

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

中国地球深部结构和深层动力过程与主体发展方向

滕吉文

中国科学院地球物理研究所, 北京, 100101

内容提要 地球深部结构、构造与大陆动力学研究在地球科学领域中占有重要地位。地球深部既是资源、能源形成和演化的场所, 又是地震灾害的策源地。它涉及了当今众多相邻学科的发展与成就, 故对地球本体的认识在不断深化, 特别是地球深部物质与能量的交换和深层动力过程。本文在阐述我国 20 世纪, 主要是 20 世纪下半叶以来地球深部结构与构造研究主体成就的基础上, 依据当今该领域在全球范围内的发展趋势, 探讨了 21 世纪初、中叶的发展导向, 并提出了某些战略重点。基于这样的前提, 文中着重讨论了以下 6 个问题: ① 地球深部结构与大陆动力学研究的意义、主题与目标; ② 地球物理深部地震探测揭示的地壳和上地幔的复杂性; ③ 岩石圈内的大型滑脱构造和地震“孕育”的深部环境; ④ 地球内部地震波传播速度分布与各向异性; ⑤ 地球深部结构、构造与大陆动力学; ⑥ 21 世纪初、中叶地球深部与大陆动力学研究的发展战略重点。

关键词 地球深部结构 滑脱构造 各向异性 深层过程 大陆动力学

对地球的认识与研究, 不仅可为解决诸如“天体演化”, “人类起源”等科学的前沿难题提供基础资料; 而且可为人类生存环境和生存质量的提高工作提供直接资料。地球物理科学的主体内涵便是了解地球、深化对地球本体的认识, 并为人类生息与社会和经济发展作出贡献。

中国是一个板缘和板内构造十分复杂的地域。在太平洋板块、菲律宾板块、印度板块和欧亚板块的共同作用下形成了一个破碎的块体镶嵌, 在这一统一力系作用下不仅形成了板内由一系列克拉通与年轻造山带组构的复合体, 而且构成了十分发育的纵、横断裂体系。在漫长的地质年代里, 中国大陆经历了多期复杂的构造运动, 形成了由准噶尔、塔里木、西藏、东北、华北、华南和边缘海域众多的块体和南北构造带为主体的当今构造格局。因此, 在中国及其邻近地域进行地球深部与大陆动力学研究更具有特殊的意义。

我国大量的地震反射、地震宽角反射和折射波法的深部地壳与地幔的人工源地震探测剖面, 为地壳与地幔的深部结构、物质组成及空间展布提供了精确的资料。天然地震体波和面波的观测对探讨区域性地幔结构与属性有着重要价值。这是在我国地球科学发展中了解地球本体及深层过程, 进而为资

源、灾害和环境变迁服务的重要基础。

本文基于大量的地震深部探测剖面 and 天然地震资料, 并充分考虑重力场、电场、热场、航空磁测、古地磁、大地构造以及岩石和化学组分(如地幔包体分析)等资料, 在新的理论指导下, 进行综合研究和地质解释。在世界上有关地学大断面(GGT)的研究已取得了重要进展(滕吉文, 1994a, 1994b), 在此基础上, 我国 IUGG(国际大地测量与地球物理联合会)地学断面委员会在全国提出了 11 条地学断面(在这一工作进程中, 在不同地区做了大量工作, 实际地学断面数超过这一范围), 以进行地球物理、地球化学和地质构造的综合研究。这不仅达到了单一学科研究难以达到的新认识和对地球本体认识的深化, 更重要的是揭示了地壳和地幔结构的复杂性与分区特征, 横向不均匀性与各向异性, 地球内部及其形成、演化与大陆动力学特征。

地球内部, 特别是地壳与地幔的研究涉及了地球科学的各个分支, 而地球物理探测剖面 and 地学断面则将其有机地结合起来, 形成一个完整而又复杂的体系, 并提出了一系列新见解。然而人类对地球本体的认识依然是很肤浅的, 目前尚有很多问题与方面是未知的。基于此, 地球深部各圈层的相互作用, 板内及板缘构造的深层过程与驱动机制, 流体的作

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号 40074020)的成果。

收稿日期: 2001-04-30; 改回日期: 2001-10-08; 责任编辑: 任希飞、章雨旭。

作者简介: 滕吉文, 男, 1934 年生。1956 年毕业于原东北地质学院地球物理系。1962 年于前苏联科学院大地物理所获数学—物理学副博士学位。现为中国科学院地质与地球物理所研究员、中国科学院院士。主要从事固体地球物理学研究。电话: (010) 64889005; Email: jwtexteng@mail.c—geos.ac.cn。

用,地球各圈层、海与陆、介质结构与物质组成,动力体系及其耦合,便必然构成了当今地球科学发展的前沿与生长点,这乃是 20 世纪末到下一世纪初、中叶,在地球科学整体发展中必须认真对待的关键所在。

半个多世纪以来,我国地球深部研究已做了大量工作;其主要单位有:中国科学院地球物理研究所;中国地震局郑州地球物理勘探中心,地球物理所和地质所;国土资源部中国地质科学研究院等有关单位。据不完全统计,至今已完成:① 深部人工源地震探测的宽角反射和折射达 60000km,近垂直反射约 2000km。② 大地电磁测深(MT)近 20000km(估计)。③ 已完成全国 1:100 和 1:50(部分地区为 1:20 万)的重力地面观测。④ 已完成全国(除西藏高原西北缘)1:100 和 1:50 万(或 1:20 万)的航空磁测。⑤ 已测得大地电热流数据近 700 个点,(A、B、C、D 四类共 681 个点)。

1 地球深部结构与大陆动力学研究的意义、主题与目标

地球内部物理学是以物理学研究的发展为依托,运用物理学的理论、方法探索地球深部各圈层的结构、状态、物质组成、动力体系与演化。为此,地球深部结构、构造与大陆动力学在地球科学研究领域里将必会越来越显示出其重要性。这是由于地球深部圈层与动力学乃是当代地球科学发展中的新兴领域,也是人类深化认识地球本体的重要组成。地球深部的研究范围涉及地壳、地幔和地核,尤其是岩石圈和软流圈及其边界所发生的各种现象、成因及其深层过程。这就需要通过深部探测和地球物理场的观测、资料处理和物理与数学模拟,并将地球作为一个整体进行综合研究,以达到深化认识地球和造福于人类的目的。

1.1 地球深部结构、构造与动力学研究的意义

地球科学的最终目标是了解地球本体及其从太阳系中诞生到它目前状态的演化,以便能对行星的物理学、化学、地质学和生物学的作用过程建立起详细的、定量的概念性预测模型,即了解整个地球和其系统的过去、现在和未来的行为,建立行星地球的整体理论,并利用这种认识为人类生存提供可持续发展的物质与环境基础。

人类在整个历史的进程中,都在探索地球的起源、发展和活动。人们在承认地球是为维系人类生存并提供一切物质的源泉后,才真正认识到地球与生

产、生活质量之间的内在关系。地球深部,特别是地壳、地幔、地核与动力学的研究已成为当代地球科学发展的前沿与生长点。地球深部乃是为人类提供一切物质资源的源泉,也是灾害和大地变迁的策源地,同时又制约着地球内部各圈层的耦合和物质与能量的交换。如今地球深部结构,特别是岩石圈与软流圈,深层过程与动力机制的研究正成为全球科学发展的关键。

为此在我国跨世纪的地球科学研究中,加强开展地球深部结构与动力学的研究必须提上日程。这是一项继往开来,提高中国固体地球科学整体水平,为国家宏观决策提供科学依据、深化对地球本体的认识,为资源、灾害和环境研究及预测提供重要基础资料的极为重要的前沿领域。

1.2 对地球内部与深层过程的思考

地球物理学在经历了以活动论为内涵的板块构造和行星际探测双重革命的重大发展时期以后,现正处在一个新的起点上。然而板块“登陆”以后却提出了一系列新的问题,特别是大陆溢流玄武岩、大洋溢流玄武岩、火山链和地幔热柱的出现,这对仅依水平运动为主体的板块运动提出了新的挑战。地幔对流不仅在大洋中脊与俯冲带可以构成一个“运动环”,而且来自核幔边界的地幔热柱亦可构成物质向上运移的通道和对流的组构。显然,地幔对流仅为科学的“猜想”,必须探索其物质运动的力源机制。深层地幔包体或火山喷发携带物中含有一定量的气体和流体的事实则证实了流体与固体介质作用的深层过程。根据黄金的非专属性、金属特性和新组构出的金原子结构模型,推断金起源于地核。金的形成是以气态→气液混合态→固态,且为由地核→地幔→地壳→大气层的演变过程。此外,以金伯利岩筒为向上输运载体的金刚石等是十分有趣的。地震的“孕育”与发生除震源区介质与构造环境外,更重要的是力源与深层过程。地球内部热状态、火山作用与喷发、造山运动、高原的抬升与地一气和海一陆的相互作用不仅影响着人文与气候和地理环境的变迁,而且制约着全球变化。地球内部磁场的变化、突变与倒转不仅构成了地史期间的一系列重要的地质事件,而且会导致生物灭绝与生命演化。天体运动与地球内部物质运动的关系及认识亦在深化。

在谈到环境及全球变化时,必须将环境视为四维空间;即大气圈、地表、岩石圈及其随时间的变化。为此,不论是地震的发生、火山的喷发、地球物理场的变异,还是它们对社会的作用,大气的影响和环境

的变迁均是十分重要的。所以在研究环境与全球变化进程中,地下深部的介质和构造环境是不可忽视的!这些事实告诉人们:地球内部各圈层及其力源体系既是为人类提供重要物质的源泉,又是地震灾害、火山喷发,乃至生物存亡及生息的策源地。

为此,地球深部各圈层的结构与动力学研究便涉及到人类的生存与生产活动和社会的发展与兴衰的方方面面。这便迫使人们必须对地球整体的深层过程,各圈层之间的相互作用和力源体系有一个新的思考,即将这一领域作为一个与社会和科学发展密切相关的“地球科学系统工程”来研究与探索,并使其为人类作出应有的贡献。这便是深化认识地球深部与力源机制的理由所在。

1.3 地球深部结构、构造与动力学研究的主题和目的

地球深部结构、构造与动力学研究是现代科学发展的综合体现,是地球科学发展中的前沿领域,也是人类用以深化认识地球本体的关键所在。对于地球这样一个复杂的物理、化学和生物体系的探索,当代物理、化学、力学、计算技术、通讯技术与生命科学新成就的利用,特别是对现代高科技的需求和应用是十分强烈的。在这些效应作用下,新的信息与信息量的获取,高层次的综合研究便愈显得重要和必然。

为此,在这一领域的研究中:

研究主题:地球深部结构与地球物理场特征,物质组成和各圈层的耦合。

研究中心:地壳、地幔、核—幔边界及地核和其形成与演化的深层过程。

研究目标:深部物质运移与板块运动和力源机制及新的地球动力学模型的建立。

研究目的:深化对地球本体的认识,为资源、灾害、环境和全球变化提供地球深层过程和物质运动要素,并对其潜在的前景进行预测。

2 地球物理深部地震探测揭示的地壳和上地幔的复杂性

许多地区的地球物理资料表明,以前将大陆地壳分为沉积层、花岗岩质层和玄武岩质层,以及将海洋地壳分为以沉积岩层和玄武岩质层为主的想法,是对实际情况的过分简化。在一些地区的地壳和上地幔内出现低速层、高速层或更为复杂的地震波速度结构,在横向上往往被不同深度的断裂构造所切割。因此,地壳和上地幔实际上是复杂的层状断块类型,它被许多局部地震界面分开(且为厚度不等的若

干薄层和主层),在空间上又为延伸范围不等的断裂所交错,表现出垂向上的分层性和横向上的分块性特点。

2.1 地壳的成层性和地壳中的低速层与高速梯度夹层

华北的浅源地震均发生在该区低速层以上的介质中,青藏高原地壳中存在两个低速层,该区浅源地震又多发生在第一低速层(上地壳)以上的脆性介质中。青藏高原上地壳中的低速层(第一低速层)不论在藏北(雅安多—那曲—色林错地带),还是在藏南(曾莫错—定结—佩古错地带),均向西延展,并分别在斑戈和定结附近尖灭(Teng Jiwen et al., 1985b, 1985c)。在新疆横跨天山地带下地壳中存在一低速层,速度为 5.6km/s(卢德源等, 2000),而在西北造山带与盆地地区,地壳和上地幔结构存在明显差异(滕吉文等, 1994e)。我国攀西构造带不仅存在地壳低速层(滕吉文等, 1987a),而且高导层亦很发育(孔祥儒等, 1987)。通过对不同地区的深部结构的研究结果表明,在地震、地热和大地构造的活动地区,一般低速层均较发育,而且埋深浅,如中国东南陆缘的泉州地带,低速层埋深仅 13~14km(熊绍柏等, 1991, 1993a);而漳州地区龙溪师范 1 号井内 292m 深处的温度已达 120℃,且在深 9km 以下存在一个规模很大的低速体,其横向延伸约 100km,厚 10km 以上,平均层速度为 5.8km/s(熊绍柏等, 1991)。根据 P 波速度减小和 S 波反射能量消失推断,该区深部存在一个部分熔融体。这便提出了一个问题,地壳低速层的存在怎样分辨,它在构造活动与演化中起着什么样的作用,又是如何形成的?这些问题的解决无疑将会使地壳与上地幔的研究工作得到深化,且可取得更为有益的地质解释。

此外,青海柴达木盆地、甘肃景泰和华北元氏—济南地区的地壳中还存在着高速梯度夹层,层速度最大可高于 8.0km/s(滕吉文等, 1974a, 1974b, 1975; Teng Jiwen, 1989b)。

2.2 对 Moho 界面的新认识

随着深部地震探测数据的不断增多,人们对莫霍面的认识在不断深化。Moho 面被认为是一个尖锐的间断面(一级不连续面)的看法已不具有普遍的意义。因为在一些地区的地震探测资料表明, Moho 界面是一个厚达数公里的极为复杂的高、低速互层的过渡带或梯度变化带。通过对目前尚处于活动的造山带地区采集的地震反射数据与古老的造山带地区采集的数据进行对比,可说明大陆板内 Moho 界

面的活动性。在活动造山带,如阿尔卑斯山和比利牛斯山,在地壳下存在着补偿隆起地形的“山根”,而构成“山根”下边界的 Moho 界面呈叠瓦状构造,其断距大于 10km。喜马拉雅山脉地带为最年轻的造山带,构造强烈活动,山体高高隆起,然而这里并无“山根”,地壳尽管很厚,但重力未达均衡,山脉仍在升起。这里 Moho 界面为横向极不均匀的薄层束,且具较大错动,地壳中存在大型推覆构造。与此相反,在古生代造山带,如阿巴拉契亚山脉,加里东—海西构造带和新英格兰褶皱带,中国的太行山脉及其山前地带等地, Moho 界面则显示出较小的错动,其断距均小于 5km。在攀枝花—西昌构造带,不仅上地幔顶部速度低,仅 7.6~7.9km/s,而且地壳中存在一较厚的低速层(熊绍柏等,1993b;滕吉文等,1973,1974,1975;赵俊猛等,2000)。

地震探测资料还表明,大陆 Moho 界面具有较为年轻的特征,如加里东造山带,下地壳宽阔倾斜反射界面的底部表现为明显的近水平 Moho 界面反射,说明 Moho 界面的形成晚于造山带。所以,根据古老造山带下面 Moho 界面的“平坦”几何形态,可说明它是一个相对年轻的构造区。目前,人们对这一认识提出了解释,认为这可能是由于晚期岩浆的底侵作用或相变造成的。在太行山山前断裂与鲁西隆起之间的冀中凹坳区内普遍存在着壳—幔过渡带。这可以解释为:岩浆在地壳底部的侵位作用和侵入到地壳内的扩张过程可能起着重要作用。岩浆的底侵作用导致异常的壳—幔过渡带,在反射剖上显示为高、低速相间的叠层束。在元氏—济南剖面中、下地壳的层速度为 7.0km/s,这对应于地壳扩张时期的铁镁质和超铁镁质岩相物质的侵入带,该层厚约 3~5km(滕吉文等,2002)。

Moho 界面的组构和属性与构造运动、地球内部物质与能量的交换、热物质上涌、深部物质分异与调整和深层动力过程密切相关。为此,在不同地区可以分辨出 Moho 界面是一级间断面,或呈高、低速相间的薄层束和速度梯度带等形态。这已被中国东部与青藏高原的深部地震探测资料所证实,例如在我国柴达木盆地 Moho 界面的地震波场呈一延续达 2s 的波列(滕吉文等,1973),在天山及准噶尔盆地,壳幔过渡带十分复杂,即由 7~8 个薄层叠合组成,各薄层厚约 2~3km,总厚度达 20km(赵俊猛等,2000)。在青藏高原 P_M 震相不仅为多相位的震相,且为一厚约 12km 的壳—幔过渡带(Hirn et al., 1984);在东北闫阳—海城—东沟的 P_M 震相由 19.

8s 延续至 20.1s,呈现出一组薄层束的波形记录(卢造勋等,1993);在屯溪—温州地带 Moho 界带则呈现为系列逆冲状交错过渡带(熊绍柏等,1993)。利用近垂直反射方法研究了中国满州里—绥芬河地学断面内泰康—哈尔滨长约 130km 范围内的地壳结构和 Moho 界面特征,探讨了影响 Moho 界面特征及成因的因素主要为分异作用、地幔对流、相变、地球转动和板块运动;其中地幔对流和相变是形成 Moho 界面的主要因素(杨宝俊等,1999)。

2.3 岩石圈和软流圈的界带

岩石圈是坚硬的地球外层,软流圈则是较热、较软、略具塑性的岩层。二者的区分主要依据如下:首先是温度的差别,二者之间以地幔固相线为界;其次为地震波的传播速度与 Q 值,岩石圈的速度和 Q 值较高,而软流圈的速度和 Q 值均较低;第三是软硬的程度不同,岩石圈具一定的弹性,其粘度远低于软流圈。依据大地电磁测深可以确定地幔高导层的埋深,通过平均大地热流密度值也可能确定上地幔部分熔融带的大体深度,而由包体的 p - T (压力—温度)条件和应力水平及反演玄武岩 p - T 条件也可以确定软流圈的近似埋深,但其精度远不如地震波场效应高。应当看到,岩石圈和软流圈的划分是板块构造理论的基本原则之一,故其界限的确定对丰富板块构造理论和岩石圈的定义均具有重要意义。

基于上述,许多地球物理大断面均划分出岩石圈和软流圈界线,并对其速度结构和空间展布进行了研究。华北平原—东海—琉球岛弧—菲律宾海—马里亚纳海沟—太平洋地学断面揭示出的软流圈顶面埋深为:华南陆缘地带 96km,深海海盆地区 35~40km,南海南部和北苏禄海地带 50~70km(滕吉文,1994a, 1994b)。显而易见,由大陆向陆缘,到近海,到海域与深海盆地地带,软流圈的埋深变化强烈。通过综合地质和地球物理研究(地震、重力、地热流以及海底拖网取样等)确定了岩石圈和软流圈的界线;华北平原及近海地带岩石圈厚度为 60~80km,菲律宾海为 50~70km,帕雷塞贝拉海盆为 30km,马里亚纳海沟为 20km。该剖面还反映出岩石圈厚度与其年龄的一般规律,即在年轻的洋壳下,岩石圈较薄,而在古老的陆壳下,岩石圈较厚;在海洋中,洋壳年龄越老,其岩石圈厚度也就越大。

在板内地区,如华北平原和邻近海域岩石圈厚度分别为 (80 ± 2) km 和 (70 ± 5) km,即向海域减薄(滕吉文等,1982;冯锐等,1987)。由上述可见,在大陆—亚大陆—亚海洋—海洋地区,其软流圈埋深呈

规律变化,但其局部还是有差异的。

青藏高原地壳巨厚(60~75km),软流圈埋深却相对较浅(90~100km)(滕吉文等,1991),故形成了巨厚地壳与薄岩石圈的特异结构模型。在西北造山带和盆地地区,地壳厚度为40~45km,软流圈埋深一般为100~120km(滕吉文等,1994c),在盆地地区表现为上隆,而在造山带则下凹,其垂直幅度差异可达5~10km。

从整体上看,岩石圈厚度由东向西增厚。大兴安岭—太行山—武陵山一线是岩石圈厚度显著变化地带(加厚地带),南北构造带为中国东部与西部由浅部到深部岩石圈的阶状变异界带。在新生代裂谷的下方,岩石圈厚度显著变薄,并有深部物质上涌(Teng Jiwen, 1989a)。

中国地壳厚度由西向东减薄,而在东部地区则呈一明显的阶状展布,且被一系列穿过 Moho 界面、伸抵上地幔顶部的深大断裂所切割。由于地壳低速层亦被切断,故推断这些断裂乃是近期中、新生代的产物。由西部的兴都库什经青藏高原、秦岭,直达东海的地壳结构表现,兴都库什地区上地幔顶部埋深为60~65km,向东逐渐加深,在青藏高原下面达75km左右,再向东则快速减薄,在东海地带为30km左右。

关于地幔低速层的准确信息当今尚不多,特别是人工源激发地震波场的精细参量,大多数数值是依据天然地震资料反演所得。大地电磁测深所得数据并不一定与上地幔低速层完全对应。

3 岩石圈内的大型滑脱构造和地震“孕育”的深部环境

3.1 岩石圈内滑脱构造的证实

越来越多的资料表明,在岩石圈内部,特别是在其上部20~30km深度范围内,存在着许多大型的近水平状的构造滑脱面或拆离面,它使原先被认为是完整的岩石圈板块被拆离成许多板片,且在水平应力挤压下发生大规模的迁移,这种岩石圈内的板块拆离使其具有层层剥离和滑动性质的构造面称为滑脱构造。滑脱构造把岩石圈板块劈裂成近水平产状的薄岩板,各岩板发生变形,并沿其下的滑脱构造面发生大距离的逆冲叠覆和伸展,形成典型的薄皮构造。许多断面的地壳构造研究表明,滑脱构造不仅广泛存在,而且由此引起的薄皮构造可能是一些大陆造山带的构造模式。

(1) 喜马拉雅地带存在大型推覆的滑脱构造:

基于对该区地震宽角反射、折射和近垂直反射的深部探测得出,地壳中存在低速层,雅鲁藏布江地带及其周边近南、北两侧的地壳中存在两个低速层,并向南逐渐抬升,上部低速层与主边界大断裂相连,构成了该区自南向北推覆的大型滑脱构造(Teng Jiwen et al., 1994f; Zhao Wenjin et al., 1993; 吴宣志等, 1995)。喜马拉雅山系的抬升,碰撞挤压过渡带的强烈活动,是与两大陆板块碰撞、挤压和印度板块地壳物质向北“楔入”密切相关的。

(2) 华北盆地存在大型滑脱构造: 华北临城—巨鹿深地震反射剖面上显示出两个断陷盆地: 东部盆地属束鹿断陷盆地,相应的断裂为新河断裂; 西部盆地为晋县断陷盆地,主边界断裂为晋县断裂(王椿镛等, 1994, 1993)。两个盆地之间为地震反射波场的似透明区或由能量小、不连续的短反射段形成的弱反射区。

(3) 西北地区北祁连—河西走廊地带地壳中的大型滑脱构造: 在西北祁连—河西走廊地带的深地震近垂直反射剖面,给出了北祁连—河西走廊地带的大型滑脱构造展布状况(吴宣志等, 1995)。在该剖面中部的反射事件A为滑脱构造,显示为大约1.0s宽的多循环反射带。反射事件从剖面北端2.5s往南一直可以追踪到4.5s左右,根据叠加剖面上滑脱构造的趋势,推测在剖面北端的花海盆地处滑脱面将出露地表。滑脱构造具有反射事件连续性好、能量强的特点,在时间剖面上延续1.0s左右。这一反射带的倾角在剖面北端为30°,向南逐渐减小,中部酒西盆地下面为10°,再往北则减至5°左右。

3.2 地震活动地带的深部介质、构造环境与深层过程

中国大陆及陆缘地带的地震活动具有明显的分带性,而且主要为浅源地震(震源深度10~30km)。地震反射结果表明,邢台地震区下方的震源附近,存在一组局部错动的断裂,其水平断距为2~3km,它们之间并不相连,而下部却隐伏着伸抵上地幔顶部的断裂。震中区为高吸收带(低Q值),且为上地幔局部隆起和地球物理场的变异地带(滕吉文等, 1974, 1975)。该区上地壳内还存在一个从高角到低角的铲状断裂,即新河断裂向下延伸达8km深处(王椿镛等, 1993)。基于邢台主震区断裂为走滑断层,倾角为80°左右,震源深度为9km,故发震断层为正断层,并推断深部存在一条从震源位置到Moho界面的隐伏断层,它可能是邢台大地震的发震断层。又基于华北地区构造应力场的平均p轴和

T 轴近于水平(NNE—SSW 和 NNW—SSE),这显然为一稳定的板块构造力。由于深部热物质的侵入使地壳内部物质产生不同程度的膨胀,并产生附加的热驱动力所致,故推断华北盆地的形成和邢台地震的发生是由于上地幔热物质沿断裂通道上涌造成的(曾融生等,1991b)。显然,地震的“孕育”、发生和发展与岩石圈结构有着内在的联系(滕吉文等,1997a)。

地震发生与发展的构造环境和力学机制是十分复杂的,对每一个大地震的具体物理与力学过程必须进行具体分析。然而通过对东旺地震(滕吉文等1974a,1974b,1975)、唐山地震(曾融生等,1988)、临汾地震(刘昌铨等,1994)、海城地震(卢造勋等,1993)、西昌地震(Wei Siyu et al., 1989)及新疆伽师强震区(刘启元等,2000)等二维与三维深部结构的研究,使我们对于地震“孕育”的深部介质、构造环境及深层过程有了一个较清晰的认识,即它们与震源区附近地带介质的物理—力学特异属性,滑脱构造,断裂或隐伏断裂活动及空间展布密切相关,在成因上主要为深部热物质运移与上涌。

中国及其相邻地带整体的地震活动、分布,与地壳、上地幔结构密切相关,并具有明显的分带性;如兴都库什地震带和青藏高原地震带不仅地震活动十分活跃,而且震源深度可抵达上地幔(即为浅源与中源地区);南北地震带则为浅源地震;华北地区亦为浅源地震带,却是我国东部地震最为活动的地区;华南大陆地区地震十分稀少,仅在陆缘地带带有浅源地震,呈向南突出的弧形分布。应当指出,这些地震主要集中在低 Q 值区的中、上地壳内,在地震区还存在着各向异性(高原等,1999)。

4 地球内部速度分布的各向异性

4.1 地震面波速度差异反映的各向异性

(1) 青藏高原、西北造山带和沉积盆地地区,均表现出 V_{SV} 与 V_{SH} 速度值的差异(宋仲和等,1992)。在青藏高原 100km 深度以下,出现 $V_{SV} > V_{SH}$,显示出南北向水平挤压的特征。

(2) 南北构造带地区,三个不同深度处的 V_{SV} 与 V_{SH} 值特征(陈立华等,1991)表明, V_{SV} 与 V_{SH} 波速相差很小,随着深度的增大, V_{SH} 明显大于 V_{SV} 。在地幔低速层内各向异性增强,但北段不明显。

4.2 SKS 震相偏振与各向异性

(1) 云南昆明地区。该区 SKS 波最快偏振方位为 NE—SW, P_n 波最快偏振方向为 NW—SE,二者

相互垂直,依 P_n 波视速度方位分布求得的平均视速度为 8.12km/s,构造方位异常变化为 ± 0.12 km/s。 P_n 快速方向与康滇岩石圈块体运动的方向一致。SKS 分裂时间为 0.58s,在上地幔顶部和上地壳的分裂时间缩短了约 0.35s(李白基,1994),说明 SKS 分裂来源于上地幔介质中。 P_n 震相的速度方位异性率为 3.3%。这是印度板块与欧亚板块相碰撞所致,即康滇块体南东向运动引起橄榄石晶轴优势取向造成的。SKS 是某地质时代橄榄石优势取向的遗存。

(2) 青藏高原地区,在青藏高原雅鲁藏布江南、北两侧各向异性存在较大差异,江北快速波偏振方向平均在 $N70^\circ E$ 左右,且由北往南增大,在雅鲁藏布江附近近于东西,在雅鲁藏布江以南快速波偏振方位平均为 $N25^\circ W$ 左右。此外,各向异性强度也存在差异(姜枚等,1996),雅鲁藏布江以北那曲附近快、慢波到时差(Δt)可达 1s,且存在局部变化,而雅鲁藏布江以南却较弱, $\Delta t = 0.2$ s,相对较稳定。这便表明,雅鲁藏布江以北快速波的方向代表印度板块向北运移的挤压方向,而雅鲁藏布江南、北各向异性差异却证实了印度板块俯冲前沿并没有越过雅鲁藏布江。

4.3 中国大陆岩石圈的方位各向异性

在 8 个地震观测台的宽频带记录图上共识别出了 56 个清晰的 SKS 震相。通过分析与反演发现,存在明显的 S 波分裂现象,时间延长在 0.7~1.7s 之间。这种经过地幔传播(SKs 震相)的 S 波分裂现象的主要原因是上地幔各向异性,并可用其中矿物质的结晶优势排列来解释(郑斯华,高原,1994;Silver P. G. et al., 1991)。

应当指出,由于应变导致晶格点阵的优势排列,使岩石介质总体的弹性具有各向异性,如果上地幔中 50%~70% 是橄榄岩,并且其中有 15% 橄榄岩的结晶轴方向是一致的,那么 1s 的时间延迟大致相当于地震波在各向异性介质中的传播距离为 115km。因此,这一结果暗示,引起 SKS 剪切波分裂的各向异性介质层的厚度大致为 80~190km。这个数值范围与由上地幔中的高导层和低速层所推断的中国大陆下面岩石圈的厚度基本相符。

5 地球深部结构、构造和大陆动力学

全球地球深部与动力学计划的一个主要内容是研究岩石圈介质结构、构造及形成、演化,深部物质的运动与行为,力源与机制及其深层过程。

5.1 青藏高原碰撞造山带的特异构造背景与双层“楔板”新模型

青藏高原的地震活动不论在纵向或横向上都是不均匀的,中源地震主要集中在兴都库什和印缅山区,而喜马拉雅山脉中麓中源地震却很少,而且大多数为浅源地震。在喜马拉雅山脉北麓地震震源面北倾,而在当雄—雅鲁藏布江地带则南倾,即具有双向对冲的特征。此外,特提斯—喜马拉雅和拉萨块体的地壳亦为由多个双向冲断层构成,这些均显示出藏南这一特异活动带和深部构造背景。依据震源机制可以推断,不仅在该区腹地壳—幔介质之间存在层间滑动,而且在高原两侧有一系列大型的走滑断裂系形成,它当必促使深部物质侧向流展(滕吉文等,1991;曾融生等,1991a)。

由青藏高原和华北地区的地壳结构可清晰地看到,研究区内的地壳和上地幔具有复杂的成层性和断块构造。其特征表现为:物理参数呈跳跃式变化,如地震波速从一个块段过渡到另一块段时,其波场效应和地球物理场特征均会发生显著变化,即各断块被不同方向的倾斜至水平的深大断裂所切割;地壳厚度和软流圈的深度变化范围也较大;地幔中的一些大断裂,从下部伸入地壳,逐渐变小并分叉形成一系列较小的断裂(滕吉文等,1994e)。从地壳到地幔的构造也十分复杂,它们并非是一个明显而又平整的界面,而是一个由薄层束或梯度层构成的过渡带。喜马拉雅碰撞造山带地区的宽角反射(滕吉文等,1985a,1994e)和反射(Zhao Wenjin et al., 1993)反映的深部结构十分复杂,岩石圈中存在“楔入”模式(曾融生等,1992;滕吉文等,1980),高原地壳增厚

和整体隆升主要受挤压力系作用所致。

最近利用人工源地震深部探测和地震 Rayleigh 波频散反演三维速度结构发现,这里存在着双层“楔板”的新模型(滕吉文等,1999)见图1。该模型第一“楔板”的上、下界面均为地壳上部或中部的壳内低速层顶、底面,而下地壳低速层的底界在雅鲁藏布江以南为 Moho 界面上部低速层的顶界,由于雅鲁藏布江陡角断裂的阻隔,上“楔板”冲弯了该断裂的深部地段,产生“崩塌”,故这一“楔板”并未越过雅鲁藏布江(第一“楔板”)。三维地震面波频散与反演速度结构还表明:恒河平原北缘与喜马拉雅山碰撞造山带地域,由南向北地幔盖层厚度为 80~50km,即呈楔状,它以 Moho 界面上面的低速层底界为第一滑脱面,以上地幔软流层为第二滑脱面(第二“楔板”),在由南向北的力系作用下向北运移。在这一运移进程中第二“楔板”的上界面突破雅鲁藏布江根部的局部阻隔,并转换为以藏北地区的下地壳低速层底部为上滑脱面,直抵昆仑山和阿尔金山地带,即在塔里木—柴达木刚性陆核阻隔下而终止,故在该区形成了陆—陆碰撞的双层“楔板”新模型(滕吉文等,1999)。

青藏高原的隆升、地壳缩短、增厚,与喜马拉雅碰撞造山带的深层过程密切相关,它是印度板块和欧亚板块碰撞挤压以及南、北双向受力作用的结果,并形成了自古生代以来至今的演化格局。正由于这种力系作用的机制,促使深部物质分异、调整,并产生深部物质的侧向流展。

5.2 攀枝花—西昌裂谷构造带的深层过程

通过对古裂谷必要和充分条件的详细研究表

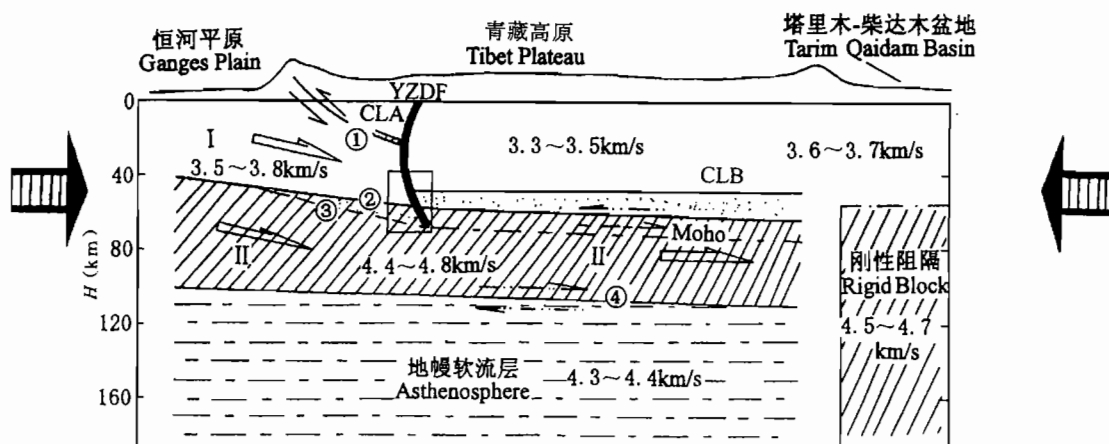


图1 喜马拉雅碰撞造山带的碰撞挤压与同步运移的“双层楔板”新模式示意图

Fig. 1 Sketch map of new model for tow layer "Wedge plates" of synchronous movement in collision orogenic zone of Himalaya

明,攀枝花—西昌构造带由于受到邻区构造运动和深部物质运移的影响和叠加,故构成了一个被动“活化”的古裂谷带(Teng Jiwen, 1989a)。它具有特异的地球物理场背景和深层过程,且为现今构造运动的活动地带。该区 Q 值低,且大体上可以分为 3 个区域(姚虹, 1988),即西部:中甸、宁蒗、永胜、华坪等地, Q 值为 386~435;东部:昭通、巧家、东川等地, Q 值为 480~616;中部:冕宁、木里、昭觉、普格、盐边、米易、会理、攀枝花、平地街等地, Q 值约 251~330。显然,东、西部深部介质的速度结构和物质属性存在明显差别。

以上表明,康滇构造带轴部地区为低 Q 值区,西部高于中部,而东部则为高 Q 值区。中部 Q 值低和结构差异产生的原因主要是地壳深部尚有热物质在运移,岩石圈底部应力向上发散,康滇构造带周围地区地壳物质尚在运动以及巨型断裂系尚在活动等因素的综合效应。

该区地幔软流圈埋深为 80~90km,岩石圈底部地幔流尚有上涌,大地热流密度值在轴部高,两翼地震震源深度比轴部大,上地幔横向极不均匀,未能获得清晰的反射,上地幔顶部速度低(7.6~7.8km/s)(熊绍柏等, 1993b)。自二叠纪大量玄武岩喷发以来,该区经历了多次构造运动和岩浆活动,不仅形成了众多矿产资源的聚集、地震的强烈活动,而且构成了极为特殊的裂谷类型与现今复杂的构造格局,故这是一个被动“活化”的古裂谷,从而补充了世界上裂谷系的分类(滕吉文等, 1987a)。综观中国各地的大陆伸展构造和裂谷分布表明,中国的裂谷构造确有其本身的特点。

5.3 郯庐断裂带是一条延伸抵达上地幔顶部的深大断裂,并继续向南延伸

在郯庐断裂带两侧,岩石圈结构存在明显差异,来自断裂带下方的 Moho 界面反射不清晰,且存在 2~3km 的垂直断距。地震反射和折射结果均表明,郯庐断裂带是由 3~4 条断裂组成的剪切断裂系(郑晔, 滕吉文, 1994; Weng Shijie et al., 1990; 滕吉文等, 1987b; Wei Siyu, 1993)。上地幔中有两个深度分别为 76km 和 100km 的界面,76km 深度以下为一低速层,100km 深度以下则为速度更低的低速介质,故表明岩石圈厚度仅 76km。郯庐断裂带以东的下地壳向西俯冲,推断在深部可能有一条碰撞—挤压俯冲带。局部地区的软流圈上隆、地幔物质上涌,结合包体分析和深层过程表明,以该断裂系为通道,深部地幔物质还在上涌,即在深部尚存在垂向活动。

依据最新的地震面波三维速度结构研究结果表明,它在跨过长江以后,并没有终止而是继续向南延展,并在海南岛附近地带潜入海中(TENG Jiwen et al., 2001),在北部(东北地区)的地壳与上地幔结构研究也证明了它基本上沿依兰—伊通断裂向北伸,并越出国界。这便表明,郯庐断裂带是一条贯穿我国东部走向为 NNE—NE 的一条深大断裂带,并为东亚东南缘的动力边界。在东亚大陆动力学研究中将占有重要地位。

5.4 渤海湾具有潜在地幔热的地球物理场效应和深部构造背景

通过渤海湾地区重力、航磁、古地磁、天然地震、地热、应力场、地壳与上地幔结构及地震层析成像等资料,对该区及周边地带的深部结构,地球物理场效应和深层物理过程进行了综合研究。渤海湾盆地是由 NNE—NE 向、EW 向和 NW 向三组断裂组成。这三组断裂与三组地幔隆起带基本相对应,并在渤中凹陷处交汇,渤海内部的现代构造运动以水平构造应力场作用下的走滑运动为主要特征,渤海地区内地壳厚度仅 28~29km,上地幔向上隆起,等温居里面埋深浅(为 12km),并为较高热流值区(56~77mW/m²)。应力场与磁力场均呈准圆形圈闭,该区岩石圈厚度变化显著,庙岛西部中地壳中有一近圆形的低速体,并向下延伸抵 120km 深处。在渤海的钻井中发现存在着潜伏的玄武岩,而且该区地震十分活动,至今已发生 7 级以上地震达三次(仅在中心部位,不包括周边地带)。通过综合研究发现,这里可能是一个潜在的孕育与发展中的地幔热柱(滕吉文等, 1997b)。同时指出,这一地域可为深部热物质与气态物质上涌的通道,且很可能是成熟度较好的油气重要前景地区。

5.5 秦岭—大别造山带超高压变质带的深层过程

秦岭—大别造山带介于华北与扬子之间,它是扬子陆块向华北陆块俯冲的一个重要板内界带(胡家富等, 1996)。南、北大别之间存在着一条边界断裂,水吼—五河断裂可能是大别造山带的主要构造分界线。这里 Moho 界面的局部抬升和壳内高速物质的形成与地幔物质上涌密切相关,它有可能是柯石英与榴辉岩的深部通道(王椿镛等, 1997)。大别造山带 Moho 界面的凹曲(特别是岳西、晓天地带)、倾斜和分段构造形态与扬子板块和华北板块的碰撞挤压密切相关(滕吉文等, 2001)。

5.6 华南大陆内部的陆内俯冲与重要构造单元界面的深层过程

在太平洋板块向西俯冲和菲律宾板块西向运移的碰撞、挤压力系作用下,形成了一个极为复杂的板缘构造格局。通过华南大陆及周边地带地震 Rayleigh 波频散效应和三维速度结构反演(滕吉文等,2001),地震展析成像(徐佩芬等,2000)和大地电磁测深的电性结构研究(袁学诚等,1989)。结果表明,扬子陆块与华北陆块之间存在由南向北陆内俯冲的高速板片,俯冲深度为 100~170km(滕吉文等,2001),在滇西特提斯造山带下面存在扬子陆块向西的陆内俯冲高速板片,俯冲深度为 250km 左右(刘福田等,2000)。由于陆内俯冲的高速板片强度在下插过程中逐渐减弱,大陆向上的浮力与大洋板片向下的拖曳力构成了一对力偶,故促使大陆板片断折,大地电磁测深结果也表明在扬子陆块与华南陆块之间陆内存在着西向俯冲的消减带。

5.7 中国大陆动力学与几点认识

中国大陆及陆缘地带的构造格局受全球构造与动力体系的制约,中国东部及海域地区恰处在岩石圈结构和地球物理场的特异地带,故中国东部大陆及陆缘地带为岩石圈结构十分复杂的变异地带;地壳厚度由西向东减薄,而且可划分为若干带界(滕吉文等,1987b, 1994d;魏斯禹等,1990)。由地表到上地幔深部,恰处在复杂力系作用和深层过程的错综交替部位,它不但受到岩石圈板块运动的控制和深部物质运移与上涌的作用,而且受到上地幔,特别是软流圈物质及其不同密度区之间地幔对流和地壳底部产生的粘滞性拖曳力作用的制约。可见,中国东部陆缘由不同块体拼贴而成,且其构造格局受全球构造运动的控制,同时还受到了强烈的改造和挤压作用,如南海北部大陆边缘便是由古陆、碰撞破碎带、主动大陆边缘,又经过陆缘扩张后形成的被动大陆边缘。因此,不论是台湾地带的现今构造格局,还是沟、弧、盆体系的形成等,均经历了一系列的错综演化过程,并在华南陆缘和岛弧上形成了一系列成因各异的沉积盆地。

由于菲律宾海板块、太平洋板块和印度洋板块的共同作用以及局部块体“楔入”,青藏高原在深部力系作用向 NNE—NE 延展,依据地球物理标志,青藏高原可划分为 6 个地体(滕吉文等,1995, 1996)。在我国东部地区太平洋板块向西俯冲于中国东部大陆之下,并向内陆推挤,从而形成了中国大陆及其邻近地域的板内的错综构造格局。基于上述,概

括起来(曾融生等,1991a, 1991b; Teng et al., 1994f; Wei et al., 1993; 滕吉文等,1994a, 2000a; Teng et al., 2000b)可有以下几点认识。

(1) 海陆板块碰撞与动力作用:陆缘地带受太平洋板块和菲律宾海板块西移作用的挤压,隆升、变形,形成了一系列的造山带和盆地(包括边缘海盆地);造成了由北向南地震活动频度与强度极不均匀的深层过程;基于壳内强烈剪切滑动、升温和部分熔融,故形成了该区的火山和系列花岗岩。

(2) 东部陆缘板内壳—幔结构与深层过程:郯庐左旋平移断裂东侧的扬子克拉通地壳沿该断裂带向华北达拉通之下俯冲,结果在该断裂的西侧产生拉分裂谷或断陷盆地,并导致了晚侏罗世—白垩纪的拉分裂谷或断陷盆地的形成。在拉分过程中,地壳引张、地幔上隆和中地壳减薄。这里不仅是一条地震活动程度不一的深大断裂带,而且存在深部物质上涌,导致邻区秦岭—大别、鲁西南地带超高压变质带和深层回返作用。应当清晰的认识到,板内俯冲占有重要地位。

(3) 大兴安岭—太行山—武陵山—苗岭地带的重力梯度带:岩石圈增厚,上地幔受到强烈扰动,部分地段地幔物质向上运移形成岩浆侵入、火山喷发和大规模北北东向的重力梯度带。这一地带还受到强烈褶皱、逆掩和剪切拆离,重力尚未达均衡。

(4) 大别山超高压变质带的形成有着复杂的深层动力过程:柯石英与榴辉岩的形成涉及到地幔物质与能量的交换及回返。它是华北与扬子之间块体的重要边界,也是中国东部南、北的重要分界。

(5) 南北构造带(也称康滇构造带)是华北西部、扬子克拉通与青藏高原共同作用的产物:由于印度板块与欧亚板块碰撞后,应力并未耗尽,而是向北传递,并促使深部物质重新分异、调整和侧向流展,不仅产生了一系列 NW—NNW 向走滑断裂,而且在扬子克拉通阻隔下物质流展,向南运移,形成了一个受力边界的菱形块体。对称于南北走向的构造带轴部的溢流玄武岩喷发,上地幔上隆,地震频频发生,水热强烈活动等导致了在这一南北向裂谷带内形成了丰富的金属与非金属矿产资源。这是板内一种特殊类型的裂谷带——被动“活化”的古裂谷。

(6) 印度板块与欧亚板块碰撞挤压过渡带的形成:印度板块与欧亚板块的碰撞与挤压,不仅导致青藏高原地壳增厚,强烈的地震活动与水热活动,而且造成了雅鲁藏布江强烈的航磁线性异常带和延长达 1500km 的蛇绿岩套与混杂堆积;这里地壳巨厚,

但岩石圈却相对较薄。喜马拉雅山系地带重力未达均衡,山系仍在上升,并形成了两大陆板块的碰撞挤压过渡带和“世界屋脊”。

(7) 兴都库什地域的特异深层过程:兴都库什地震区,地壳厚度为 50~60km。这里为中源地震区,能量强,频度高,震源面呈“V”字形展布,且为印度板块与欧亚板块最先撞击的部位,尔后印度板块呈逆时针旋转,并在印缅山区与欧亚板块碰撞,形成了喜马拉雅弧形山系东、西部的两个端点(弧顶),最后挤没了古地中海,才形成了当今这种构造格局。所以说,中国大陆、海域及其邻区是在印度板块、太平洋板块、菲律宾海板块和欧亚板块共同作用下形成的一个破碎块体镶嵌的组合,它造成了东亚大陆及周边地域的板缘和板内的错综作用。

(8) 陆—陆碰撞,挤压和陆内俯冲板片与岩石圈物质的断折:这是继板块构造说“登陆”后的一个重大发现与进展:即板内俯冲、消减和错综的构造运动与深层过程。它将会对板内构造格局及深层动力过程提供新的启迪和新的论点与论据,并必定会在大陆动力学研究中起到重要作用。

6 21 世纪初、中叶地球深部物理与动力学研究发展的战略重点

板块构造提出以后,对驱动机制问题的探索,地幔对流“猜想”的问世,地幔热柱的发现,无一不直接关系到地球深部物理与物质和能量的交换。显然,一系列的问题与启迪告诉人们,地球的深层过程是地球物理和地球演化的动力来源,是受着多层圈的耦合和物质与能量的交换的制约;它必成为碰撞造山与盆地,高原的形成与演化,大陆伸展与裂谷,深层物质运移与地震的“孕育”、发生和发展,成矿过程以及大陆板块和大洋板块的动力机制研究的支撑。我国疆域广阔,典型构造类型众多,是地球内部与深层过程及大陆动力学研究的最佳天然实验场,故必定会在国际间最为关注的科学领域取得突破性的发现和发展。

该领域的主要研究方向可包括:

(1) 新一代高科技的地面地球物理观测系统的建立:建立宽频带、大动态、三分量、数字化的自动化记录的地震流动观测系统和台网(阵)观测至关重要。多波多分量,特别是对 S 波和转换波的应用、近震与远震的应用有着重要价值。同时必然要加强空中与卫星重、磁场的观测和复杂介质结构的物性成像研究。目的是取得大量的,高分辨率的可靠的深部

信息。因为“可靠信息与信息量的不足或缺乏,则是任何数学技巧所无法弥补的”。应当特别指出:①人工源的深部地震探测对地球深部精细结构的研究具有特殊意义,因为这是其他任何地球物理方法与反演技术所无法比拟的,因为它具有最高的分辨率。②当今对深部介质结构和构造及其深层过程的研究必须是详细的,准确的和定量的。

(2) 地球深部结构、物质组成与属性和各圈层之间的耦合:依据地震波场和位场观测,高分辨率的地球深部各圈层的三维精细结构以及层析成像、均衡补偿、热状态和物性成像,综合研究地球内部特异界带(壳—幔边界,低速层、高速层、Moho 界面、壳—幔混合物、软流圈,410km,670km 界面和核—幔边界)和结构的属性、各圈层的物质与能量交换、耦合和横向不均匀性及各向异性。

(3) 物理和数学模拟、高温高压实验研究物质状态和属性:通过物理与数学模拟研究深部介质(含幔源包体及火山喷发物)的物理和化学性质,物质流变、熔融、相变、流体作用、状态方程、晶体结构和矿物相稳定性及成因。在众多要素约束下,进行地球深部结构,深部物质运移和构造力系作用的模拟,并探讨成岩和成矿的深层要素。

(4) 建立地球深部研究中新一代的理论体系和反演方法:地震波场运动学和动力学参数相结合的反演理论与方法;如弹性波场波动方程反演,波形与非线性波形反演及联合反演等。为深化对地球深部介质性质和状态的认识,并对深部物质上涌、地幔对流“猜想”进行检验,必须深入研究地震波在各向异性、横向不均匀性和非线性介质中的传播理论、方法与检测技术。在此基点上,建立新一代地球深部研究的正、反演计算软件包和数据库系统。以资取得更加逼近于地球内部深层动力过程的定量判据。

(5) 地球内部与资源、灾害、环境变迁和全球变化:深部物质上涌,火山喷发,陨石坠落,地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境,板内块体边界场效应,成矿与成岩过程,地—气与海—气作用,地球内部磁场变化和倒转、生物演化以及日地关系等对环境和全球变化的制约应有有机地进行一体化研究。在对地球环境的研究中,应当是四维的,而且必须包括大气空间、海洋、地球内部和地史进程中的演化。

(6) 地球内部各圈层的耦合与地球动力学:洋壳和陆内俯冲板片的作用和深层动力过程及演化是地球深部研究的一个新起点。因而必须深化对俯冲

带与大洋中脊,造山带与沉积盆地,大陆伸展与裂谷作用,地幔热柱与地幔对流,各圈层物质的能量、质量和动量传输过程与流体作用的研究。通过它们的运动行为和力源机制,水平力系与垂直力系的控制、交错与大陆生长、裂解及拼合,以发现新的力源,并建立起有支撑力的新的动力学模型。

(7) 地球物理场的综合研究与大地构造和块体边界场效应:地球内部的沉积建造,壳—幔结构,核—幔边界及地核的结构和动力学机制对资源、灾害和环境有着一定的制约。为此石油与天然气和金属与非金属矿产资源的形成、演化与聚集均为深层动力过程所控制。造山带与盆地、高原形成与演化,大陆伸展与裂谷,深层物质的运移与地震的“孕育”、发生和发展的研究占有重要地位。同时必须考虑深部流体的作用与深层热状态。为此,新的理论、方法与新的物理参量的提出和模型的建立在科技创新中十分重要,而综合研究确是关键。

(8) 地球物理学的应用与开拓:主要指在工程建设、军事和有关领域的扩大应用与新领域的开辟。

(9) 数字地球内部与动力学:以地球内部圈、层结构、物质组成与物理—力学属性为本领域数字地球科学的基础,利用信息技术、空间技术、网络技术高科技,且天地一体化,以快速获取、处理和传输地球内部数据、图像和具广阔应用价值的数字和信息载体。① 制定数字地球中地球内部与动力学的国家规划,相关政策和标准;② 尽快建设数字地球内部与动力学平台和应用系统;③ 尽快建立“数字地球内部与动力学”研究与开发中心;④ 全面实现地球内部和动力学数据共享、知识挖掘和对比研究;⑤ 纳入国家“十五”计划。

(10) 具有典型意义的地区和东亚动力学:① 典型构造区的对比研究:A. 青藏高原(被誉为世界屋脊或地球第三极)与南极和北极的“三极”对比研究;B. 中国东部郯庐深大断裂带与其南、北延伸和太平洋东海岸圣安德列斯大断裂的对比研究;C. 南北构造带的南伸与北延和地震与构造活动动力学效应;D. 深部构造交汇区(点)的深部特征。② 重要构造界带的地球物理边界场效应和深层动力过程:A. 扬子与华南块体边界;B. 华北与扬子块体边界;C. 青藏高原与滇西特提斯构造带;D. 25°~26°N 东西向深部隐伏构造带的探索;E. 中国东部 NNE 向重力异常带的深部物质运移与作用。③ 造山带与盆地的耦合和其深层动力过程:A. 天山造山带与深层动力过程;B. 燕山造山带与深层动力过

程;C. 秦岭—大别造山带与深层动力过程;D. 喜马拉雅造山带与深层动力过程。④ 板内及板缘的地球动力学研究:A. 西太平洋与欧亚大陆的耦合与动力学;B. 东亚大陆及邻近海域岩石圈结构、分区、俯冲、消减与构造格局及其动力边界场效应;C. 陆内高速板片俯冲和拆离的深层动力过程与机制;D. 板内小室地幔对流和热点的探索及其与造山带和沉积盆地及其各向异性检测。

7 结语

基于以上的论述可见,当今地球科学的发展正进入一个崭新的时代,向纵深发展已成为必然。固体地球科学家应全方位的去揭示地球内部的奥秘,将地球深部介质结构、物质组成、运动与行为、力源与机制以及其耦合视为一个地球科学的系统工程来探索,并用来为人类服务。21 世纪初、中叶在地球深部物理与动力学领域里一定要取得突破性进展,以完成历史赋予我们的神圣职责。

参 考 文 献

- 陈立华,宋仲和,安昌强等. 1991. 中国南北带地壳上地幔三维面波速度结构和各向异性. 地球物理学报, 35(5): 574~583.
- 冯锐,郑书真. 1987. 对华北岩石圈构造的综合研究. 科学通报, 22(2): 1723~1727.
- 高原,郑斯华,周惠兰. 1999. 唐山地区快剪切波偏振图像及其变化. 地球物理学报, 42(2): 228~232.
- 胡家富,张中杰,滕吉文. 1996. 中国内蒙古高原及周边地带地壳与上地幔剪切波三维速度结构. 地球物理学进展, 11(4): 20~33.
- 姜枚,吕庆田,史大年等. 1996. 用天然地震探测青藏高原中部地壳、上地幔结构. 地球物理学报, 39(4): 470~482.
- 孔祥儒,刘士杰,窦秦川等. 1987. 攀西地区地壳和上地幔中的电性结构. 地球物理学报, 30(2): 136~143.
- 李白基. 1994. 昆明地区上地幔地震各向异性. 见:中国固体地球物理学进展. 北京:海洋出版社, 330~338.
- 刘昌铨,嘉世旭. 1994. 山西高原及临汾盆地地壳上地幔速度结构. 见:马宗晋主编. 山西临汾地震研究与系统减灾. 北京:地震出版社, 231~235.
- 刘福田,刘建华,何建坤,游庆瑜. 2000. 滇西特提斯造山带下扬子板块的俯冲板片. 科学通报, 45(1): 75~84.
- 刘启元,陈九辉,李顺成等. 2000. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨. 地球物理学报, 43(3): 356~365.
- 卢德源,李秋生,高锐等. 2000. 横跨天山的人工爆炸地震剖面. 科学通报, 45(9): 982~987.
- 卢造勋,夏怀宽. 1993. 内蒙古东乌珠穆沁旗—辽宁东沟地学断面. 地球物理学报, 36(4): 765~772.
- 宋仲和,安昌强,陈国英等. 1992. 中国西部三维速度结构及其各向异性. 地球物理学报, 35(6): 694~707.
- 滕吉文. 1973. 柴达木东盆地的深层反射波和地壳构造. 地球物理学报, 17(2): 122~136.
- 滕吉文,冯炽芬,李金森等. 1974. 华北平原中部地区深部构造背景

- 及邢台地震(一). 地球物理学报, 18: 255~271.
- 滕吉文, 王国正, 刘道洪. 1975. 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(二). 地球物理学报, 18: 196~207.
- 滕吉文, 王绍舟, 姚振兴等. 1980. 青藏高原及其邻近地区的地球物理场特征与大陆板块构造. 地球物理学报, 23(3): 254~268.
- 滕吉文, 魏斯禹, 李金森, 赵静娴. 1982. 华北平原邢台地震区的上地幔结构与地幔低速层. 地球物理学报, 25: 239~250.
- 滕吉文, 尹周勋, 熊绍柏. 1985a. 西藏高原北部地区色林错—蓬错—那曲—索县地壳结构与速度分布. 地球物理学报, 28(增刊-1): 28~42.
- 滕吉文, 魏斯禹. 1987a. 中国四川攀枝花—西昌(攀西)裂谷的形成、演化及裂谷分类. 大地构造与成矿学, 11: 77~90.
- 滕吉文, 孙克忠, 熊绍柏等. 1987b. 中国东部马鞍山—常熟—启东地带地壳与上地幔结构和速度分布的爆炸地震研究. 地球物理学报, 28(2): 155~169.
- 滕吉文, 孙克忠. 1991. 青藏高原地区的上地幔结构与地幔低速层. 见: 动力大地测量开放研究实验室年报(1989~1990). 北京: 测绘出版社.
- 滕吉文. 1994a. 全球地球科学大断面与地球动力学(I). 地球物理学进展, 9(1): 40~58.
- 滕吉文. 1994b. 全球地球科学大断面与地球动力学(II). 地球物理学报, 9(2): 1~16.
- 滕吉文, 刘福田, 全幼黎等. 1994c. 中国西北造山带与沉积盆地地区的地壳和地幔的地震层析成像. 见: 中国固体地球物理学进展. 北京: 海洋出版社, 66~80.
- 滕吉文, 吴华, 王爱武, 孙小丽. 1994d. 中国东南陆缘地带岩石圈结构和动力学. 中国科学(B辑), 24(8): 566~875.
- 滕吉文, 尹周勋, 刘洪兵等. 1994e. 青藏高原岩石层三维和二维结构与大陆动力学. 地球物理学报, 37(增刊): 117~130.
- 滕吉文, 张中杰, 杨顶辉等. 1995. 中国东部大陆和边缘海域岩石圈结构与板块运动. 见: 地球与空间科学观测技术进展. 北京: 地震出版社, 283~296.
- 滕吉文, 张中杰, 张秉铭等. 1996. 青藏高原地体划分的地球物理标志研究. 地球物理学报, 39(5): 629~641.
- 滕吉文, 张秉铭, 胡家富, 温一波. 1997a. 地震孕育的深部介质和构造环境. 中国地震学研究进展, 12(3): 238~265.
- 滕吉文, 张中杰, 张秉铭等. 1997b. 渤海地球物理场与深部潜在地幔热柱的特异构造背景. 地球物理学报, 40(4): 468~480.
- 滕吉文, 张中杰, 王光杰, 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): 481~494.
- 滕吉文, 张中杰, 王光杰等. 2000a. 地球深部介质结构和深层过程与地震各向异性及其今后的任务. 长春科技大学学报, 30(增刊): 1~9.
- 滕吉文, 张中杰, 胡家富, 王光杰. 2001. 中国华南大陆及陆缘地带的瑞利波频散与剪切波三维速度结构. 地球物理学报, 44(5): 663~677.
- 滕吉文, 张中杰, 白武明等. 2002. 岩石圈物理学. 北京: 科学出版社.
- 王椿镛, 王贵美, 林中洋等. 1993. 用深反射地震方法研究邢台地区地壳细结构. 地球物理学报, 36(4): 445~452.
- 王椿镛, 张先康, 吴庆举等. 1994. 华北盆地滑脱构造的地震学证据. 地球物理学报, 37(5): 613~621.
- 王椿镛, 张先康, 丁志峰等. 1997. 大别造山带上部地壳结构的有限差分层析成像. 地球物理学报, 40(4): 495~502.
- 魏斯禹, 滕吉文, 王谦身, 朱志文, 刘绍成. 1990. 中国东部大陆边缘地带的岩石圈结构与动力学. 北京: 科学出版社.
- 吴宜志, 吴春玲, 卢杰, 吴杰. 1995. 利用深地震反射剖面研究北祁连—河西走廊地壳细结构. 地球物理学报, 37(增刊): 29~35.
- 熊绍柏, 金东敏, 孙克忠等. 1991. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征. 地球物理学报, 34(1): 55~63.
- 熊绍柏, 赖明惠, 刘宏宾等. 1993a. 屯溪—温州地带岩石圈结构与速度分布. 江南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 250~256.
- 熊绍柏, 郑晔, 尹周勋等. 1993b. 丽江—攀枝花—者海地带二维地壳结构及其构造意义. 地球物理学报, 36(4): 434~444.
- 徐佩芬, 刘福田, 王清晨等. 2000. 大别—苏鲁碰撞造山带的地震层析成像研究——岩石圈三维速度结构. 地球物理学报, 43(3): 376~385.
- 杨宝俊, 刘财, 杨平华等. 1999. 用近垂直地震反射方法研究莫霍界面的特征与成因. 地球物理学报, 42(5): 617~628.
- 姚虹. 1988. 利用地震体波计算攀西构造带的Q值及其分布特征. 见: 中国攀西裂谷文集. 北京: 地质出版社, 195~198.
- 袁学诚, 左恩, 蔡学林, 朱介寿. 1989. 华南板块岩石圈构造与地球物理. 见: 八十年代中国地球物理学进展. 北京: 学术书刊出版社, 243~249.
- 曾融生, 陆涵行, 丁志峰. 1988. 从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因. 地球物理学报, 31(4): 383~398.
- 曾融生, 孙为国. 1991a. 青藏高原及其邻近地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): 543~564.
- 曾融生, 朱露培, 何正勤等. 1991b. 华北盆地强震的震源模型兼论强震和盆地成因. 地球物理学报, 34: 288~301.
- 曾融生, 朱介寿, 周兵等. 1992. 青藏高原及其东部地区的三维地震波速度结构与大陆碰撞模型. 地震学报, 14(增刊): 523~533.
- 赵俊猛, 刘国栋, 卢造勋等. 2000. 天山造山带与准噶尔盆地壳幔过渡带及其动力学含义. 中国科学(待发表).
- 郑斯华, 高原. 1994. 中国大陆岩石层的方位各向异性. 地震学报, 16(2): 131~140.
- 郑晔, 滕吉文. 1994. 中国东部隋县—启东地带上地幔结构研究. 地球物理学报, 37(4): 553~541.

References

- Chen Lihua, Song Zhonghe, An Changqiang et al. 1992. Three dimensional shear wave velocity and anisotropy of crust and upper mantle in the China north—south earthquake belt. Acta Geophysica Sinica, 35(5): 385~392 (in Chinese with English abstract).
- Feng Rui, Zheng Shuzhen. 1988. A comprehensive study on lithospheric structure in North China. Chinese Science Bulletin, 22(2): 1723~1727.
- Gao Yuan, Zheng Sihua, Zhou Huilan. 1999. Polarization patterns of fast shear wave in Tangshan region and their variations. Acta Geophysica Sinica, 42(2): 228~232 (in Chinese with Eng. abstr.).
- Hirn A, Lepine J C, Jobert G, et al. 1984. Crustal structure and variability of the Himalayan border of Tibet. Nature, 307: 23~25.
- Hu Jiafu, Zhang Zhongjie, Zhang Hui, Teng Jiwen. 1996. The 3-D shear wave velocity structure of lithosphere beneath the Plateau of Neimongol (Inner Mongolia) and its adjacent regions of China. Progress in Geophysics, 11(4): 20~33 (in Chinese with Eng. abstr.).
- Jiang Mei, Lü Qingtian, Shi Danian, et al. 1996. The study on the structure of crust and upper mantle with natural earthquakes on central Tibetan plateau. Acta Geophysica Sinica, 39(4): 470~

- 481(in Chinese with Eng. abstr.).
- Kong Xiangru, Liu Shijie, Dou Qingchuan, et al. 1987. Electrical conductivity structure in the crust and upper mantle in the region of Panzhihua—Xichang Rift. *Acta Geophysica Sinica*, 30(2):143~157(in Chinese with Eng. abstr.).
- Liu Changquan, Jia Shixu. 1994. Crust and upper mantle in Linfen basin of Shanxi plateau. in: Ma Zhongjin. ed. Study of Earthquakes and Systematic decrease hazard. Beijing: Seismological Press, 231~235(in Chinese with Eng. abstr.).
- Liu Futian, Liu Jianhua, He Jiankun, et al. 2000. Subduction slab under Yangtse Plate of Tethys orogenic zone. *Chinese Science Bulletin*, 45(1): 75~84.
- Liu Qiyuan, Chen Jiuhi, Li Shuncheng, et al. 2000. Passive seismic experiment in Jiashi strong earthquake region, Xinjiang, and discussion on its seismic genesis. *Acta Geophysica Sinica*, 43(3): 364~374(in Chinese with Eng. abstr.).
- Lu Deyuan, Li Qisheng, Gao Rui, et al. 2000. A deep seismic sounding profile across the Tianshan Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 45(9): 982~987.
- Lu Zaoxun, Xia Huaikuan. 1993. Geoscience transect from Dong Ujimqinqi, Inner Mongolia, to Donggou, Liaoning, China. *Acta Geophysica Sinica*, 36(6): 772~782(in Chinese with Eng. abstr.).
- Siver P G, Chan W W. 1991. Shear wave splitting and subcontinental mantle deformation. *Geophy. Geophys. Res.*, 96:16429~16454.
- Song Zhonghe, An Changqiang, Chen Guoying, et al. 1991. Study on 3-D velocity structure and anisotropy beneath the west China from the low wave dispersion. *Acta Geophysica Sinica*, 34(6):694~707(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen. 1974a. Crustal structure of the central part of North China Plain and the Hsingtai Earthquake (I). *Acta Geophysica Sinica*, 17:255~271(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen. 1974b. Deep reflection wave and structure of the Earth crust of the eastern part of Qaidam basin. *Acta Geophysica Sinica*, 17(2):122~135(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Wang Guozheng, Liu Daohong, et al. 1975. Crustal structure of the North China Plain and the Hsingtai Earthquake (II). *Acta Geophysica Sinica*, 18(3):196~207(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Wang Shaozhou, Yao Zhenxing, et al. 1980. Characteristics of the geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai—Xizang Plateau and its neighbouring regions. *Acta Geophysica Sinica*, 23(3): 253~267(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Wei Siyu, Li Jinshen, et al. 1982. Structure of the Upper Mantle and Low Velocity Layer of the Mantle under the Hsingtai earthquake region on the North China Plain. *Acta Geophysica Sinica*, 25(1):58~64(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Xiong Shaobai, et al. 1985a. Structure of the Crust and Upper Mantle Patter and velocity distribution characteristics in the northern region of the Himalayan Mountain region. *J. Phys. Earth*, 33:157~171.
- Teng Jiwen, Sun Kezhong, Xiong Shaobai, et al. 1985b. Explosion seismological study of velocity distribution and structure of the crust and upper mantle from Maanshan to Qidong of the southern parts of China. *Acta Geophysica Sinica*, 28(2):155~169(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Yin Zhouxun, Xiong Shaobai. 1985c. Crustal structure and velocity distribution beneath the Serlin Co—Peng Co—Suo County region in the Northern Xizang (Tibet) Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 28(Supp): 41~52(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Wei Siyu. 1987a. The formation, evolution and classification of the Panzhihua—Xichang (Pan-xi) rift. *Geotectonica Metallogica*, 11(1):77~99(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen. 1989a. Geophysical criteria for resustitating of the Panzhihua—Xichang ancient rift tectonic zone. *Science in China (Series B)*, 32(11): 117~128.
- Teng Jiwen. 1989b. Structure of lithosphere and geodynamic characteristics in North China and its continental margin areas. in: *Developments in Geoscience*. Beijing: Science Press, 29~39.
- Teng Jiwen. 1994a. Global geoscience transects and geodynamics (I). *Progress in Geophysics*, 9(1):40~58(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen. 1994b. Global geoscience transects and geodynamics (II). *Progress in geophysics*, 9(2):1~16(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Liu Futian, Quan Youli, et al. 1994c. Seismic tomography of the crust and mantle under the orogenic belts and sedimentary basins of Northwestern China. in: Chen Yuntai, ed. *Advances in Solid Earth Geophysics in China—in Honour of Professor Zeng Rongsheng's 70th Birthday*. Beijing: Oceanic Press, 66~80(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Wu Hua, Wang Aiwu, et al. 1994d. Lithosphere structure and geodynamics in east southern margin of China. *Science in China*, 24(8):566~575.
- Teng Jiwen, Yin Zhouxun, Liu Hongbing, et al. 1994e. The 2D and 3D lithosphere structure and continental dynamics of Qinghai—Xizang Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 37(Supp. I): 117~130(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Yin Zhouxun, Sun Kezhong, et al. 1994f. The lithosphere and deep internal processes of Xizang Plateau in China. in: *Proceeding of International Symposium on the Kalakorum and Kuntun Mountains*. Beijing: China Meteorological Press, 72~88.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Yang Dinghui, et al. 1996. The study of geophysical criterion for dividing terranes in Qinghai—Xizang Plateau. *Acta Geophysica Sinica*, 39(5):629~641.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Zhang Bingming, et al. 1997a. Geophysical fields and background of exceptional structure for deep Latent Mantle Plume in Bohai Sea. *Acta Geophysica Sinica*, 40(4): 468~480(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Zhang Bingming, Hu Jiafu, et al. 1997b. The research of deep medium and structural environment for earthquake "Pregnancy". in: Chen Yuntai, ed. *Advances in Seismology in China—in Honour of Professor Xie Yushou's 80th Birthday*. Beijing: Seismological Press, 258~265(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Wang Guangjie, et al. 1999. The deep internal dynamical processes and new model of continental—Continental collision on Himalayan collision orogenic zone. *Acta Geophysica Sinica*, 42(4): 481~491(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Wang Guangjie, et al. 2000a. Deep structure of Earth's interior deep processes with seismic anisotropy

- and the tasks for the period ahead. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(supp.)1~9(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Wang Guangjie, Zhang Zhongjie, Hu Jiafu. 2000b. The 3-D structure of shear wave in South China and the southward extension of Tancheng—Luijiang fault. *Chinese Science Bulletin*, 46(4):284~289.
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Hu Jiafu, et al. 2001. The Rayleigh wave dispersion and three dimensional velocity structure in continent and its margin of southeast China. *Acta Geophysica Sinica*, 44(5): 663~677(in Chinese with Eng. abstr.).
- Teng Jiwen, Zhang Zhongjie, Bai Wuming, et al. 2002. *Physics of lithosphere*. Beijing: Science Press.
- Wang Chunyong, Wang Guimei, Lin Zhongyang, et al. 1993. A study on fine crustal structure in Xingtai earthquake area based on deep seismic reflection profiling. *Acta Geophysica Sinica*, 36(4): 445~452(in Chinese with Eng. abstr.).
- Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Ding Zhifeng, et al. 1997. Finite difference tomography of Upper Crust structure in Dabie Shan orogenic belt. *Acta Geophysica Sinica*, 40(4): 495~502(in Chinese with Eng. abstr.).
- Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Wu Qingju, et al. 1994. Seismic evidence of detachment in North China basin. *Acta Geophysica Sinica*, 37(5): 613~621(in Chinese with Eng. abstr.).
- Wei S Y, Teng J W. 1993. Lithosphere structure and geophysical field. in: Xu Jiawei, ed. *Tancheng—Luijiang Wrench Fault System*. John Wiley & Sons Ltd. , 149~156.
- Wei Siyu, Teng Jiwen. 1989. A preliminary study of the relationship between the Crust and top structure of the Upper Mantle in several regions in China. *Earthquake of China*, (4): 567~575(in Chinese with Eng. abstr.).
- Wei Siyu, Teng Jiwen, Wang Qianshen, et al. 1990. *Lithosphere Structure and Geodynamics in Continental Margin of East China*. Beijing: Science Press.
- Weng Shijie, Chen Hushen, Zhou Xueqing, et al. 1990. Deep seismic probing of continental crust in the lower Yangtze region Eastern China. *Tectonophysics*, 173(4): 553~541.
- Wu Xuanzhi, Wu Chunling, Lu Jie, et al. 1995. Research on the fine crustal structure of the northern Qilian, Hexi Corridor by deep seismic reflection. *Acta Geophysica Sinica*, 38(supp. II): 29~35(in Chinese with Eng. abstr.).
- Xiong Shaobai, Jin Dongmin, Sun Kezhong, et al. 1991. Some characteristics of deep structure of the Zhangzhou geothermal field and it's neighborhood in the Fujian Province. *Acta Geophysica Sinica*, 34(1): 55~63(in Chinese with Eng. abstr.).
- Xiong Shaobai, Lai Minghui, Liu Hongbing. 1993a. Lithosphere structure and distribution of velocity in Tunxi—Wenzhou region. in: *Lithosphere structure and Geological evolution in continent of east southern part of China*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 205~257(in Chinese with Eng. abstr.).
- Xiong Shaobai, Zheng Ye, Yin Zhouxun, et al. 1993b. The 2-D structure and its tectonic implications of the crust in the Lijiang—Panzhihua—Zhejiang region. *Acta Geophysica Sinica*, 36(4): 434~444(in Chinese with Eng. abstr.).
- Xu Peifen, Liu Futian, Wang Qingchen, et al. 2000. Seismic tomography beneath the Dabie—Sulu collision orogenic 3-D velocity structure of lithosphere. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(3). 376~384(in Chinese with Eng. abstr.).
- Yang Baojun, Liu Cai, Yang Pinghua, et al. 1999. The study of Moho characteristics and formation by nearly vertical seismic reflection method. *Chinese Journal of Geophysics* 42(5): 628~638(in Chinese with Eng. abstr.).
- Yao Hong. 1988. Q value calculated by seismic body wave and its distribution in tectonic zone. in: *Contribution to Panzhihua—Xichang Rift, China*. Beijing: Geological Publishing House, 195~198(in Chinese with Eng. abstr.).
- Zeng Rongsheng, Lu Hanxing, Ding Zhifeng, 1988. Seismic refraction and reflection profiles across Tangshan epicentral region and their implication to seismogenic Processes. *Acta Geophysica Sinica*, 31(4): 383~398(in Chinese with Eng. abstr.).
- Zeng Rongsheng, Sun Weiguo. 1991a. Seismicity and focal mechanism and discussion of material flow toward the east in Qinghai—Xizang Plateau and its neighbor regions. *Acta Seismological Sinica*, 14(Supp.):543~564(in Chinese with Eng. abstr.).
- Zeng Rongsheng, Zhu Lupei, He Zengqin, et al. 1991b. A seismic source model of the large earthquakes in North China extensional basin and discussions on the genetic processes of the extensional basin and earthquakes. *Acta Geophysica Sinica*, 34(3): 288~301(in Chinese with Eng. abstr.).
- Zeng Rongsheng, Zhu Jieshou, Zhou Bing. 1992. 3-D velocity structure and continental dynamics in Qinghai—Xizang Plateau and its east region. *Acta Seismological Sinica*, 14(supp.): 523~533(in Chinese with Eng. abstr.).
- Zhao Wenjin, Nelson K D. 1993. Deep seismic reflection evidence for continental under thrusting beneath Southern Tibet. *Nature*, 366, 557~559.
- Zheng Sihua, Gao Yuan. 1994. Azimuthally of continental lithosphere in China. *Acta Seismological Sinica*, 16(2):131~140(in Chinese with Eng. abstr.).
- Zheng Ye, Teng Jiwen. 1994. Study of fine structure of the upper mantle in the Shuixian—Qidong area at east part of China. *Acta Geophysica Sinica*, 37(4): 553~558(in Chinese with Eng. abstr.).

Deep Structure of the Earth, Deep Dynamic Process and Leading Direction in China

TENG Jiwen

Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China

Abstract

The study of deep structure and tectonics of the Earth and continental dynamics occupies an important position in the geophysical field. Earth's interior is a formational and evolutionary site of resources and energy

sources and a place of origin of earthquake hazards. It has involved progress and achievements of many international disciplines, thus ceaselessly deepening the understanding of the earth itself, especially the exchange of substance and energy and the dynamic process within the spheres and layers of the Earth's interior. Based on the review of major achievements in the study of deep structure and tectonics in China during the 20th century, particularly in the latter half of the 20th century, and the global trend in this field, this paper discusses the leading direction of the development in the early and middle 21st century and sets forth some strategic issues.

This paper focuses the following six problems: (1) The aim, theme and objective of the research on the deep structure of the Earth and continental dynamics; (2) The complicity of the crust and upper mantle disclosed by deep seismic sounding; (3) Large detachment structures in the lithosphere and the deep environment for the "gestation" of earthquakes; (4) Distribution of interior velocity and anisotropy; (5) Earth's deep structure, tectonics and continental dynamics; (6) Focal points of the development strategy for the study of Earth's interior and continental dynamics in the early and middle 21st century.

Key words: Deep structure of the Earth, detachment structure, anisotropy, deep process, continental dynamics
