

20 世纪地球物理学的重要成就 和 21 世纪的发展前沿

滕吉文

(中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100101)

摘 要 20 世纪是地球物理学取得辉煌成就的重要历史时期。在这关键性的百年里实施了一系列大型且具全球性的研究计划。21 世纪必将在对地球本体的认识和解决水资源、矿产资源、自然灾害和环境(包括空间环境)方面继续作出新的重大贡献。只有深入研究地球内部物质与能量的交换,不同圈层的耦合及其深部动力过程才能深入探索地球系统的发展。为此,文中讨论三方面的问题:(1)地球物理学的发展进程及其战略意义;(2)20 世纪地球物理学领域主要的重大成就;(3)21 世纪上、中叶地球物理学的发展前沿和导向。

关键词 地球物理学;地球内部结构;圈层耦合;板块构造;资源与能源;地震活动与地震预报;深部动力过程

中图分类号 P3 **文献标识码** A **文章编号** 1005-2321(2003)01-0117-24

0 前言

地球科学的最终目标是了解地球本体和其他行星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、定量的概念性预测模式,建立行星地球科学的整体理论^[1]。

地球物理学是地球科学中的一门新兴学科,也是人类借以深化认识地球本体、地球内部结构及其深层过程极为重要的途径和“钥匙”。它的研究范围涉及地壳、壳-幔边界、地幔、核-幔边界(含 D'层)、地核,尤其是岩石圈和软流层中所发生的各种物理现象、成因及物质运移过程。除地球内部外,还有必要涉及大陆、海洋和宇宙空间。

随着地球科学的发展,人们对地球表层及浅部介质结构和属性的研究已远不能满足生产和社会发展

的需求,迫使地球科学向纵深挺进。岩石圈是人类居住、获取各种资源、能源、改造和利用的重要场所,是地球科学整体发展的基础和生长点^[2]。岩石圈物理学与动力学在近 30 a 来积累了大量的资料,得到了不少新认识、新概念和新理论,更重要的是提出了一系列的新问题。因此动摇了一些传统的概念,触及了一些人们以前尚不敢触及的领域,并沿着创新的方向迅速发展。

基于地球物理学是一门涉及地球内部、大陆、海洋和宇宙空间的边缘科学。在已经过去的 20 世纪完成了一系列大型的全球研究计划,不仅深化了对地球本体的认识,而且为资源、能源、灾害和环境变迁提供了形成、分布与发展的深层过程和空间信息;日地空间物理的研究使得人们的视野扩大到宇宙(它是地球系统最外的圈层),极大地增强了对地球整体研究的思维与导向。不仅推动了深入了解空间和地球(包括大陆和海洋)以及生态环境之间的耦合关系,而且也加深了对人类生存空间、社会进步与经济繁荣及其可持续发展间关系的认识,同时加深了对固、气、液态物质组构从地核到宇宙立体空间的认识。

地球物理学在中国的现代化建设中起到了重要作用,在世界地球科学的发展中占有重要地位。

21 世纪的地球物理学必将担负起地球科学中一

收稿日期 2002-11-20;修订日期 2002-12-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40074020);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-C09)

作者简介:滕吉文(1934—),男,1962 年于前苏联科学院大地物理研究所研究生毕业,并取得数学-物理学副博士学位,现为研究员,中国科学院院士,主要从事地球物理学研究。E-mail: jwting@mail. c-geos. ac. cn

系列重大科学问题的先导,这是因为在地表所见到的—切地球物理、地球化学和地质现象,以及生物演化、环境变迁、全球变化和海洋的形成与演化等等必然地取决于地球内部的物质与能量的交换与其深层动力过程。为此,地球物理学必须深化对地球本体的认识,量化研究圈层耦合和深部物质状态及物质的错综结构,为水资源、矿产资源与能源、地震灾害和环境(包括空间环境)问题做出贡献,并成为更高效地支撑人类社会和经济可持续发展的科学砥柱。

应当清晰地认识到,20世纪是地球物理学发展的关键性百年,并为21世纪的有关重大科学领域或方面的突破做出了理论上和方法上的准备,为人类和地球科学的飞跃作出更加辉煌的贡献!

1 地球物理学的迅速发展进程及其战略意义

地球物理学是20世纪迅速发展起来的重要边缘学科之一。特别是近20年来,地球物理学的研究以其全球整体性的思路,广泛应用于宇航观测、大气层中的航空测量、地表观测以及深入地下数十km的观测系统,采集了的大量的高精度信息,日益显示出其在国民经济建设、国家安全体系及人民生活中的巨大作用。鉴于这些方面的原因,早在20世纪50年代,在周恩来总理的亲切关怀下,地球物理学、半导体、核技术等学科被列为当时高等教育紧急设置的5个新专业之一。

1.1 在经济发展与建设中的作用

当今社会文明的发展在很大程度上是建立在开发和利用地球资源的基础上,因此大多数国家都将资源的勘探、开发与合理利用列为经济建设中的首要问题之一。

在重大工程建设方面,如长江三峡水库及黄河小浪底电站的坝址选择、基岩体评价、堤坝隐患的勘察(如近年长江洪水中的“管涌”等),治理都离不开地球物理提供的基底稳定性和构造背景。此外还为陆地和—水下隧道的开挖,地下国防工程建设提供技术保障。在核爆炸与核污染监测、文物、古墓的勘查等方面也提供了必要的有效技术手段。近年来又在环境污染的监测方面,特别是城市环境污染、活断层的勘查与监测等方面形成一个新的应用领域。

1.2 在社会发展中的地位

人类社会—发展面临的问题很多,减灾、环境和能

源问题被联合国列为榜首,均与地球物理学的发展密切相关。

90年代是国际减轻自然灾害的10a,水灾及地震是危及人类生命及物质文明成果最为严重的自然灾害。尤其20世纪末叶以来大规模的强烈地震给社会留下了难以忘怀的影响(如云南丽江地震、台湾集集地震、土耳其地震等)。地震预测是现代科学中最困难而又最为迫切需要解决的问题之一。据有关方面透露,在灾害频繁发生的年份,我国由灾害造成的损失高达国民生产总值的1/6。虽然在20世纪内地震问题未能彻底解决,但由于地球物理学的发展和进步,地震预测研究已向实用化迈进,并显现出了可喜的前景。地震现象属于自然界的突变现象,即一个系统从一种稳态经过极短暂的失稳运动发展为另一种稳态,其中失稳态的时间尺度可能只有几分钟,来不及观测。如果把时间尺度放宽到几个月乃至几年来研究大陆地震活动在空间和时间上的不均匀性规律以及地球内部热物质运移的本质和地球自转的辅助效应等,则可以进行板内地震的中期预报,近来地球物理学家还提出了减轻地震灾害的新方案。此外,对岩体滑坡、泥石流等均在一定程度上进行了有效的预测和预警。

环境问题近年来也是社会普遍关注的核心问题之一,促进了环境地球物理学这一新领域的诞生。人类赖以生存的环境包括大气圈、水圈和岩石圈,其中核污染、水污染和环境噪音主要都要用地球物理的方法监测。杭州西湖水污染探测的例子很好地说明了这一点。可见,地球物理学在解决人类社会当前面临的共同问题中起到了独特的作用,是促进社会进步不可缺少的一门现代科学领域,并在未来的发展中肩负着重要的历史使命。

1.3 在深化对地球本体认识中的地位

早在远古时期,人类就意识到地球是维系人类生存和社会发展的物质源泉。因此,无论是古希腊的哲学家还是中国的古代先哲,都试图探索地球的形成和结构的奥秘。应当看到,近代地质学的发展对17世纪西欧的第一次工业革命有一定的促进作用。近40a来,面临第二次工业革命的—挑战,科学家们创立了板块构造学说和一系列新的星球探测技术,在日地耦合的研究中取得了长足的发展,地球物理学起了先导作用。这种作用表现在,通过地震和电磁探测发现了位于上地幔的软流层,为活动论的新地球观提供了唯一站得住脚的理论依据,通过全球地热流量的测量

圈定了热的洋脊和冷的消减带,结合古地磁测量和洋壳地磁条带的特征,为海底扩张理论提供了令人信服的佐证,通过全球地震活动性和震源空间分布特征、全球重力、地磁和地热测量,为板块边界的划分和转换断层的识别提供了准确的依据,综合这些全球性地球物理观测的结果,对地球热状态和岩石圈热结构和流变性质提供了新的认识,为一直悬而未决的板块运动驱动机制问题的解决提供了新的依据。

地球电离层、中层大气和臭氧层、太阳风和磁层、载人登月和空间站建立等一系列研究活动的开展及一系列国际间日地物理计划的实施,极大地深化了人类对日地系统整体行为和各種空间现象之间物理联系的认识,推动了监测、分析、研究和空间环境预报一体化的进程,也为利用空间特殊环境造福人类提供了可能^[3]。

1957年的国际地球物理年计划,标志着地球物理学正式进入了先导性学科的行列。60年代的国际地壳上地幔计划、70年代的地球动力学计划和80年代的大陆岩石圈计划和国际日地物理计划与日地能量计划等进一步肯定了地球物理学在地球科学中的地位。因为这些计划的实质,都是把研究的重点从地表转入地球内部,而在地球科学的所有分支之中,只有地球物理学才能为研究地球内部提供直接的信息和资料。90年代以来,地球内部(尤其是大陆岩石圈)仍然是地球科学研究的主题,这是由于80年代实施的大陆岩石圈计划,发现了板块构造学说的一系列困难,以致于一直未能建立起大陆板块构造的运动学和动力学模式。地球科学家已经意识到,地球内部无论是纵向还是横向都具有高度的不均匀性,要阐明大陆岩石圈的结构和演化问题,则必须作长期和巨大的努力。

地球科学的实践和发展表明,只有地球物理学能为研究地球内部与球外空间的结构、物质运移和圈层耦合提供直接的或间接的、量化的并有相当规模和精度的信息,对地球科学发展为现代的精科学体系,对地球动力学的研究提供了极大支持。

从20世纪50年代以来,地球物理学已逐渐成为地球科学中最重要的分支之一。在21世纪地球科学发展中必将成为地球科学中的先导学科。因为,不论是资源、能源、灾害、环境(包括空间环境)和深化对地球整体的认识,均必然地要研究和探索地球内部及外层空间物质与能量的交换、圈层耦合和其深层动力过程。地球物理学的发展体现了物理学、数学、信息科

学等学科向地球科学的渗透,而地球物理学的发展又促进了物理学、应用数学、计算数学、信息科学、电子学及其它应用科学的发展。

从以上分析可以看到,地球物理学不仅在经济建设中具有十分重要的作用,而且已经迅速发展,支持一些高技术的产业部门,为解决能源与资源的勘探、开发和大型水电站建设及国防工程中的难题提供了科学与技术支持。在我国发展地球物理学具有许多有利条件,除我国大陆和海域的独特自然地理位置外,我们具有一支相当优秀的地球物理研究与应用队伍,经过近20 a的改革开放,地球物理的观测仪器设备在总体上已经接近世界先进水平。我们拥有像青藏高原、南北构造带(川西、滇东南)典型的造山带与盆地和西太平洋边缘海域那样独特的岩石圈结构与板内构造,为我国地球物理学家提供了广阔的天然实验室。作为世界上少有的文明古国,我国的史书留下了几千年来大陆地震发生的地点和烈度,以及水、旱灾害等自然现象的不朽记录,为预防灾害研究提供了丰富的史料。我们相信,在21世纪的上、中叶我国的地球物理学必将在总体上进入先进国家的行列,并为人类科学与技术的进步和社会与经济的持续发展做出应有的贡献。

2 20世纪主要的重大成就

随着人类社会生产的发展和需求,人类对地球的认识是从近地表逐渐进入深层,由定性的判别到定量的认识。迄今为止,地球的岩石圈提供了维系人类生命及社会生产的物质来源,因为地球的岩石圈以及与之相邻的壳幔边界、上地幔、软流层、下地幔、核幔边界(D"层)和地球的内外核心乃是地球内部圈层耦合和深层动力过程研究的根本所在。显然,它们即是当今地球科学中最重要的研究内容,同时也是地球物理学的基础研究领域^[4]。在我们对地球物理学进行百年回顾与展望时^[5],清晰地认识到,我们任重而道远。

地球物理学运用物理学的概念和方法,通过观测、实验、理论分析和反演计算,研究与地球有关的物理问题。用物理学方法探测地下资源的介质结构与属性,地震“孕育”的介质与构造环境^[6],深部物质与能量的交换和圈层耦合、地球物质的运动学与动力学和日地耦合响应等,乃是地球物理学主要的研究和探索领域。

科学的发展在总体上或是在哲学上应当服从于

两个要素 (1) 科学发展本身必然要受到自然辩证法则的支配 (2) 科学发展一定要受到在实践中所提出问题的解决、改进和新生长点呈现的驱使。

然而地球物理学在 20 世纪中, 特别是在中、末叶以来发展迅猛, 究其原因可以归结为 (1) 人类繁衍、生息, 科学与技术和社会与经济的高速发展必需为其提供大量的资源和能源 (2) 人们越来越清晰地认识到人类生活和生存的环境、空间与可持续发展必须免受或少受自然灾害的袭击和大型构造运动的影响, 故必须深化对地球本体的认识 (3) 领土纷争、强权占有、经济掠夺、大小战争和国防与国家权益的需求。

由地球物理学发展迅速的几点原因(尽管是尚不完善的) 可见, 在 20 世纪, 特别是近 40 a 来的重大成就大体上可以归结为以下 14 个方面(具有全球性意义的)。当然, 最为突出的成就, 应当说一为地球内部圈层结构, 二为板块构造与动力力学, 三为资源与能源的勘探与开发, 四为空间特殊环境的利用。

2.1 提出了全球范围的地球物理研究计划和规划

这些全球性的行为使得世界各国的科学家必然地卷入了全球性地球物理学研究行列, 如地球物理年, 上地幔计划, 地球动力学计划, 岩石圈计划, 大陆和大洋钻探计划, 地学大断面计划, 国际减灾十年计划, 全球变化计划, 大陆动力学计划, 地球环境模型, 日地物理计划, 地球空间环境计划和日地能量计划等等。这些计划的实施与完成在地球物理学以至整个地球科学领域里均产生了极为深刻的影响^[4], 事实表明 (1) 对全球范围内重要构造地域的沉积建造, 地壳、Moho 界面、地幔盖层、软流层的分布特征、介质的基本物理属性和结构有了一个较全面的认识 (2) 为全球动力学研究, 不同构造域的对比研究和规律性的认识提供了坚实的深层过程与基本要素 (3) 为资源、能源、灾害和环境研究给出了深、浅部的构造格局和包括球外空间在内的耦合网络 (4) 提出了“板块构造学说”, 并对其块体运动和驱动力源进行了探索 (5) 对青藏高原的形成与隆升, 环太平洋地震带与成矿带的展布有了较深入的认识 (6) 为深化认识地球本体和地球科学中的前沿与难题的深入研究提出了一系列尚待探索的科学问题。

2.2 发现了地球内部圈层结构的基本图像

地球内部结构和构造是 20 世纪以来固体地球物理学最为重要的理论基础及研究成果。依其介质的物理学与力学属性或流变学特征确证了地球内部的圈层结构^[7], 即地壳, 上地幔, 过渡带, 下地幔, 外核和

内核; 或岩石圈, 软流圈, 中圈, 流体和固体(图 1)。在这领域里特别是以下几个方面对地球科学的发展做出了重要贡献。

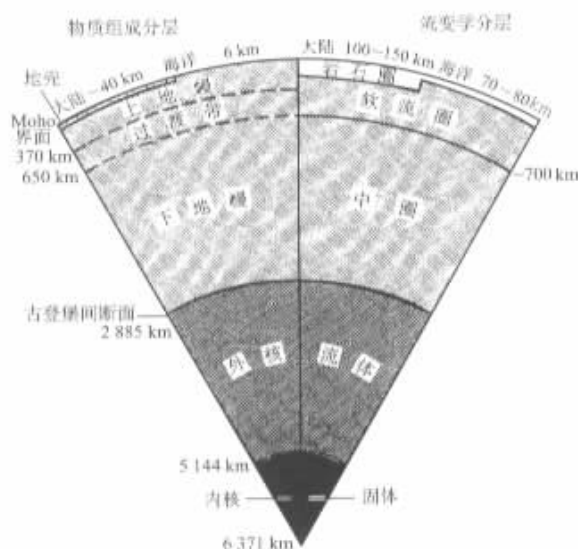


图 1 地球内部的物质组成和流变学特征层圈结构图

(据 P. Kearey 等, 1990)

Fig.1 Comparison between the compositional and rheological layering of the Earth

(1) 走时表的建立为地震学和地球内部物理学的发展起到了举足轻重的作用。1939 年英国的杰弗瑞斯 (H. Jefferys) 和新西兰的布伦 (K. E. Bullen) 基于当时已有的地球内部和地震资料联合编制了全球地震波动走时表^[8], 该表包括直达波、折射波、反射波和转换波, 给出了地球内部各圈层介质的 P 波和 S 波速度分布, 并定名为 J-B 走时表。后来莱曼 (I. P. Lehman) 又依据核爆炸的走时和有关资料对该走时表进行了修正^[9]。1940 年他们又根据地球内部地震波和密度分布, 将地球内部分为 A, B, C, D, E, F, G 七层^[10, 11], 并对每一层的属性行了分析。后来综合利用新的地震体波走时、视速度、地震面波的频散以及地球自由振荡的本征周期等数据, 反演地球内部的速度和密度, 给出了新的地球内部分层结构与特征(表 1), 即分为 A, B (B', B'', B'''), C, D (D', D''), E (E', E''), F 和 G 层^[12]。1967 年美国重新编制了平均 P 波走时表^[13]。基于这一走时表, 便可从各地震台站所观测的地震记录图上识别出来自地球内部不同圈层的地震震相走时(图 2), 进而分析和研究地球内部的介质结构和属性^[14]。特别是对于中、远程地震的震相识别具有特

殊意义。

表 1 新的地球分层

Table 1 New layering of the Earth

区域	深度范围/km	名称	特征
A 层	0 ~ 40	地壳	横向变化很大
B 层	40 ~ 350	上地幔	
B'		盖层	横向变化较大
B''		低速层	速度小
B'''		均匀层	速度较均匀
C 层	350 ~ 650	过渡层	速度梯度大
D 层		下地幔	
D'	650 ~ 2 550		速度梯度变化小
D''	2 550 ~ 2 885		速度梯度近于零
E 层		外核	
E'	2 885 ~ 3 170		不很均匀
E''	3 170 ~ 4 170		较均匀 液态
F 层	4 170 ~ 5 155	过渡层	速度梯度小, 无间断面
G 层	5 155 ~ 6 370	内核	固态

(2) 利用地震面波、体波和自由振荡资料研究地球内部的速度结构。此项研究发展很快, 而且给出了众多的地球模型。由于地球模型多而又不统一, 使研究工作存在一定困难, 并给对模型的评述和使用造成一定的混乱和麻烦。面对这一系列问题 1971 年在 IUGG 莫斯科会议上提出并成立了一个“标准地球模型委员会”, 目的是要建立起一个从地心至地表的标准地球结构模型, 定义主要的参数和主要的间断面, 且要被地球构造的任何研究方面所接受。于 1973 年 IASPEI 会议上决定把“准标地球模型”改为参考地球模型。于是经过大约 10a 工作, 曾经过多次国际学术会议的讨论和修正, 在 1981 年 IASPEI 会议上通过了杰旺斯基 (A. M. Dziewonski) 和安德逊 (D. L. Anderson) 提交的“初步参考地球模型 (PREM) [15]”。基于地球物理学的发展, 观测技术与分辨率的提高和地震学方法应用从 20 世纪初开始陆续发现了地球内部一系列重要的物理界面。1906 年奥尔德海姆 (H. D. Oldham) 通过地震体波的研究, 证实了地球铁核的存在。1909 年南斯拉夫的莫霍洛维奇 (A. Mohorovicic) 在研究近震时发现有一震相, 地震波速度由 6.3 km/s 跳到 8.0 km/s, 这便是地壳和上地幔的分界面 (Moho) [16]。后来在全球各地的人工源深部地震探测中, 证实了这一界面的普遍存在。1912 年美国古登堡 (B. Gutenberg) 提出在 2 900 km 深处存在一个重要界面 [17], 它是液体地核与固体地幔的分界面。1914 年美国巴列尔 (J. Barrell) 求得了地球内部纵波和横波的速度分

布, 并将地球上部划分为岩石圈和软流圈。1936 年丹麦的莱曼 (L. Lehman) 在地震图上识别出 P' 和

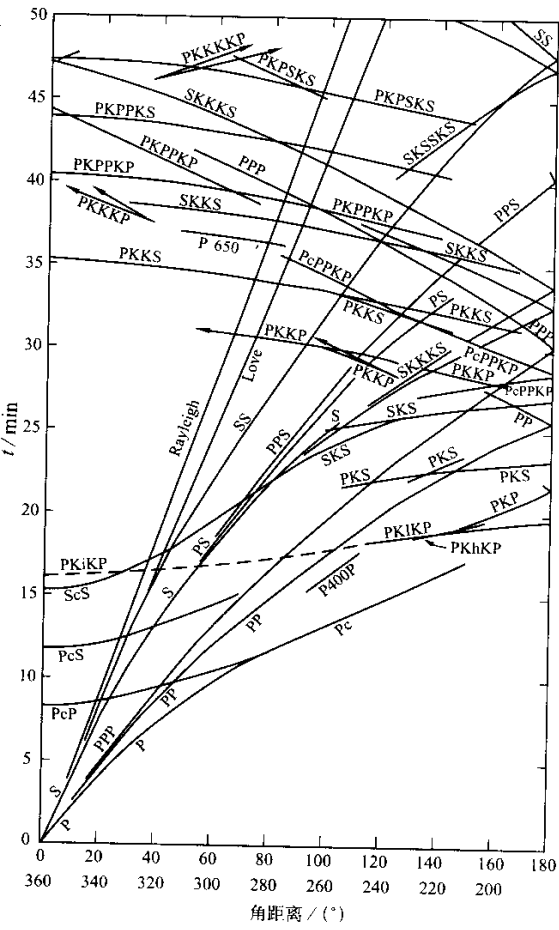


图 2 震源位于地表情况下不同震相的平均走时曲线图 (据 E. Herin 等, 1968)

Fig.2 Average travel times for a surface source for various phases

PK1KP 震相 [18], 证实了地球内部固体内核的存在。在 1940 年在地震波走时表问世的基础上, 提出了地球内部分层模型, 证实了上地幔低速层存在 (图 3) [19]。后来基于人工源和天然源的地震波场效应及地球的自由振荡资料进一步得到验证。同时古登堡、莱曼、杰福里斯和布伦的研究成果取得了一致认识。到了 50 年代, 人们对地球内部的分层结构大致有了一个基本了解。

(3) 加速了地球深层过程的研究。1952 年法国卡尼亚尔 (L. Cagniard) 应用大地电磁感应理论确定了层

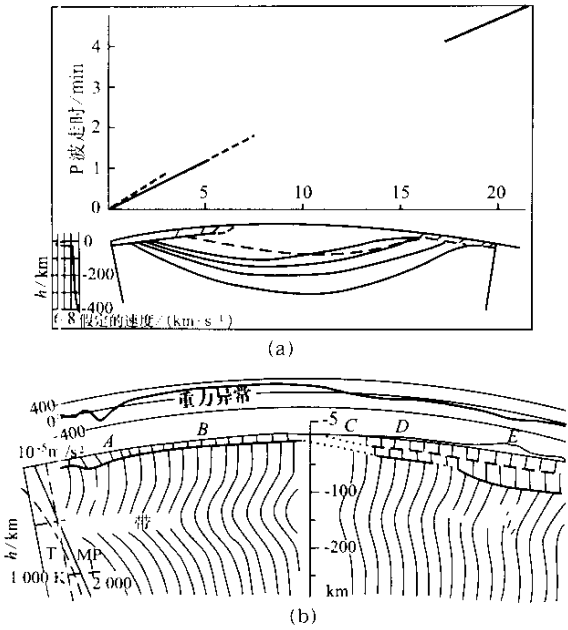


图3 上地幔低速层运动学特征示意图
(据 K E Bullen 等 ,1985)

Fig.3 Sketch map for kinematical characteristics
of low velocity layer in upper mantle
a—P 波射线路径及走时影区 ;b—上地幔顶部构造

状地球内部的电导率^[20] ,二次世界大战以后 ,于 1952 年前苏联科学院院士甘布尔采夫提出的深部地震探测方法(TC3)用以研究地球内部精细结构后^[21] ,从 1957—1958 年国际地球物理年开始 ,地球内部结构的认识与研究开始进入全球化的新阶段。60 年代“上地幔计划” ,70 年代的“地球动力学计划” ,80 年代的“岩石圈计划”的开展 ,对地壳与地幔结构及其横向不均匀性的研究取得了重大的进展 ,特别是宽角反射与折射波法和近垂直反射波法给出了详细的分层和速度结构及界面结构及性质。正是这些深层过程研究奠定了板块构造的基础 ,并通过震源断层面解对板块运移的力源机制进行了有益的探索。

(4)高新技术的应用促进了对地球内部精细结构的研究。70 年代中期以来 ,全球数字地震台网的逐步建立及全球定位系统(GPS)、人卫激光测距(SLR)、甚长基线干涉测量(VLBI)、精密重力测量(包括相对(RG)和绝对(AG)精密重力测量)和干涉

合成孔径雷达(INSAR)等高新技术的应用 ,使人类可以以过去未曾有的精度探测出自地球表面直至地心深处的地球内部结构。半个世纪以来 ,中国以曾融生院士为首的地球物理学家们与世界各国的球物理学家们一道在这一领域做出了重要贡献^[22~25] ,特别是人工源深部地震探测和地震面波与体波以及核爆炸激发地震波场的深部信息应用 ,发现复杂地壳与上地幔为精细的层、块结构(沉积盖层、结晶基底、地壳低

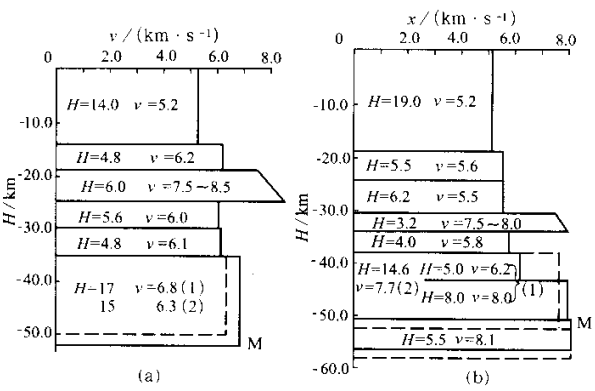


图4 中国西北部分地区地壳与上地幔顶部的精细速度结构
(据曾融生 ,1984)

Fig.4 Fine structure of crust and upper mantle in Northwest China
a—甘肃景泰地区的地壳结构平均模型 ;
b—青海柴达木盆地的地壳结构平均模型

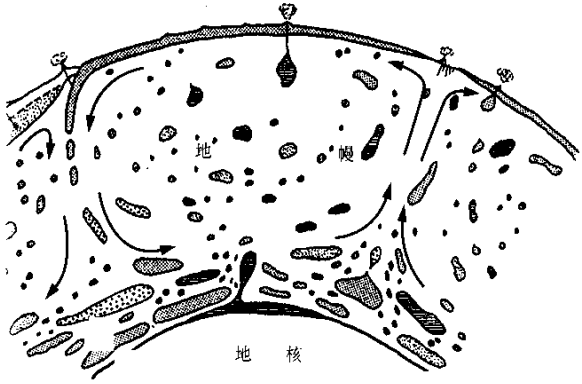


图5 地球内部核-幔边界(CMB)、D''层区的结构与地幔热柱和冷柱的形成与运移示意图
(据 W J Morgan , 1971)

Fig.5 Hypothetical drawing of the thermal and cold plumes pudding model for the boundary between core and mantle , and D'' layer in Earth 's interior

速层、Moho 界面起伏、大型滑脱等)。同时提出在地壳中不仅存在着低速层 ,而且还存在着高速梯度夹层(图 4)和不同产状的断裂 ,发现了特异深部结构及分区 ,提出了壳、幔的层块结构和物质组成模型。美国

加利福尼亚理工学院、哈佛大学和麻省理工学院等的地球物理学家们对地震面波与体波的三维速度结构和对地球物理层析成像(主要是地震层析成像)方法的应用从宏观上揭示了地球内部的结构、物质组成及深层过程,并获得了一系列新认识^[26-27],包括岩石圈的精细结构、地幔盖层、地幔低速层、410 km 间断面、670 km 间断面、核-幔边界(D'层)的全球分布^[28]与动力学效应(图 5, Morgan, J T, 1971);地球内核的各向异性 and 内核的自转速率比外核、地幔和地壳快;对圈层耦合、地磁场起源的发电理论乃至全球变化的响应,以及地幔热柱的发现^[29-30](图 5)等等。显见,核幔边界层(D')是一个动力边界,是深部物质与能量强烈交换的场所,是地幔热柱的源区,而且这里在一定厚度范围内是大尺度不均匀的和各向异性的,当然也是非线性的。

(5)研究壳-幔边界(Moho)结构与属性的成就显著。自莫霍洛维奇于 20 世纪初叶提出壳-幔边界是一个尖锐的一级间断面后,得到世界各地深部地震探测(DSS)结果的证实。通过地震观测识别的 Pn 震相求得上地幔顶部的地震波速度为 7.9~8.2km/s。从此,

Moho 界面(带)的结构和属性的研究一直为地球物理学家们所瞩目,因为它是多形态的,不均匀的和各向异性的。若将各种类型的壳-幔过渡带(界)综合起来,基本上可分为 3 种类型^[31],即一级速度间断面、速度梯度带和高速低速相间的薄层束结构。依据地震反射、宽角反射、折射地震波场、偏振与极性和理论地震图特征还发现 Moho 界面(带)存在冲断排列(或称“鳄鱼”状结构)状结构^[32]。通过波场运动学(走时、波形、速度、结构等)和动力学(频谱、能量、极性和理论地震图等)研究,可以给出在大陆和海域地区的 Moho 界带的介质和构造响应,即为一个厚度 1~5 km,最厚可达 15 km 的过渡带^[33-34](图 6)。这一界带是与深、浅物质交换,重力均衡补偿以及地球内部圈层耦合密切相关的地域。

(6)中国地球物理学家的杰出贡献。中国地球物理学家们在人工源地震深部探测地壳低速层、壳幔边界、深部滑脱构造、地幔盖层和地幔低速层及其属性方面做了大量富有成效的工作,特别是对青藏高原、南北构造带、地震活动地区及东部陆缘地带与海域的地壳与地幔结构和动力学响应的研究是有特

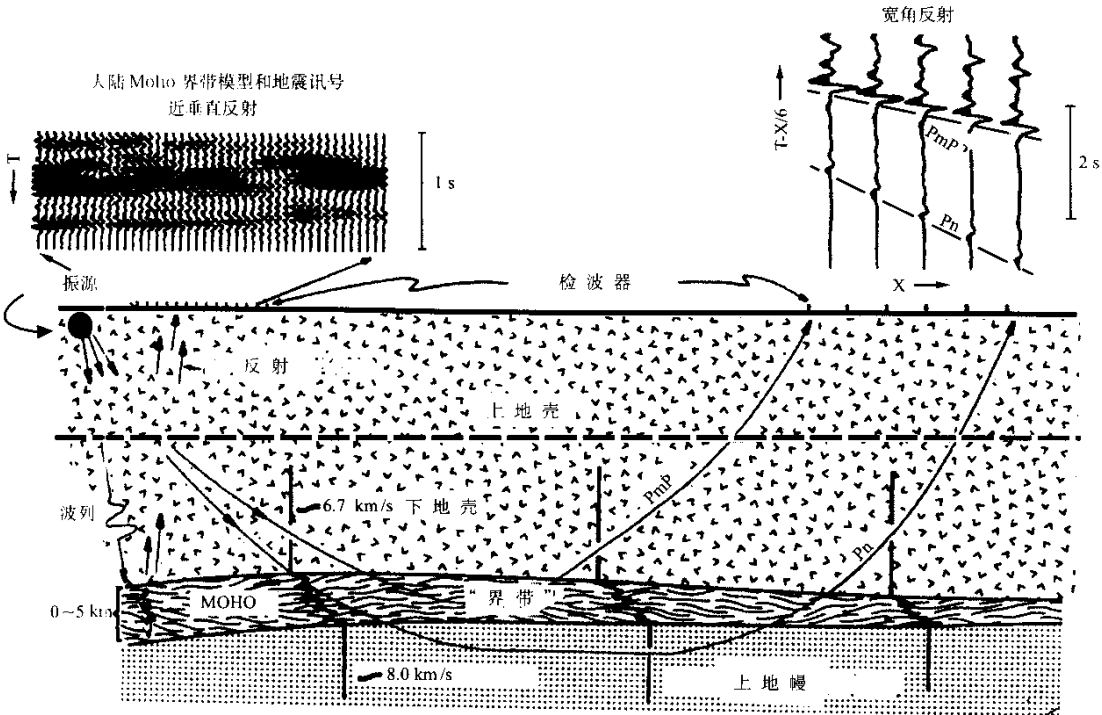


图 6 依据近垂直反射、宽角反射和折射剖面提出的大陆 Moho“界带”性质图解
(据 L M Braille 等, 1986)

Fig.6 Schematic model illustrating the nature of the “boundary zone” of the continental Moho discontinuity from interpretation of both near vertical reflection, wide angle reflection and refraction profile data

色的。对岩石圈、地幔物质运移及其深层过程做出了显著成绩。我国已完成人工源地震深部探测剖面约 5 万余 km,进行了全国性的 1:20 万、1:50 万和 1:100 万的重力和航空磁测,提出了 11 条地学大断面(由中国岩石圈委员会地学断面协调委员会提出,1986)。对板内构造和地体划分的边界场效应方面提出了定量与半定量标志,在地球深部物质运移与深层过程研究方面进行了有益的探索。这些成果在世界地球内部与动力学的研究中占有重要地位(图 7)。

2.3 板块构造与驱动力研究

全球板块构造学说的问世是地球物理学在 20 世纪发展中的重要事件,地球物理学为该学说的建立提供了强有力的多元的定量或半定量科学支撑。

(1) 板块构造的提出及意义。板块构造理论是地球物理学进程中最为重要的科学成就之一,并被誉为“科学革命”来表征岩石圈板块大地构造的作用和意义^[35]。对板块构造研究的重大成果,促成了 1967—1968 年世界六大板块的划分^[36],从而建立了板块构

造的基本框架。经过 70 年代的地球动力学计划和 80 年代的国际岩石圈和大陆动力学等计划的推动,进一步证实了板块构造基本原理的正确性,特别是空间大地测量技术已经精确测定到全球各板块的现今运动速率,古地磁的极移轨迹可以详细地再造板块运动轨迹与演变历史,地震层析图像显示了驱动板块运动的地幔对流和地幔热柱及其在深部物质与能量交换和耦合过程中的动力效应。基于板块构造的地球物理场效应和海陆边缘古老岩石圈物质的新陈代谢,即岩石圈板块似处于运动中的巨大传动带,从而导致了一幕一幕的大洋启闭与大陆离合的演化图像(图 8)。

(2) 板块运移驱动机制的研究。60 年代初建立的世界标准台网(WWSSN)通过对全球范围内的地震定位,对板块学说的建立起到了重要作用。基于以上论述可见,有关板块运移的机制问题十分关键。考虑到全球热流值的分布等因素,当今对地幔对流

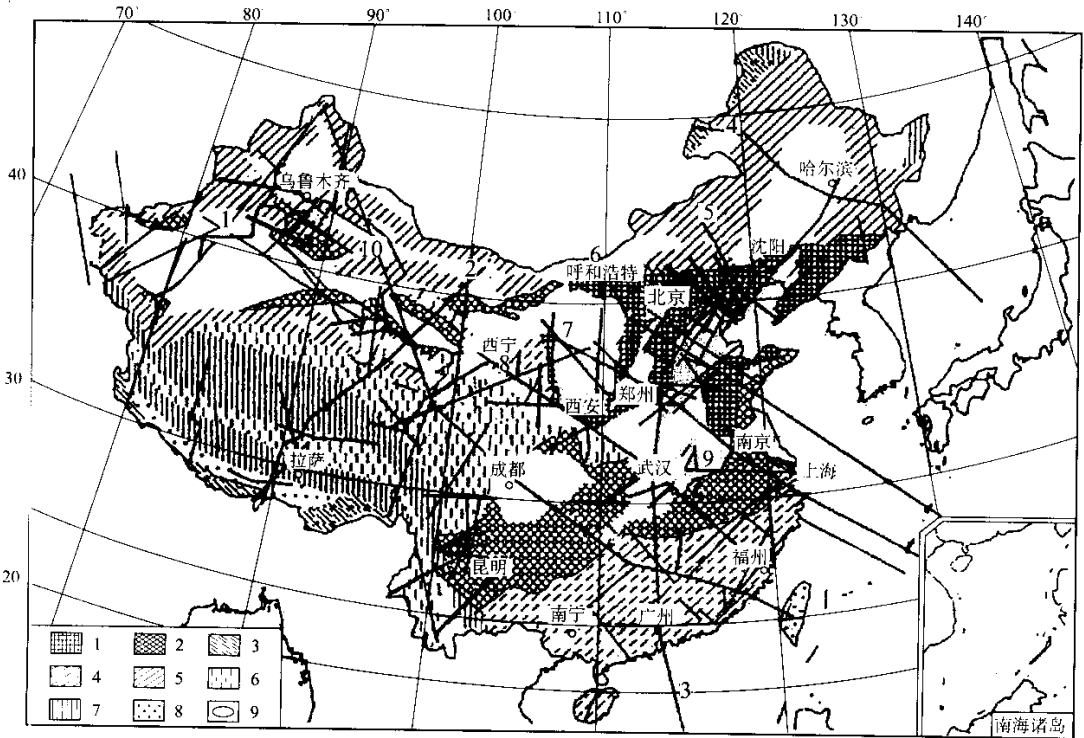


图 7 中国人工源地震深部地震探测剖面分布图
(据彭聪,高锐,2000)

Fig.7 Locations of geoscience transects by DSS of China

1—前古生代(17 亿 a) 2—前古生代克拉通(7 亿 a) 3—兴凯期造山带 4—加里东期造山带 5—海西期造山带;
6—印支期造山带 7—燕山期造山带 8—喜马拉雅期造山带 9—后古生代陆相盆地

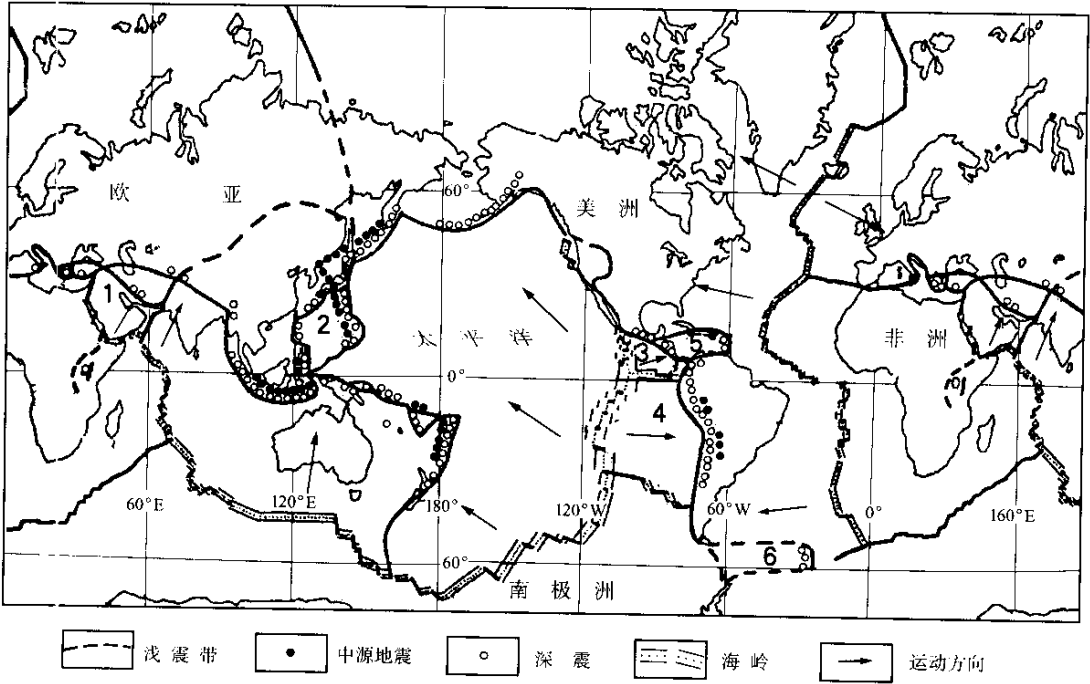


图8 全球板块边界特征与板块分布图

(据 Le Pichon, 1968)

Fig.8 Distribution of boundaries between plates in the World

图中数字为几个小板块,即1—阿拉伯 2—菲律宾 3—科科斯 4—纳斯卡 5—加勒比 6—斯科舍

为板块运动的动力源问题得到较广泛的认同。但是由于地幔内部速度场的不均匀性^[37],故通过密度的横向不均匀性建立了地幔内部物质流动的动力学模型^[38]。这里必须指出,地幔对流仅是一种“猜想”。尽管地幔对流解释了诸多的现象,然而必须看到当今所有的动力学模型均仍有一定的局限性。看来地球动力学模型的建立最终必须从多边界条件约束下的全球对流、基本方程出发。对流是与地球内部物质的热场相关,即与地热梯度相关。关于对流当今认为有两种方式,一为全地幔对流(图9a),二为分两层对流(图9b)。前者将过渡带视为相变边界,故对流环可以穿越,而后者则认为过渡带是一个化学边界,可以阻止穿过它进行对流,即可断流。当今通过全球三维地震层析成像结果表明,地幔热柱可分为两极,而670 km间断面处有可能是小地幔柱的源地,不过至今尚十分缺乏可靠的定量证据。

(3) 中国在板块构造方面的贡献。板块构造说提出后,基于地幔对流、地幔热柱的“发现”,中国地球物理学家致力于板内与板缘板块运动的驱动机制、西太平洋俯冲带和板内俯冲与块体边界场效应的地球物理研究。近半个世纪以来,我国通过重力、地磁、大地

电磁、人工源地震、天然地震等综合研究进行了多方面探索,发现了陆-陆碰撞挤压过渡带^[39],给出了地体划分地球物理标志^[40],并据此把青藏高原划分为7个地体,即柴达木地体,昆仑地体,可可西里—巴颜喀拉地体,羌塘地体,拉萨—冈底斯地体,喜马拉雅地体和恒河平原地体;绘制了地震带和应力场分布特征图,提出了造山带与裂谷带和盆地地区的深部背景;给出了板内边界和陆内俯冲的深部判据及其与构造和资源的关系。在板块“登陆”和板内构造与深部物质运移方面,中国地球物理学家做出了重要贡献。

(4) 困惑。板块构造的提出,对传统的固定论者确为很大的冲击。它基于水平运动的前提给出了一系列块体拼贴与运移的格局,然而当今地幔热柱的呈现,大陆和大洋溢流玄武岩的上涌与展布,对板块构造仍是一个新的挑战。板内构造和陆内俯冲又不能照搬海洋板块构造的已有定则和演化形态。此外,地幔对流尚为“猜想”,理想边界条件下的数值模拟尚难令人信服,以及至今尚提不出一个定量的或半定量的地球物质的运动学和动力学模型等等。显然,这些难题尚有待更多的观测和可靠信息取得,以

资不断深化研究 新力源的发现和板块运动力源机制的探索。

2.4 全球地学断面(GGT)是高层次综合地球物理研究的产物

全球于 20 世纪已完成了 175 条 GGT 断面 ,中国有 11 条参加世界大断面计划。在 GGT 大断面编制过程中是以地球物理学为主导 ;在走廊域(宽 100 km 深抵软流层)内(跨越不同构造单元)进行单一地球物理场的深入研究和多种地球物理场的综合研究与解释 ,所以它是综合地球物理研究的产物^[41,42]。它对构造界带的划分和深层过程的研究有着极为显著的意义 ,并对资源、能源和灾害的深部背景及可能发震地点的预测起着一定的指导作用。通过地学大断面的研究可以深化对以下问题的认识 (1)揭示了地壳与上地幔介质与结构在不同构造单元地域的不均匀性和复杂格局 (2)地体边界地球物理场效应和岩石圈与软流圈的界带及其横向不均匀性 (3)构造活动、地震活动、地热活动和火山活动及其间的相互作用 (4)断裂体系 ,特别是大型水平推覆和滑脱构造的追踪及其大地构造效应 (5)对未来资源、能源、灾害和环境的研究具有一定的指导意义 (6)岩石圈的形成演化、圈层耦合及其深层动力过程 (7)综合研究与模型建立。

2.5 地震活动和地震预测

1906 年英国米尔思(J. Milne)给出了全球地震

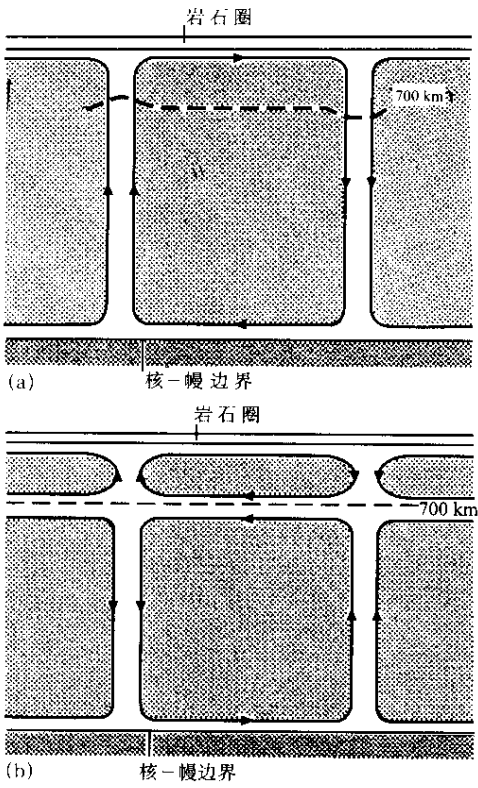


图 9 地球内部物质运移的“地幔对流”可能模型图
(据 M H B Bott , 1982)

Fig.9 Possible influence of the mantle transition zone on the pattern of convection
a—全地幔对流(过渡带为相变边界) ;
b—地幔分层对流(过渡带为化学边界)

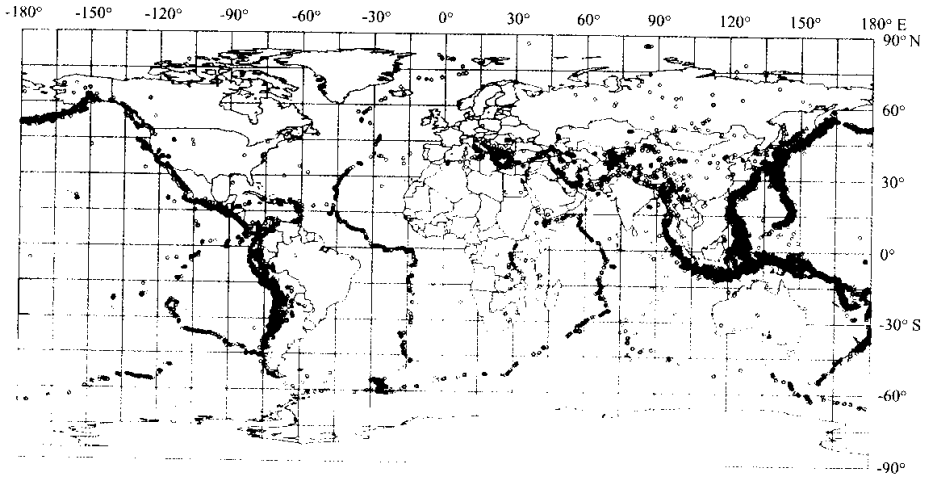


图 10 1977 年 1 月至 1986 年 12 月期间全球地震震中分布
(据 M Barazangi 等 , 1969)

Fig.10 World-wide distribution of epicentres of earthquakes in the period 1971 - 1986
圆圈、方框、三角分别表示震源深度为 0 ~ 70 , 70 ~ 200 及 200 km 以下

震中分布图。近一个世纪以来,全球进行了大量的观测,直至20世纪末叶,其地震分布基本上以环太平洋地震带和地中海—喜马拉雅地震带这两条巨型地震带为主体,形成了海、陆地域的地震震中展布格局(图10)^[43]。

1910年美国里德(Reid)根据1906年旧金山大地震与圣安德烈斯大断层的现场考察,提出地震成因的弹性回跳理论,并成为地震断层说的支柱。拜尔利(B. Byerly)于1926年首次提出震源断层面解的方法^[44],推进了震源物理的研究进展。1944年古登堡和里克特(C. F. Richter)提出了地震频度 N 与震级 M 的经验公式 $\lg N = a + b(8 - M)$,并于1945年提出了面波震级 M_s 的经验公式 $\lg N = a + b(8 - M)$,以后于1945年提出了面波震级 M_s 和体波震级 M_B ^[45]。1964年安艺敬一(K. Aki)引进了地震矩的概念^[46]。1966年前苏联的聂尔谢索夫(H. Г. Нерсисов)提出利用地震波速度变化来预报地震的方法。1973年肖尔茨(C. H. Scholz)提出了解释地震成因的膨胀(扩容)模式^[47]。

1956年,由傅承义、刘恢先两位先辈负责编写的研究计划“中国地震活动性及其灾害防御的研究”纳入1956—1967年国家12年科学技术发展远景规划,其中由国家制定的地震预报研究计划比西方约早10a。1957年,《中国地震资料年表》出版;1960年,《中国地震目录》出版。中国地震历史资料以其时间跨度之大、覆盖范围之广和内容之翔实完整被国际地震学界称为“地震学家的必读文献和宝库”。1966年河北邢台地震后,我国开始大规模的地震预测研究。1975年中国地震学家通过频繁连续的小地震系列和较大范围内地震的发生和发展,对辽宁海城7.3级地震做出成功的临震预报^[48],这次预报尽管是经验性的,但仍然为人类史上第一次具有科学意义和社会效益的成功的地震预报。经过多年的努力,我国已建立、发展和完善了全国、区域和地方三级地震观测系统和地震前兆观测系统,形成了我国自己的地震仪器和前兆测量仪器的设计与生产体系;发展了经验性和综合性的地震预报研究思路 and 渐进式的地震预报工作程序,对地震前兆现象的观测结果进行了系统的审核和研究;建立了京津唐张地震预报试验场和滇西地震观测试验场,对一系列破坏性地震进行了详细的现场调查,积累了丰富的基础资料,对地震波动理论、特别是各向异性介质中地震波的传播理论、地球内部结构、地震构造学等基础问题进行了深入的研究,并提

出了一系列富于创新性的成果^[49~57]。我国地震学家从80年代初开始,致力于通过数字地震学的引进和发展,实现我国地震研究的现代化,并以数字地震观测技术、空间大地测量技术^[58]、地理信息技术等新技术为基础,向地震预测这一世界性的科学难题发起新的冲击。

在中外地球物理学家们一系列工作和研究与探索中可集中表现在以下4个方面(1)研究了地震的全球分带特征,认识了喜马拉雅—古地中海和环太平洋全球地震带的形成与板内地震活动的特异构造背景及其分区与分带特征(2)初步认识了大地震“孕育”、发生与发展的深部介质和构造环境与震源的物理-力学过程和成因(3)防震、减灾、地震灾害评估和地震预测(包括地点、时间与震级)等方面取得了重要进展(4)建立了全球地震数字台网和各个国家的区域数字地震台网,对小地震的监测和控制水平得到明显提高。

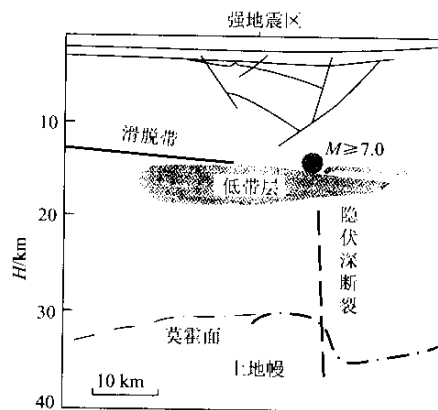


图11 强烈地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境初步参考模型

(据王椿镛等,1994;滕吉文等,1997)

Fig. 11 The preliminary reference model for “pregnant”, occur and development of strong earthquakes

近年来通过深部地震探测,对地震“孕育”发生和发展的深部介质和构造环境进行了研究和探索,提出了深部热物质的运移与上涌、壳幔边界上隆、震源相邻地域低速层和滑脱构造等综合效应都对强烈地震的发生起着重要作用^[59,60]。综合部分强地震的发生与发展的深部背景,提出了一个概念性的参考模型(图11)。

2.6 非均匀性、非线性与各向异性介质中的地震波动理论与计算方法的提出

地震波动的研究最早是建立在无限均匀、完全弹性和各向同性三大假设的原则下进行求解。然而介

质实际上是非常复杂的,随着科学技术的发展,记录质量与精度的提高,使得人们对介质属性、地震波能量的衰减(或 Q 值)和矿物与岩石晶体组构的各向异性以及实际的需要,再不能沿用以前的这些原则。关于各向异性受到人们的重视始于20世纪50年代,早在1964年赫兹(H. H. Hess)便发现大洋岩石圈地震波场的速度各向异性^[61]。70年代英国克郎平(S. A. Crampin)最早发现大陆地区S波分裂和各向异性的存在,并使各向异性研究开始进入“繁荣”时期^[62,63]。1991年,巴布斯卡(V. Babuska)和卡拉(M. Cara)出版了《地球的地震各向异性》一书^[64],全面系统地阐述了地震各向异性的理论和观测结果的解释。该书还对地壳、地幔、地核介质的各向异性进行了较全面的剖析。基于此,我国地球物理学家提出了改进型的斯涅尔定律和多相介质中的地震波动场效应^[65,66]。近年来不论是在石油地震勘探,还是在地壳、地幔和地球核心与地球动力学的研究中均得到了较为广泛的重视,并对地下介质与结构的认识取得了新的发现^[67,68],并正在产生效应。如今各向异性的研究,不论是在介质的电性结构、磁性结构,还是在对矿物的研究方面,已普遍受到重视。在地震波动领域里主要有以下6方面的问题:(1)成层介质中地震波的传播、反射波、折射波、衍射波的波动理论和地震面波频散;(2)非均匀性、非线性和各向异性介质中的地震波动理论与检测;(3)多相介质中地震波的传播与分辨;(4)地球物理反演与算法。在地球物理反演中,一维、二维、三维线性与非线性反演已形成了一个重要分支——计算地球物理学;(5)非均匀性、非线性和各向异性及其反演方法在资源、能源、灾害和环境研究中的响应;(6)沉积建造、地壳、壳幔边界、上地幔、低速层、下地幔、核幔边界(D"层)、地球外核与内核的非均匀性和各向异性。

这里还要指出,当今复杂科学问题在今后的发展中必须给予足够的重视。在当今地震学的研究和探索中,还将模糊数学、分形与混沌及非线性理论应用于地震活动和地震预测的研究^[69,70],如孕震系统的 $1/f$ 噪声行为和地震时空丛集的多重分形及大地震前后地震活动的时空分维特征等。显然,这对揭示孕震动力系统的物理机制和激变前的某些不稳定性有着重要意义。

2.7 资源与能源的地球物理勘探

地球物理勘探是一门观测性的技术科学。自20

世纪中叶前后一系列地球物理勘探方法相继问世,特别是电法勘探、地震勘探、重力勘探、磁法勘探和放射性勘探等^[71~73],在世界范围内推动了科学与技术的进步,保证了20世纪社会和经济的发展与繁荣,为人类找到了大量的金属、非金属矿产和石油、天然气、煤、煤成气及地热等能源(图12)。当今全世界上可供开采的资源约有400种,其中石油与天然气的勘探已成为重点,世界石油工业已有130多年的历史,累计发现45 000多个油气藏,累计采出700多亿t左右的石油。与此同时,还发现了一系列的大气田。水资源的勘探、开发与合理使用迫在眉睫。资源与能源的勘查、开采与利用,对全球各国的科学进步、社会与经济的发展均做出了重要贡献。

我国是世界上最大的发展中国家,20世纪乃是我国经济迅速发展的重要历史阶段,资源的勘探与开发已成为我国国民经济发展中的重要领域。在我国大陆、陆缘和沿海地域存在着一系列的沉积盆地^[74],并有着厚层的沉积建造(图13)。松辽平原的反射地震勘探,为大庆油田的发现做出了先导性的基础工作。后来在大庆油田、胜利油田、大港油田、新疆塔里木油气田区、江汉油田、东海油气田、南海油气田等一系列大型油气田的发现和开发中,地球物理勘探方法,特别是地震勘探的确占有重要地位。在我国的疆域里分布有大量的金属与非金属矿产和石油与天然气能源,这便构成了我国科学与技术、社会与经济迅猛发展的支柱。

(1)不论是在勘探理论与方法、技术和成效中,在全球范围内均取得了重大成就。在勘探方法中,金属与非金属矿产主要为磁法勘探、重力勘探、电法勘探、电磁勘探以及放射性勘探和井下地球物理测量。对于能源则以地震勘探、电法勘探和测井技术为主体。对于水文与工程勘探以电法勘探为主导,辅以核磁共振、重力与磁法勘探。城市与环境勘测则以电法勘探、放射性勘探、重力勘探和磁法勘探为主。当今在石油与天然气的勘探中,发展很快,除一些常规方法外,如各类偏移技术、三维地震技术均在应用,地热勘探、井中VSP测量不仅可以提高井旁横向精细结构的成像精度,而且可以提高垂直分辨率,测井技术已发展为以岩石学、核物理学及声学为基础的比较完善的测井技术系列^[75,76]。

(2)偏移技术得到广泛发展。20世纪70年代前

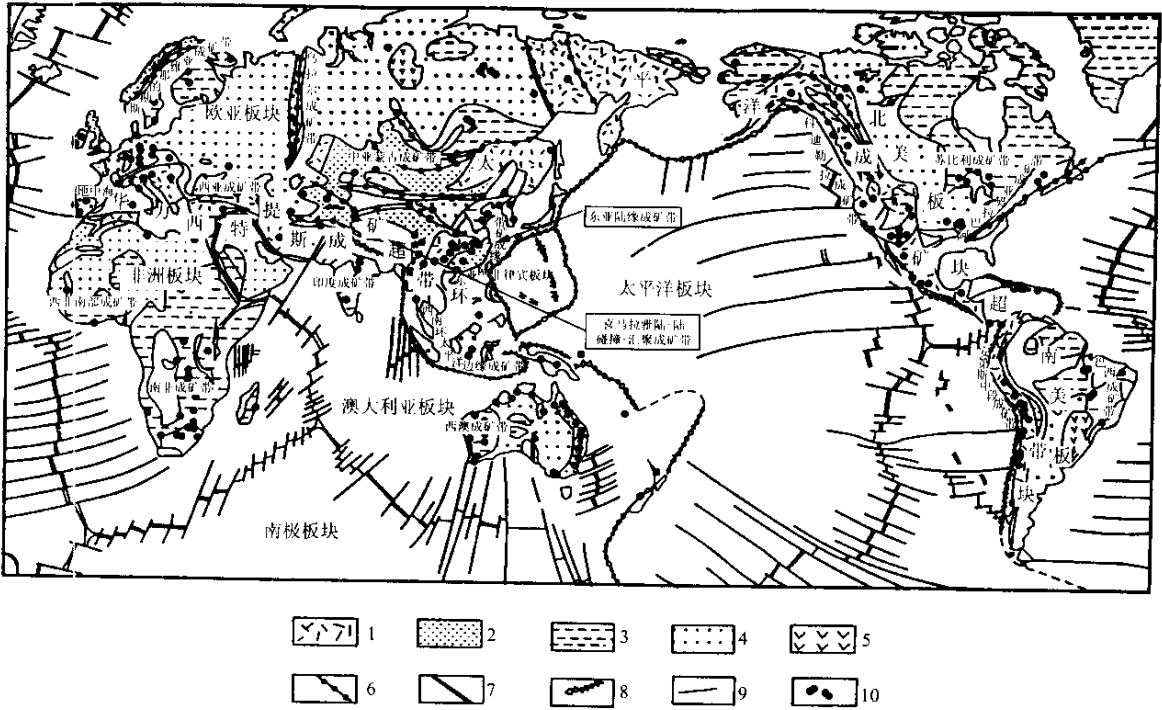


图 12 全球构造演化与矿床分布图
(据李晓波,1999)

Fig.12 Global tectonic evolution and distribution of deposits
1—中生代造山带 2—古生代造山带 3—前寒武纪造山带 4—显生宙盖层 5—玄武岩台地；
6—板块缝合线 7—陆内裂谷、洋中脊 8—现代板块汇聚带 9—大型断层 10—大型、超大型矿床

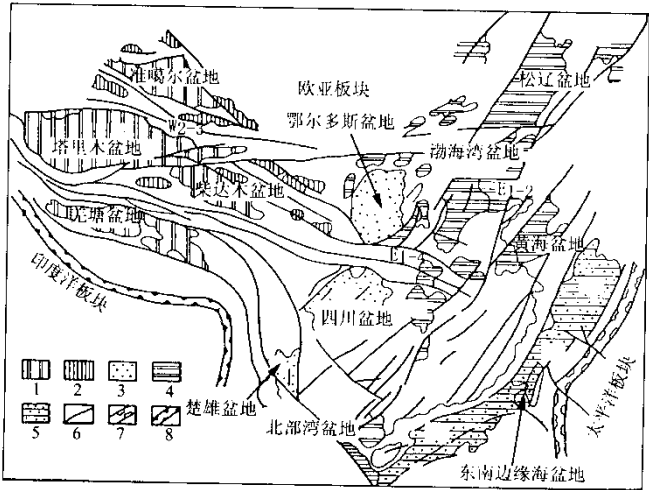


图 13 东亚地区油气盆地的构造类型分布图
(据 Li Desheng 等,1995)

Fig.13 Tectonic types of oil and gas basins in East Asia
1—西部大型挤压型盆地 2—西部山前和山间盆地 3—中部板内内陷盆地；
4—东部板内裂谷型内陷盆地 5—东部陆缘裂谷内陷盆地 6—主要断裂带；
7—西太平洋消减带 8—雅鲁藏布江碰撞、挤压过渡带

在地震勘探的资料处理中,重心是 CMP 叠加和滤波问题,70 年代以后则转为波动方程偏移。声波波动方程偏移包括有限差分偏移、积分求和偏移和弹性小波有限元偏移。80 年代进入了逆时偏移、有限元偏移、三维偏移和叠前偏移等,并发展了矢量波动方程偏移技术。弹性波克希霍夫积分偏移和弹性波有限元偏移,主要用于研究复杂结构情况下偏移成像介质的不均匀性,特别是存在横向不均匀和各向异性情况下的弹性波方程偏移。

(3) 地震层析技术。偏移成像要预先知道速度分布才可以用偏移的方法确定界面的细结构,这种技术可以求得波速和物性结构^[77]。层析成像技术与波动方程反演理论的结合是当今的主流。井间层析成像在油气勘探和开发中具有重要作用^[75]。大井间距地震层析成像技术在我国西北塔里木盆地和东北松南油田均取得了很好的效果^[77,78]。另外,核磁共振成像测井技术^[79,80],可能提供一套新的信息,并通过全新的响应关系,对地层油气资源进行评价,包括层位、储量、产能以及增产措施与效果评价等在内的基本问题,并给出解答,故有着广泛前景。

(4) 地震地层学、定量岩性反演和盆地动态模拟。地震地层学是在经过反复处理后的地震反射剖面,并结合钻井资料和生物地层资料,将地震相转化为沉积相及沉积系列,借助于环境分析确定盆地沉积记录^[81]。在这一研究中应深入进行定量反演和盆地定量动态模拟。

(5) 多波多分量^[82]和高分辨率地震勘探^[83,84]。为了取得地下介质结构和构造的多源信息,仅利用 P 波是远远不够的,而必须利用 P 波、S 波和 PS 型转换法的信息,以获取更多的参量参与反演、分析与解释。另外在地震勘探中,特别是在复杂构造地带以及小幅度构造、小落差断层等,为取得清晰可靠的记录,并做出正确的判别就必须提高频率与分辨率,以获取详细的地下信息。在资料的处理与反演中,地震波场的运动学和动力学并重对于扩展信息的利用和提高分辨率均有着重要意义^[85]。

(6) 石油地震勘探观测仪器设备的发展和高新科学技术的应用起到了重要作用。由光点记录地震站,模拟磁带记录地震站,发展到如今的数字地震站,由几十个通道发展到如今的一千余道的观测装置,其动态范围得到不断提高。这才使得石油与天然气地震勘探一代一代的前进,且为提取大量的可靠信息提供了坚实的基础。为此,已使得石油与天然气的地震

勘探由一维、二维向三维和四维发展。

显见,由于板块构造理论的出现,沉积建造和结晶基底的勘查和地壳与上地幔结构及构造研究日益详细和深化,高新科学技术的迅猛发展在块体边界和盆地深部找矿、找气已为必然。确切地说,20 世纪科学技术的发展,人类生活与生存空间水平的提高和社会与经济的可持续发展是与地球为人类不断提供大量的资源和能源是十分关键的。

2.8 地球物理学与军事和国防

在地球物理学的发展进程中,地震和空间物理研究具有特殊地位^[86,87]。除前述在各方面的作用外,它还在军事需要和国防建设及维护领土主权方面,起到了中坚作用,如(1)大陆的自由延伸与国土海域的界带划分;(2)空间利益与空间安全性和空间环境预报及应用;(3)地下、地面与空中核监测与核侦察;(4)中、远程导弹飞行轨道与落地点的轨迹;(5)海下深潜物的探测与它的海底停卧;(6)飞行器的空中姿态;(7)核泄漏的监测与防护及事变发生导向;(8)海中沉潜船舶的勘查,例如美国泰坦尼克号的勘查与打捞,俄罗斯潜艇库尔斯克号的勘查和打捞等等。

2.9 试验地球物理研究

在地球物理学领域中模拟的对象是地球本体及其内部物质的属性和运移,它具有尺度大、时间长,且处于动态之中的特点,再加上人们对其形成与演化规律性认识的有限,因此有着相当的难度。在实验的过程中必须考虑几何的、物理的以及广义的相似性原理。不论是岩石介质的破裂,地震波场效应和地幔对流,还是实际地球介质中(如井中)的实验均可在实验室内进行模拟。然而通过高温、高压技术对地球内部物质属性的研究和资源、能源、灾害与环境以及地球动力学研究具有重要作用^[88],对深化认识地球本体取得了重要进展。在 20 世纪中高温、高压技术取得了长足的发展(1)静态超高压实验技术日臻完善,并已广泛应用于地球深部物质的实验研究,相变实验和物性参数测量等(2)运用新的高精度弹性观测方法和计算技术进行物理-数字模拟,获得了多种地球深部物性和动力学模型(3)地幔与地核重要矿物的晶体结构、相变、 p - V - T 状态方程和矿物稳定性(4)状态方程和声波速度测量与核幔边界区域的热边界场效应和动力学(5)地球内部不同圈层的物质组成、状态和变形(6)高温高压装置、实验材料和测试技术。

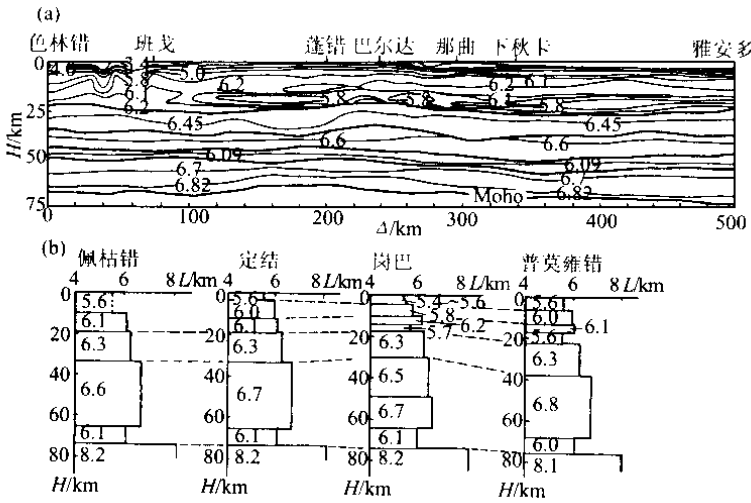


图 14 青藏高原地壳与上地幔速度结构剖面图

(据刘宏兵等,1990;滕吉文等,1985)

Fig.14 The structure of crust and upper mantle along profiles in Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau
数据为地震体波(P波)速度(km/s)

2.10 全球范围内最具典型性地域的地球物理研究

在全球范围内,不论是板块、板缘和板内其构造格局与深层动力过程都是十分复杂的,而且是不相同的。对一些典型的构造域必须有比较详细的分析,因为它们在地球动力学的系统研究中起着控制作用。

(1)青藏高原被誉为世界屋脊,它的形成与演化不仅改变了东亚地区的人文与气候,而且形成了独特的地质构造。多年来,中外地球物理学家倾注了大量心血为揭开高原之秘做出了巨大贡献。青藏高原地壳巨厚,块体边界具有显著的地球物理标志。在地壳内部存在两个低速层,而且在雅鲁藏布江以北和以南存在显著差异^[89~92],在藏南地带地壳上部低速层向北倾斜,是一个与大型滑脱构造同步的低速层,第二低速层则位于地壳底部(图14,15),喜马拉雅地带壳、幔物质的北向运移,即陆-陆碰撞形成了一个碰撞带、挤压带、造山带及深部物质与能量强烈交换的场所;“双层楔板”新模型的提出对于认识该区深、浅结构,深层过程和动力学效应十分关键^[39],并且由于其深部物质的侧向流展,造成了对川、滇地带地震活动和构造应力场的强烈反响。基于均衡异常分布表明,喜马拉雅地区地壳厚度为 (55 ± 5) km,故无“山根”,地壳未达均衡,且至今深部物质仍在运移,高山尚在继续隆起^[93](图16)。

(2)大陆边缘与海洋地球物理场和深部结构的研究深化了人类对地球本体的认识,为板块学说奠

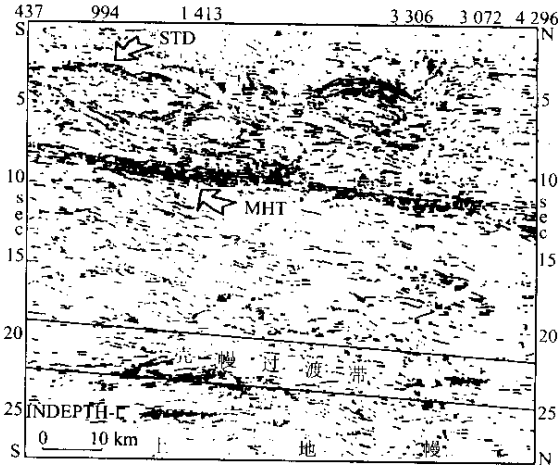


图 15 藏南亚东—萨马达地带的垂直地震反射剖面(INDEPTH-1)

(据赵文津等,2001;有改变)

Fig.15 Vertical reflection profile of INDEPTH-1 in Yadong-Shamada of South Tibet
STD—藏南滑脱系;MHT—主喜马拉雅逆冲断裂(上地壳低速层顶部);INDEPTH-1—“国际喜马拉雅和西藏高原深部地震研究”第一期工程

定了关键性基础,为资源、能源开发和利用,为大陆自由延伸和国防建设等提供了重要信息,这里特别是海陆块体边界地带的俯冲,消减以及动力边界的形成。21世纪向海洋“进军”,以高新技术为支撑开发海洋,利用海洋已成为必然,对于天然气水合物和金属结核矿产资源的勘查与开发应加快步伐。

(3)极地的地磁场、重力场和岩石圈结构是全球

(包括地球的最外层)作为一个整体来研究与探索乃是利用空间这一特殊环境,并为人类与社会和经济有机发展的重要领域。

2.12 大陆科学钻探与深部结构和深层过程

在大陆深井钻探中,不论是超深钻井还是深钻井均钻进在重要的地表地质构造部位。它是直接检取深部介质结构与资源和灾害背景的唯一手段,但在开钻前又必须进行深部地球物理探测。自20世纪70年代以来,世界上约有14个国家提出了大陆科学钻探计划。这不仅对检验深部结构与深层过程十分重要,而且对证实与修正地球物理反演结果以及对应力、应变和深部流体作用等也是至关重要的。当今世界上最著名的超深钻井有两处:(1)前苏联于70年代初在科拉半岛进行超深钻井(据 Казанский, 1989),井深已钻到12.262 km。这不论是进行上地壳介质结构的研究,还是对深部物质组成和深层找矿均具有指导意义。例如在深7~8 km处尚见有结晶水和矿化现象。(2)联邦德国于80年代后期在上法尔茨进行了超深钻井^[99],井深原计划打到14.0 km。在开钻前已投资达2.5亿马克进行前期的地球物理探查和选址工作。

美、日、加、中等国亦均在计划、酝酿选址和前期工作。我国于20世纪末,亦上报国家提出进行深钻井的前期工作,并在大别和苏鲁地带进行了大量的前期地球物理探测^[100,101]。该深钻井计划打到5 km左右,已在2001年年中开钻,现进展情况良好。

2.13 地球动力学

板块驱动机制与深部构造及动力过程乃是地球物理学对物质与构造运动研究的重要组成部分。因为深部物质与能量的交换,深部热物质运移、上涌以及其构成的特异背景将是对在力源作用下深部物质运动和诸多构造现象形成的制约^[102]。在大陆动力学的研究中,与全球大陆动力学的研究(包括大陆与海域)存在着一定的差异,这是由于板内地球动力学的特殊性所致^[103~106]。为此,对以下方面进行了初步的探讨:(1)板块构造驱动的动力源和机制及边界地球物理场效应。(2)地热活动、地震活动和重力均衡补偿的深部异常场形成的要素。(3)地幔对流“猜想”的提出对物质和构造运动的分析、解释以及对全球地球动力系统的认识。(4)10~670 km间断面、核-幔边界与D''层和地幔热柱的形成及深部物质上涌。(5)地球内核介质的各向异性与内核和外核差异旋转^[107]及其地震学的判据(图17)。它与地磁场形成

的发电机理论,全球变化及其地球动力学效应。(6)天体运动,如地球自转、极移与九大行星之间的相互作用和地球内部物质分异、调整与响应。



图17 地球内核差异旋转运动图

(据 X D Song, 1996)

Fig.17 Differential rotation of the Earth's inner core

2.14 地球物理观测

地球物理学在本质上是一门观测的科学,但它与大量的理论、实验研究是相辅相成的,而且对当今高新科学技术的发展有着很强的依赖性。如今大量的地震观测(包括天然地震和人工源地震)表明,不论是在资源与能源的勘察方面,还是在地球内部与动力学的研究中,地震信息乃是十分关键的^[102,108]。为此世界各国在这一方面均十分重视,并给予了极大的投资,以建立起现代化的、高分辨率的观测网络。这是因为可靠信息与信息量的缺乏或不足则是任何数学技巧所无法弥补的^[98]。为此观测台网的建立、记录质量与技术水平以及动态范围乃是一个国家地球物理学发展的重要标志之一。当今:(1)全球数字地震台网布局已初步完善与实施。(2)大动态、宽频带、三分量数字化地震观测系统与台阵的提出和其在大陆、海洋与海底的观测已在逐步实现。(3)定位系统(GPS)、人卫激光测量(SLR)、甚长基线干涉仪(VLBI)、精密重力测量[包括相对(RG)与绝对(AG)精密重力测量]和干涉合成孔径雷达(INSAR)观测网已初见成效。我国已建成一个比较完善的地壳运动观测网络。(4)中国数字地震、地磁固定台网和流动观测网络已初具规模,而且尚在以最新技术进行改造,新

建与完善均在不断进行与实施。“十五”期间我国的数字地震台网将会成倍地增加,将会对 1.5 级左右的地震进行监控。

3 地球物理学 21 世纪上、中叶的发展前沿

在现实世界中,无论是自然界还是人类社会,均普遍存在着各类复杂系统,而对复杂系统的研究,已经并将继续促进一些新概念、新理论和新观点的产生,并将极大地影响到科学和社会的发展,地球物理学即属于这一范畴^[5]。

地球物理学必须在科教兴国和可持续发展的战略框架下,从国情出发,遵循“有所为,有所不为”的原则,着眼于精度和质量,以对地球本体认识的深化,提高理论水平和效益为重点,强化学科的交叉与渗透和认识集成,以凝炼对国家经济、社会发展具有带动性的、兼具区域特色和全球意义发展方向的重大科学问题,并进行创新性研究,以资为人类做出重大贡献。

如今地球物理学在宇宙、宏观和微观三个前沿上探索着地球形成与演化的奥秘和精细结构与深层过程。地球物理学在研究难度上、涉及学科广度上与高新技术应用上也日益发展。面临 21 世纪对地球物理学的挑战和时代赋予的机遇,故提出地球物理学在 21 世纪上、中叶的主要发展前沿和科学难题。

3.1 主攻方向、研究中心、目标与目的^[109]

(1)主攻方向:地球内部圈层结构,物质-能量的交换和耦合及深层要素。(2)研究中心:地壳、壳-幔边界、地幔、核-幔边界(D"层)及地核和其形成与演化的深层过程及响应。(3)研究目标:深部物质运移与板块(特别是板内和板缘构造与物质运移)运动和力源机制及新的地球动力学模型的建立。(4)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物质运动的要素,并对其潜在前景进行预测。

3.2 优先发展的领域

(1)地球内部复杂系统和界面属性:①圈层耦合:壳-幔边界和核-幔边界(特别是 D"层)的结构、属性和热动力边界场效应;②高分辨率二维和三维速度结构的地震探测和人工源与天然源相结合的台阵观测与精细刻画深部结构及构造的地震层析成像;③地球内部与地表和大气的耦合及海陆耦合及灾变;④火山和大洋中脊深部物质上涌及通道与对界面结构和属

性的响应;⑤地球深部物质分异与调整和均衡补偿面的位置与其物理、力学特征。

(2)地球内部复杂介质中的地震波动。对地震波动理论、方法和过程的研究是地球物理学发展中的重要标志:①非均匀介质中的地震波动;②非线性介质中的地震波动;③各向异性介质中的地震波动;④多相介质中的地震波动;⑤地震波动的物理-数学模拟,特别是壳-幔边界、核-幔边界和地核的物质组成与状态。

(3)地球内部物质的运移与驱动机制:①地球深部物质与能量的变换与热物质上涌效应;②地幔对流的形态、机制和运动模型以及其检测途径;③地幔热柱、地幔冷柱的起源、启动边界层位和运移过程及介质与构造环境;④地球内部物质运动的动力要素和力源。

(4)地震活动与成因:①地震活动、强烈地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境;②地震活动与预测的非线性过程和各向异性标志;③地震形成的物理-力学效应,特别是热动力效应;④地震预测的半定量和定量标志与四维应力场响应。

(5)地球内部物质运移与大地构造:①地球内部的精细圈层结构和耦合;②板内造山带与盆地、裂谷和陆内俯冲;③块体边界的深、浅地球物理边界场效应;④依据地球深部结构,构造和物质的运动学与动力学特征编制新一代大地构造图和资源分布图。

(6)地球内部和流体作用:①流体作用与成岩、成矿;②幔源烃物质和金属元素的运移、聚焦和形成;③油、气有机成因和无机成因的理论与实践;④幔源包体与壳、幔结构和组分的形成与演化。

(7)资源与能源的新理论,新方法的提出与应用:①地球物理勘查新理论、新方法和新物理量的发现与提出;②海洋天然气水合物潜在能源和金属矿物结核的勘查、开拓与高新技术的利用;③典型成矿带(区)的深部背景与其形成和聚集的动力过程和深层找大矿和超大型矿床。要特别重视中、新生代以来碰撞与汇聚地域的动力成矿理论与实践的研究;④生物成矿与海底黑色矿床的分布与形成。

(8)航空、海洋和卫星地球物理探测和地球以外行星际的探查。

(9)日地系统中不同区域之间的相互作用及能量传输和转换过程:①电离层和中高层大气物理;②月球和比较行星学;③磁层物理学;④空间天气过程与预报方法,空间灾害与对策研究;⑤地磁场突变时期

地球多圈层的整体耦合效应。

(10) 地球物理学与环境研究(特别是城市环境)和全球变化。

(11) 地球物理学在国防、军事与权益斗争中的作用和地球物理作战武器。

(12) 现代标准化的、宽频带、大动态和高分辨率的地球物理高新观测系统的建立。

(13) 建立新一代的地球物理理论体系和反演方法(特别是非线性科学的应用)。

(14) 多参量约束下的物理与数字模拟。

(15) 逼近于实际的计算地球物理学和实验地球物理学。

(16) 高层次的综合地球物理研究与建模。

(17) 核爆炸与核侦察及导弹制导等战争武器及通讯发展中的地球物理学应用。

(18) 数字地球与应用。

以上优先发展的领域和典型地区乃是当前地球物理学研究的前沿。众多的理论问题有待解决,一系列科学问题需要实验与检验,还有一些尚未认识的问题有待探索,应当说还存在相当的难度。通过 21 世纪上、中叶的地球科学深入研究与探索,要有实质性的突破、充分发挥地球物理学的效能具有十分重要的意义,同时高层次的综合研究应占有特别重要的地位。

3.3 典型地区(带)

(1) 地球物理特异构造带的对比与综合研究:①太平洋东西海岸与陆缘地带,如郯庐断裂带与圣安德烈斯断裂带的对比与综合研究;②南极、北极和“第三极”(青藏高原)的对比研究及其全球地球动力学效应。

(2) 深海海域探查与资源:①海底“黑烟囱”与暗色生物群系;②海底“黑烟囱”与黑色矿床;③海底矿产结核;④海底沉积物的探查与打捞。

(3) 中国东部岩石圈结构,圈层耦合与成矿和地震“孕育”的深层动力过程。

(4) 西部青藏高原与天山造山带的板内构造和大陆动力学。

(5) 东亚块体耦合和深层构造“结点”与大陆动力学。

3.4 高新科学与技术

(1) 高灵敏度、高分辨率、高稳定性和多维观测装置。(2) 新的参量、新的反演理论和方法的提出与应用。(3) 取得地幔和核、幔边界的丰富新信息,深化对

地球本体的认识。

3.5 地球科学的系统工程

将“地球的层圈结构—物质组成—深部物质与能量的交换—物质的运动与行为—圈层耦合的深层过程—动力学机制—逼近于地球本体模型的建立”作为一个系统的地球科学工程来实施、研究和探索。

4 结语

20 世纪是一个光辉的百年,在地球物理学领域里取得了卓越成就,为科学与技术的发展和人类的进步立下了不朽的功勋。

在地球科学领域里地球各圈层的结构,地球整体系统深—表—空各圈层物质与能量的交换,圈层耦合,深层过程,以及地球系统动力学模型的建立乃是当代地球物理学发展的前沿和生长点,是 21 世纪上、中叶的主体导向。显然,在它们发展过程中,其基本点是从基础研究出发,且具有强烈的定向性和应用性。为此,必须十分重视其理论价值,因为提高对自然过程的认识,则必然要提高今后的预测能力。这就一定要建立在科学认识的升华和新理论指导的基础上。同时又必须十分重视其所产生的或潜在的经济效益和社会效益,并主动迎接未来的挑战。要分析、研究和探索未来发生的新问题、新动向,并提出对策,要高度重视科学的统一性,配合、交叉、渗透、熔融和单一学科的深入与高层次的多学科综合,这可能是当代地球物理科学创新的必由之路。为此,发展的总特点则表现为强调把地球作为一个整体来研究,但又必须首先着手于深入剖析典型地区与事件,并通过综合与对比研究,取得成效,建立起多要素约束下的、更加逼近于实际的和富于创新性的新模式^[102],使得地球这一复杂系统^[109~111]的研究和探索在整体上跃入一个新境界。

当今,地球物理学的发展正进入一个崭新的时代,全方位地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,视为一个地球物理学的系统工程来探索,并用来为人类服务,以完成新的历史时期所赋予我们的神圣职责。20 世纪以来,在地球动力学的领域里是以水平运动为主体,还是以垂直运动为主体一直存在着争议。在这百年的历史进程中不同阶段有着不同的认识(图 18)^[112]。同时也说明,当今人们的认识还是有限的,已有资料尚不足以给出定量的判据和确定规律。这

正是地球物理学家们必须长期积累和探索的关键所在。

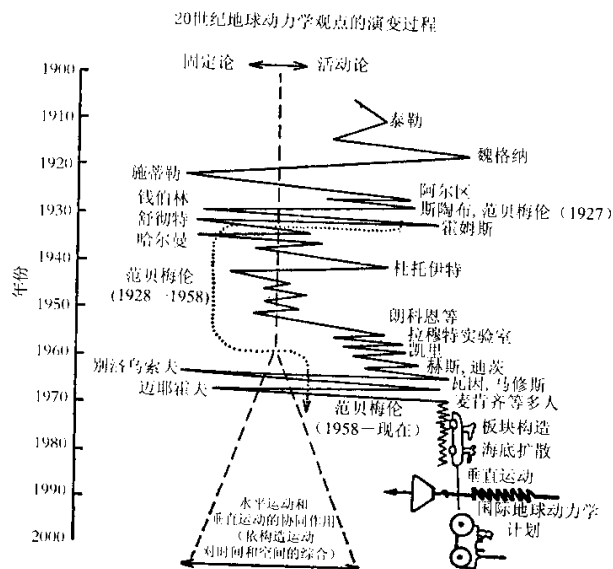


图 18 20 世纪地球动力学观点的动向发展进程与演化图

(据 Van R W Bemmelen, 1972; 黄汲清等, 1980 略改动)

Fig.18 Development and evolution of geodynamic viewpoints in the 20th Century

自发现大陆和大洋溢流玄武岩和地幔热柱以来,这对以水平运动为主体的论点无疑是一个挑战。为此,通过对 20 世纪已有成就的总结和深入研究,再通过 21 世纪中、上叶的地球物理深入研究与剖析,必会取得一系列新的数据、判据、结果和认识,并必然会对地球本体,特别是物质与能量的交换、深层过程和动力机制有一个较全面的科学认识。对于中国来说,在地球科学的领域里负有重要职责,因为我国具有丰富的、世界上少有的、且具有多样性的地球内部与大陆构造格局以及资源、能源,同时也是一个多地震的国家。为此,完成由地学大国向地学强国的过渡乃是 21 世纪的重要任务。

人类社会正面临着世纪之交的时代更迭,从现在起到 21 世纪的上、中叶,将会是人类社会发展史上的一个巨大的变革时期,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,现在正处在一个新的起点上^[112]。从全球地球科学发展的整体趋势来看,它的未来正面临着比以往任何时候都更富有挑战性的复杂格局,即展现出前所未有的发展和突破机会,同时也正处于一个充满希望与前景的转折点上。为此,世界上很多国家均

把 21 世纪看作是全球地球物理学发展的关键历史时期,并提出了许多前沿性科学研究领域。随着时代的进步,研究的深化,21 世纪不仅会出现许多崭新的成果,而且必然会形成一系列新的科学思维、理论、方法和概念。在造福于人类的征途上,一定会为科学与技术的创新,社会与经济的持续发展,保护地球环境与“净化”人类生存空间作出更加辉煌的贡献^[113]。

References [参考文献]:

- [1] TENG Jiwen. Present condition and development for study of geophysics [A]. Committee of Natural Science Foundation of China. Findings Report in Strategic Development of Natural Sciences [R]. Beijing: Science Press, 1994. 31-101 (in Chinese). [滕吉文. 地球物理学研究的现状与发展 [A]. 国家自然科学基金委员会. 自然科学学科发展战略调研报告 [R]. 北京: 科学出版社, 1994. 31-101.]
- [2] TENG Jiwen. Structure of spheres and layers in earth's depth and geodynamics [A]. Earth Sciences into the 21st Century [M]. Zhengzhou: Science and Technology Press of Henan, 1995. 208-209 (in Chinese). [滕吉文. 地球深部圈层与动力学 [A]. 走向 21 世纪的中国地球科学 [M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1995. 208-209.]
- [3] WANG Shui. Review and prospect of space physics [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(5): 664-670 (in Chinese). [王水. 空间物理学的回顾和展望 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 664-670.]
- [4] TENG Jiwen. The new challenge and opportunity for developing geoscience [J]. Progress in Geophysics, 1997, 12(1): 24-30 (in Chinese). [滕吉文. 地球科学的机遇与挑战 [J]. 地球物理学进展, 1997, 12(1): 24-30.]
- [5] CHEN Yuntai, TENG Jiwen, ZHANG Zhongjie. Geophysics: The 20th Century in retrospect and the 21st Century in prospect [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(5): 634-642 (in Chinese). [陈运泰, 滕吉文, 张中杰. 地球物理学的回顾与展望 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 634-642.]
- [6] TENG Jiwen, ZHANG Bingming, HU Jiafu, et al. The research of deep medium and structural environment for earthquake "Pregnancy" [A]. Advances in Seismology in China [C]. Beijing: Seismological Press, 1997. 258-265 (in Chinese). [滕吉文, 张秉铭, 胡家富, 等. 地震“孕育”的深部介质和构造环境研究 [A]. 中国地震学研究进展 [C]. 北京: 地震出版社, 1997. 258-265.]
- [7] KEAREY P, VINE F J. Global Tectonics [M]. Oxford, London: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [8] JEFFREYS H. The times of P, S and SKS and the velocities of P and S [J]. Mon Not R Astr Soc Geophys, 1939, 4(Suppl): 498-533.
- [9] LEHMAN I P. On the travel times of P as determined from nuclear explosions [J]. Bull Seism Soc Amer, 1964, 54: 123.
- [10] BULLEN K E. An Introduction to the Theory of Seismology [M]. 1963.
- [11] BULLEN K E. The Earth's Density [M]. London: Chapman and Hall, 1975.
- [12] ANDERSON D C, HART R S. An earth model based on free oscillations and body waves [J]. J Geophys Res, 1976, 81(8): 1401-1475.
- [13] HERIN E. Seismological tables for P phase [J]. Bull Seis Soc Am,

- 1968, 58 :1193.
- [14] BOLT B A. *Inside the Earth Evidence from Earthquakes* [M]. San Francisco : Freeman, 1982.
- [15] DZIEWONSKI A M, ANDERSON D L. Preliminary reference earth mode [J]. *Phys Earth Planet Int*, 1981, 25 :297-356.
- [16] MOHOROVIČIĆ A. *Das Beben vom 8. X. Jb met Obs Zagreb* [C]. 1909. 1-63.
- [17] GUTENBERG B. *Physics of the Earth's Interior* [M]. Beijing : Science Press, 1965 (in Chinese). [古登堡 B. 地球内部物理学 [M]. 北京 : 科学出版社, 1965.]
- [18] LEHMAN I. P. *Bar Centr Seism Internat A* [M]. [s. l.]: [s. n.], 1936. 3-31.
- [19] BULLEN K E, BOLT B A. *An Introduction to the Theory of Seismology* [M]. Cambridge : Cambridge University Press, 1985.
- [20] Зверев С М и Д Р. *Глубинное Сейсмическое Зондирование Земной коры в СССР* [M]. Ленинград : Гостоптех Издат, 1962.
- [21] CANTWELL T, MADDEN T R. Preliminary report on crustal magnetotelluric measurements [J]. *J Geophys Res*, 1960, 65 :4202-4205.
- [22] ZENG Rongsheng. *Introduction of Solid Earth Physics* [M]. Beijing : Science Press, 1984 (in Chinese). [曾融生. 固体地球物理学导论 [M]. 北京 : 科学出版社, 1984.]
- [23] TENG Jiwen. The seismic study of lithospheric physics in China [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37(Suppl) :140-159 (in Chinese). [滕吉文. 中国岩石圈物理的地震学研究 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(增刊) :140-159.]
- [24] TENG Jiwen, XIONG Shaobai, ZHANG Zhongjie. Review and prospects for geophysical study of the deep lithosphere structure and tectonics in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl) :121-139 (in Chinese). [滕吉文, 熊绍柏, 张中杰. 青藏高原深部结构与构造地球物理研究的回顾和展望 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊) :121-139.]
- [25] WANG Chunyong. Review and prospect on lithospheric structure study in China [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl) :82-109 (in Chinese). [王椿镛. 中国岩石圈结构研究的进展和展望 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊) :82-109.]
- [26] DZIEWONSKI A M, WOODHOUSE J H. Global image of the Earth's interior [J]. *Science*, 1987, 236 :37-48.
- [27] DZIEWONSKI A M, ALESSANDRO M F, SU Weijia, et al. Seismic tomography and geodynamics relating geophysical structures and processes [A]. *The Jeffreys Volume* [M]. Washington D C : American Geophysical Union, 1993. 16 :76.
- [28] KNITTLE, E, JEANLOZ, R. Earth's core-mantle boundary [J]. *JUGG*, 1991, 16 :53-66.
- [29] WILSON J T. Mantle plumes and plate motions [J]. *Tectonophysics*, 1973, 19 :149-164.
- [30] MORGAN W J. Convection plumes in the lower mantle [J]. *Nature*, 1971, 230 :42-43.
- [31] DAVYDOVA N I. Models of the Earth's crust and mantle boundary [J]. *Geophys*, 1972, 38 :367-393.
- [32] XIONG Shaobai, LAI Minghui, LIU Hongbing, et al. Structure of lithosphere and velocity distribution in Tunxi-Wenzhou area [A]. *Structure and Evolution of Lithosphere in Southeast Continent* [M]. Beijing : Metallurgical Industry Press, 1993. 250-256 (in Chinese). [熊绍柏, 赖明惠, 刘宏兵, 等. 屯溪—温州地带的岩石圈结构与速度分布 [A]. 东南大陆岩石圈结构与地质演化 [M]. 北京 : 冶金工业出版社, 1993. 250-256.]
- [33] PRODEHL C. The structure of the crust-mantle boundary beneath North America and Europe as derived from explosion seismology [A]. HENCOCK J G. *The Earth's Crust* [M]. *Am Geophys Union Monogr*, 1977, 20 :349-369.
- [34] BRAILE L W, CHING C S. The continental Mohorovičić discontinuity results from near-vertical and wide-angle seismic reflection studies [J]. *Geodynamics Services*, 1986, 13 :257-272.
- [35] KUHN T S. *The Structure of Scientific Revolutions* [M]. Chicago : The Univ. of Chicago Press, 1970.
- [36] LE P X. Sea-floor spreading and continental drift [J]. *J Geophys Res*, 1968, 73 :3661-3697.
- [37] WOODHOUSE J H, DZIEWONSKI A M. Mapping the upper mantle : Three-dimensional modeling of Earth structure by inversion of seismic wave forms [J]. *J Geophys Res*, 1984, 89 :5953-5986.
- [38] HAGER B H, O'CONNELL R J. A simple global model of plate dynamics and mantle convection [J]. *J Geophys*, 1981, 2 :267-286.
- [39] TENG Jiwen, ZHANG Zhongjie, WANG Guangjie, et al. The deep internal dynamical processes and new model of continental-continental collision in Himalayan collision orogenic zone [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(4) :481-491 (in Chinese). [滕吉文, 张中杰, 王光杰, 等. 喜马拉雅碰撞造山带的深层动力过程与陆-陆碰撞新模式 [J]. 地球物理学报, 1999, 42(4) :481-491.]
- [40] TENG Jiwen, ZHANG Zhongjie, ZHANG Bingming, et al. The study of geophysical criterion for dividing Terranes in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39(5) :629-641 (in Chinese). [滕吉文, 张中杰, 张秉铭, 等. 青藏高原地体划分的地球物理标志研究 [J]. 地球物理学报, 1996, 39(5) :629-641.]
- [41] TENG Jiwen. Global geoscience transects and geodynamics [J]. *Progress in Geophysics*, 1994, 9(1) :40-58 (in Chinese). [滕吉文. 全球地球科学大断面与地球动力学 [J]. 地球物理学进展, 1994, 9(1) :40-58.]
- [42] TENG Jiwen. Global geoscience transects in geophysics [J]. *Progress in Geophysics*, 1994, 9(2) :1-16 (in Chinese). [滕吉文. 全球地球科学大断面与地球动力学 [J]. 地球物理学进展, 1994, 9(2) :1-16.]
- [43] BARAZANGI M, DORMAN J. World seismicity maps compiled from ESSA a coast and geodetic survey epicenter data, 1961-1967 [J]. *Bull Seism Soc Am*, 1969, 59 :369-380.
- [44] BYERLY P. The earthquake of July 6, 1934—Amplitudes and first motions [J]. *Bull Seis Soc Am*, 1938, 28 :1-22.
- [45] GUTENBERG B. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes [J]. *Bull of the Seismological Society of America*, 1945, 35 :3-12.
- [46] AKI K, RICHARDS P G. *Quantitative Seismology Theory and Methods* [M]. [s. l.]: W H Freeman and Company, 1980.
- [47] SCHOLZ C H, SYKES L R, AGGARWALL Y P. Earthquake prediction : A physical basis [J]. *Science*, 1973, 181 :803-809.
- [48] ZHU Fengming, WU Ge. *Haicheng Earthquake* ($M_s = 7.3$) in 1975 [M]. Beijing : Seismological Press, 1982 (in Chinese). [朱凤鸣, 吴戈. 1975年海城7.3级地震 [M]. 北京 : 地震出版社, 1982.]
- [49] CHEN Yuntai, WU Zhongliang, LI Shiyu. Research in physics of earthquake source in China in the turn of the centuries [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl) :164-176 (in Chinese). [陈运泰, 吴忠良, 李世愚. 世纪之交我国震源物理研究的进展与展望 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊) :164-176.]
- [50] MEI Shirong, FENG Deyi, ZHAHG Guomin, et al. *Introduction to Earthquake Prediction in China* [M]. Beijing : Seismological Press,

- 1993(in Chinese). [梅世荣,冯德益,张国民,等.中国地震预报概论[M].北京:地震出版社,1993.]
- [51] CHEN Qifu, CHEN Yong, LI Juan, et al. Earthquake prediction research and its prospect[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl): 386-395(in Chinese). [陈棋福,陈颀,李娟,等.地震预测研究与展望[J].地球物理学报,1997,40(增刊):386-395.]
- [52] ZHANG Guomin, LI Li, JIAO Mingruo. Development on earthquake prediction research during the last decade in China and its prospects[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl): 396-410(in Chinese). [张国民,李丽,焦明若.我国地震预报研究近十年的发展与展望[J].地球物理学报,1997,40(增刊):396-410.]
- [53] WANG Ren. Progress and outlook of geodynamic research in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(Suppl): 50-59(in Chinese). [王仁.我国地球动力学的研究进展与展望[J].地球物理学报,1997,40(增刊):50-59.]
- [54] AN Zhenwen, YE Zhengren, TENG Chunkai, et al. The 1/f noise behaviour in seismogenic system[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(3): 380-386(in Chinese). [安镇文,叶正仁,滕春凯,等.孕震系统的1/f噪声行为[J].地球物理学报,1997,40(3):380-386.]
- [55] SADOVSKY M A, NERSESOV I L. Forecasts of earthquakes on the basis of couples geophysical features[J]. *Tectonophysics*, 1974, 23: 247.
- [56] XU Lisheng, CHEN Yuntai. Temporal rupture process of the 1997 Mani, Xizang(Tibet), China earthquake of $M_s = 7.9$ [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1999, 12(5): 495-506(in Chinese). [许力生,陈运泰.1997年中国西藏玛尼 $M_s 7.9$ 地震的时空破裂过程[J].地震学报,1999,21(5):449-459.]
- [57] CHEN Y T, XU L S. A time-domain inversion technique for the temporal distribution of slip on a finite fault plane with application to recent large earthquakes in the Tibetan Plateau[J]. *Geophys J Intl*, 2000, 143(2): 407-416.
- [58] CHEN Yuntai, WU Zhongliang, WANG Pende, et al. *Digital Seismology*[M]. Beijing: Seismological Press, 2000(in Chinese). [陈运泰,吴忠良,王培德,等.数字地震学[M].北京:地震出版社,2000.]
- [59] WANG Chunyong, WANG Guimei, LIN Zhongyang, et al. A study of fine crustal structure in Xingtai earthquake based on deep seismic reflection profiling[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1993, 36(4): 445-453(in Chinese). [王椿镛,王贵美,林中洋,等.用深地震反射方法研究其对地震前兆的启示[J].地球物理学报,1993,36(4):445-453.]
- [60] TENG Jiwen, ZHANG Bingming, HU Jiafu, et al. The research of deep medium and structural environment for earthquake, "Pregnancy"[A]. CHEN Yuntai. *Advances in Seismology in China*[C]. Beijing: Seismological Press, 1997, 258-268(in Chinese). [滕吉文,张秉铭,胡家富,等.地震孕育的深部介质和构造环境研究[A].陈运泰.中国地震进展[C].北京:地震出版社,1997.258-268.]
- [61] HESS H P. Seismic anisotropy of the uppermost mantle under oceans[J]. *Nature*, 1964, 240: 629-631.
- [62] CRAMPIN S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media[J]. *Wave Motion*, 1981, 53: 343-391.
- [63] CRAMPIN S, CHESNOKOR E M, HIPKIN R G. Seismic anisotropy—the state of the Art II[J]. *Geophys J R Astr Soc*, 1984, 76: 1-16.
- [64] BABUSKA V, CARA M. *Seismic Anisotropy in the Earth*[M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [65] ZHANG Zhongjie, TENG Jiwen, ZHANG Linbin, et al. Advanced Snell theorem for seismic ray in anisotropic media[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(9): 822-825(in Chinese). [张中杰,滕吉文,张霖斌,等.各向异性介质中地震波射线满足的改进型斯涅尔定律[J].科学通报,1995,40(9):822-825.]
- [66] HE Qiaodeng, ZHANG Zhongjie. *Seismic Wave and Numerical Simulation in Isotropic Medium*[M]. Changchun: Jilin University Press, 1996(in Chinese). [何樵登,张中杰.横向各向同性介质中地震波及数值模拟[M].长春:吉林大学出版社,1996.]
- [67] SAVAGE M K. Seismic anisotropy and mantle deformation what have we learned from shear wave splitting[J]. *Reviews of Geophysics*, 1999, 37(1): 65-106.
- [68] TENG Jiwen, ZHANG Zhongjie, WANG Guangjie, et al. The seismic anisotropy and geodynamics of Earth's interior media[J]. *Progress in Geophysics*, 2000, 15(1): 1-35(in Chinese). [滕吉文,张中杰,王光杰,等.地球内部圈层介质的地震各向异性[J].地球物理学进展,2000,15(1):1-35.]
- [69] AN Zhenwen, YANG Cuihua, WANG Linying, et al. Studies on the multifractals of time and space clustering of earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(1): 74-80(in Chinese). [安镇文,杨翠华,王琳英,等.地震时空丛集的多重分形研究[J].地球物理学报,2000,43(1):74-80.]
- [70] AN Zhenwen, YE Zhengren, TENG Chunkai, et al. The 1/f noise behaviour in seismogenic system[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1997, 40(3): 380-385(in Chinese). [安镇文,叶正仁,滕春凯,等.孕震系统的1/f噪声行为[J].地球物理学报,1997,40(3):380-385.]
- [71] GU Gongxu. *Foundation for Geophysical Prospecting*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990(in Chinese). [顾功叙.地球物理勘探基础[M].北京:地质出版社,1990.]
- [72] KEARY P, VINE F J. *Global Tectonics*[M]. Blackwell: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [73] KEARY P, BROOKS M. *An Introduction to Geophysical Exploration*[M]. Blackwell: Blackwell Scientific Publication, 1991.
- [74] LI Desheng, LIU Guangding, FU Jiamo, et al. The geology and hydrocarbon potential of petroliferous basins in China[J]. *Episodes*, 1995, 18: 21-25.
- [75] LIU He, WANG Yupu, SUI Jun, et al. *Seismic Technology Crosswell in Overseas*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998(in Chinese). [刘合,王玉普,隋军,等.国外井间地震技术[M].北京:石油出版社,1998.]
- [76] COATES G, XIAO Lizhi, PRAMMER M G. *NMR Logging Principles and Applications*[M]. Houston: Halliburton Energy Services, 1999.
- [77] LIU Qinglin, WANG Shiku, GUAN Luping. Tentative application of crosswell seismic technique to the development of oil/gas at Songnan area[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1998, 41(1): 124-132(in Chinese). [刘清林,王世库,管路平.井间地震技术在松南油气开发中的初步应用研究[J].地球物理学报,1998,41(1):124-132.]
- [78] LIU Qinglin, YU Wenhui, CHEN Lin, et al. Crosswell seismic survey with large interwell separations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(4): 549-556(in Chinese). [刘清林,於文辉,陈林,等.大井间距井间地震观测试验[J].地球物理学报,1999,42(4):549-556.]
- [79] DZIEWONSKI A M, WOODHOUSE J H. Global images of the Earth's interior[J]. *Science*, 1987, 263: 37-48.
- [80] GEORGE R C, XIAO Lizhi, MANFRED G P. *NMR Logging Principles and Applications*[M]. Houston: Halliburton Energy Services,

- 1999.
- [81] PAYTON C E. *Seismic Stratigraphy* [M]. Oklahoma , USA : Tulsa , 1977.
- [82] ZHANG Zhongjie. *Anisotropic Process and Interpretational Method for Multicomponent Seismic Data* [M]. Harbin : Heilongjiang Education Press , 2002 (in Chinese). [张中杰. 多分量地震资料中各向异性处理与解释方法 [M]. 哈尔滨 : 黑龙江教育出版社 , 2002.]
- [83] БЕРЗОН И С. *Высокочастотная Сейсмика* [M]. Москва : Изд-во АН СССР , 1957.
- [84] YU Shoupeng. *Seismic Prospecting for High Resolution* [M]. Beijing : Petroleum Industry Press , 1993 (in Chinese). [俞寿朋. 高分辨率地震勘探 [M]. 北京 : 石油工业出版社 , 1993.]
- [85] БЕРЗОН И С , ЕПИНАТВЕВА А М , ПАРИЙСКАЯ Г Н , и др. *Динамические Характеристики Сейсмических Волн в Реальных Средах* [M]. Москва : Издательство Академии Наук СССР , 1962.
- [86] ANDERSON D L. *Theory of the Earth* [M]. Blackwell : Blackwell Scientific Publications , 1989.
- [87] GUTENBERG B , RICHTER C F. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena* [M]. Princeton , New Jersey : Princeton University Press , 1954.
- [88] XIE Hongsen. *An Introduction to Material Science of Earth's Depth* [M]. Beijing : Science Press , 1997 (in Chinese). [谢鸿森. 地球深部物质科学导论 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1997.]
- [89] TENG Jiwen , YIN Zhouxun , LIU Hongbing , et al. The 2D and 3D lithosphere structure and continental dynamics of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Geophysica Sinica* , 1994 , 37 (Suppl II) : 117-130 (in Chinese). [滕吉文 , 尹周勋 , 刘宏兵 , 等. 青藏高原岩石层三维和二维结构与大陆动力学 [J]. 地球物理学报 , 1994 , 37 (增刊 II) : 117-130.]
- [90] TENG Jiwen , XIONG Shaobai. Structure of the crust and upper mantle pattern and velocity distributional characteristics in the northern region of the Himalayan Mountain region [J]. *J Phys Earth* , 1985 , 33 : 157-171.
- [91] TENG Jiwen. Characteristics of geophysical fields and plate tectonics of the Qinghai-Xizang Plateau and its neighbouring regions [A]. *Geological and Ecological Studies of Qinghai-Xizang Plateau* [M]. Beijing : Science Press , 1981.
- [92] ZHAO Wenjin , INDEPTH Group. *Study for Deep Structure and Tectonics of Himalayan Mountain and Suture Zone of Yarlong Zangbo River* [M]. Beijing : Geological Publishing House , 2001.
- [93] MENG Lingshun , GAO Rui. Gravity survey and the lithospheric structure in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [A]. *People's Republic of China Ministry of Geology and Mineral Resources* [Z]. Beijing : Geological Publishing House , 1992 (in Chinese). [孟令顺 , 高锐. 青藏高原重力测量与岩石圈构造 [A]. 中华人民共和国地质矿产部地质专报 [Z]. 北京 : 地质出版社 , 1992.]
- [94] DANESI G , MORELLI A. Group velocity of Rayleigh waves in the Antarctic region [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* , 2000 , 122 : 55-66.
- [95] LEVSHIN A L , RITZWOLLER M H , BARMIN M P , et al. New constraints on the Arctic crust and uppermost mantle : Surface wave group velocities , Pn and Sn [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* , 2001 , 123 : 185-204.
- [96] SHU Peiyi , JIAO Chengmin. Lithosphere velocity structure in transantarctic mountains along 167° E principal vertical circle [J]. *Chinese Journal of Polar Research* , 1999 , 11 (3) : 221-227 (in Chinese). [束沛镛 , 焦承民. 南极站 167° 子午线横贯南极山脉岩石圈速度结构 [J]. 极地研究 , 1999 , 11 (3) : 221-227.]
- [97] ZENG Zhiqian. *Solar-Terrestrial Relationship* [M]. Beijing : Seismological Press , 1989. [曾治权. 日地关系 [M]. 北京 : 地震出版社 , 1989.]
- [98] TENG Jiwen , ZHANG Zhongjie , BAI Wuming , et al. *Physics of Lithosphere* [M]. Beijing : Science Press , 2003 (in Chinese). [滕吉文 , 张中杰 , 白武明 , 等. 岩石圈物理学 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2003.]
- [99] EMMERMANN R. The results and progress of scientific drilling in Germany [J]. *Geological Exploration Technology of Overseas* , 1992 (2). [EMMERMANN R. 德国科学钻探的成果与进展 [J]. 国外地质勘探技术 , 1992 (2).]
- [100] Engineering Center of China Continental Scientific Drilling. *Engineering Propose for China Continental Scientific Drilling* [Z]. Academy of Geological Sciences. Chinese Ministry of Geology and Mineral Resources , 1998 (in Chinese). [中国大陆科学钻探工程中心. 中国大陆科学钻探工程立项建议书 [Z]. 地质矿产部地质科学院 , 1998.]
- [101] YANG Wencai , ZHANG Chunhe , ZHU Guangming. Calibration of seismic reflectors in Chinese continental drilling area [J]. *Chinese Journal of Geophysics* , 2002 , 45 (3) : 370-384 (in Chinese). [杨文采 , 张春贺 , 朱光明. 标定大陆科学钻探孔区地震反射体 [J]. 地球物理学报 , 2002 , 45 (3) : 370-384.]
- [102] TENG Jiwen. The exchange of substance and energy , different sphere coupling and deep dynamical process within the Earth [J]. *Earth Science Frontiers* , 2001 , 8 (3) : 1-8 (in Chinese). [滕吉文. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害 [J]. 地学前缘 , 2001 , 8 (3) : 1-8.]
- [103] WANG Shengzu , ZHANG Sichang , TIAN Qinqian , et al. *Continental Dynamics* [M]. Beijing : Seismological Press , 2001 (in Chinese). [王绳祖 , 张四昌 , 田勤俭 , 等. 大陆动力学 [M]. 北京 : 地震出版社 , 2001.]
- [104] ZIEGLER P A. Geodynamics of rifting and implications for hydrocarbon [J]. *Tectonophysics* , 1992 , 215 : 221-253.
- [105] JOLSEN K H. Continental rifts : Evolution , structure , tectonics [A]. *Developments in Geotectonics* [M]. New York : Elsevier , 1995. 25.
- [106] TENG Jiwen , ZHANG Zhongjie , WAN Zhichao , et al. Seismic tomography and Earth's interior and geodynamics [A]. *Modern Methods for Lithosphere Study* [M]. Beijing : Atomic Energy Press , 1997 (in Chinese). [滕吉文 , 张中杰 , 万志超 , 等. 地震层析成像与地球内部和地球动力学 [A]. 岩石圈研究的现代方法 [M]. 北京 : 原子能出版社 , 1997.]
- [107] SONG X D. Anisotropy in central part of inner core [J]. *J Geophys Res* , 1996 , 101 : 16089-16097.
- [108] LAY T , WALLAC T C. *Modern Global Seismology* [M]. San Diego , California : Academic Press , 1995.
- [109] TENG Jiwen , ZHANG Zhongjie. The new developmental trends and tasks in the study of Earth's internal physics and geodynamics [J]. *Progress in Geophysics* , 1994 , 9 (4) : 4-17 (in Chinese). [滕吉文 , 张中杰. 地球内部岩石圈物理与动力学研究发展的新动向与今后的任务 [J]. 地球物理学进展 , 1994 , 9 (4) : 4-17.]
- [110] YU Chongwen. Fractal growth of ore-forming dynamical systems at the edge of chaos—A new metallogeny and methodology [J]. *Earth Science Frontiers* , 2001 , 8 (3) : 9-28 (in Chinese). [於崇文. 成矿动力系统在混沌边缘分形生长——一种新的成矿理论与方法论 (上) [J]. 地学前缘 , 2001 , 8 (3) : 9-28.]
- [111] HUANG Jiqing , REN Jishun , JIANG Chunfa , et al. *Tectonics and Evo-*

lution of China[M]. Beijing : Geological Publishing House , 1980(in Chinese). [黄汲清 ,任纪舜 ,姜春发 ,等 . 中国大地构造及其演化[M].北京 地质出版社 ,1980.]

[112]HAO Bolin. Portray complicated nature depict and “ Complicated Science ”[J]. Science , 1999 , 51(3) 3-8(in Chinese). [郝柏林 . 复杂性的刻画与“ 复杂性科学 ”[J]. 科学 ,1999 , 51(3) 3-8.]

[113]TENG Jiwen. Protection of the Earth s environment and purification of mankind live space[J]. Progress on Geophysics , 1998 , 13(3) :1-15 (in Chinese). [滕吉文 . 保护地球环境与“ 净化 ”人类生存空间的思考 [J]. 地球物理学进展 ,1998 , 13(3) :1-15.]

GREAT ACHIEVEMENTS IN GEOPHYSICS IN
THE 20TH CENTURY AND DEVELOPING FRONTIERS
FOR THE 21ST CENTURY

TENG Ji-wen
(Institute of Geology and Geophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100101 , China)

Abstract : The 20th century is an important historical period in the development of geophysics , in which the geophysics has obtained splendid achievement. A series of large and global projects were realized in this century. Geophysics will continue making new and great contribution to the understanding of the Earth as a whole system , and to the solution for water , natural resources , natural calamity and environment(including space environment) problems in the 21st century. The exchange of substance and energy , the coupling of different spheres and layers , and the deep dynamical process of the interior of the Earth are inexorable law in the development of the Earth system and are the essentials for deeply understanding the Earth system. The author has discussed the following three subjects :(1) the development and the strategic significance of geophysics ;(2) the great achievements of geophysics in the 20th century ;(3) the developing frontiers and the guide direction of geophysics in the early and middle part of the 21st century.

Key words : geophysics ; structure of earth s interior ; different sphere and layer coupling ; plate tectonic ; natural resources and energy resources ; seismicity and anticipated earthquake ; deep dynamical process