Slave Craton, Canada. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 18171~18187.
- Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, Yuan X, Hanka W, Oreshin S. 1999. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. *Science*, 283: 1306~1309.
- Makovsky Yizhaq, Klemperer S L, Ratschbacher L, Brown L D, Li M, Zhao W J, Meng F. 1996. INDEPTH wide angle reflection observation of P-wave-to-S-wave conversion from crustal bright spots in Tibet. *Science*, 274(5293): 1690~1691.
- McNamara D E, Walter W R, Owens T J, Ammon C J. 1997. Upper mantle velocity structure beneath the Tibetan Plateau from Pn travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B1): 493~505.
- Mervis J. 1995. The right ties can save lives and move mountains. *Science*, 270:1144~1146.
- Molnar Peter. 1988. A review of geophysical constraints on the deep structure of the Tibetan Plateau, the Himalaya and the Karakoram, and their tectonic implications. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A326, 33~88.
- Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, Kuo J, et al. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet; synthesis of Project INDEPTH results. *Science*, 274(5293): 1684~1688.
- Ni J, Barazangi M. 1983. High-frequency seismic wave propagation beneath the Indian Shield, Himalaya Arc, Tibetan Plateau and surrounding regions: high uppermost mantle velocities and efficient Sn propagation beneath Tibet. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 72: 665~689.
- Ren Xiangwen, Wu Fuyuan. 2002. New Progress of the Formation and Evolution of Sub-Continental Lithospheric Mantle. *Progress in Geophysics*, 17(3): 514~524 (in Chinese with English abstract).
- Rob Van der Voo, Wim Spakmen, Harmen Bijwaard. 1999. Tethyan subducted slabs under India. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 171: 7~20.
- Rodgers A J, Schwartz S Y. 1998. Lithospheric structure of the Qiangtang Terrane, northern Tibetan Plateau, from complete regional waveform modeling; Evidence for partial melt. *Journal of Geophysical Research*, (?) : 7137~7152
- Sandvol E A, Ni J F, Kind R, Zhao W J. 1997. Seismic anisotropy beneath the southern Himalayas—Tibet collision zone. *Journal of Geophysical Research, B, Solid Earth and Planets*, 102(8): 17813~17823.
- Shi Danian, Zhao Wenjin, Brown L, Nelson D, Zhao Xun, Kidd R, Ni J, Xiong Jiayu, Mechie J, Guo Jinru, Klemperer S, Hearn T. 2004. Detection of southward intracontinental subduction of Tibetan lithosphere along the Bangong—Nujiang suture by P-to-S converted waves. *Geology*, 32(3): 209~212.
- Su Wei, Peng Yanju, Zheng Yuejun, Huang Zhongxian. 2002. Crust and upper mantle shear velocity structure beneath the Tibetan plateau and adjacent areas. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(3): 193~200 (in Chinese with English abstract).
- Tapponnier P, Xu Zhiqin. 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671~1677.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Wang Guangjie, et al. 1999. The deep internal dynamical processes and new model of continental—continental collision in Himalayan collision orogenic zone. *Chinese J. Geophysics*, 42(4): 481~494 (in Chinese with English abstract).
- Tilmann Frederic, James Ni. 2003. INDEPTH-III seismic team, seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet. *Science*, 300:
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Jeffrey T, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294: 574~577.
- Wei Wenbo, Martyn Unsworth, Alan Jones, et al. 2001. Detection of widespread fluids in the Tibetan crust by magnetotelluric studies. *Science*, 292: 716~718.
- Wittlinger G, Masson F, Poupinet G, et al. 1996. Seismic tomography of northern Tibet and Kunlun; Evidence for crustal blocks and mantle velocity contrasts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 139: 263~276.
- Wu Gongjian, Xiao Xuchang, Li Tingdong. 1989. The Yadong—Golmud Geoscience Section on the Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 63(4): 285~296 (in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu, Zeng Weijun, Hayes D E, Spangler S, et al. 1994. The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China and USA. Beijing; Chinese University of Geosciences Press (in Chinese with English abstract).
- Yuan X H, Ni J, Kidd R, Mechie J, Sandvol E. 1997. Lithospheric and upper mantle structure of southern Tibet from a seismological passive source experiment. *Journal of Geophysical Research, B, solid Earth and Planets*. 102(12):27491~27500.
- Zhao W J, Nelson K D, Che J, Guo J, et al. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366(6455): 557~559.
- Zhao W J, Mechie J, Guo J, Wenzel F, Meissner R, Ratschbacher L, Steentoft H, Husen S, Brauner H J, Jiang D, Frisch W, Hauff S F. 1997. Seismic mapping of crustal structures beneath the Indus—Yarlung suture, Tibet. *Terra Nova*, 9(1): 42~46.
- Zhao W J, Ross A R, Brown L D, Nelson K D, Klemperer S, Maines S, Mechie J, Saul J, Guo J. 1999. Seismic bright spots and partial melting under the Tibet plateau. *EOS, Trans. Am. Geophys. Un.*, 80: F952.
- Zhao W J, Mechie J, Brown L D, Guo J, Haines S, Hearn T, Klemperer S L, et al. 2001. Crustal structure of central Tibet as derived from project INDEPTH Wide-angle seismic data. *Geophys. J. Int.*, 145: 486~498.