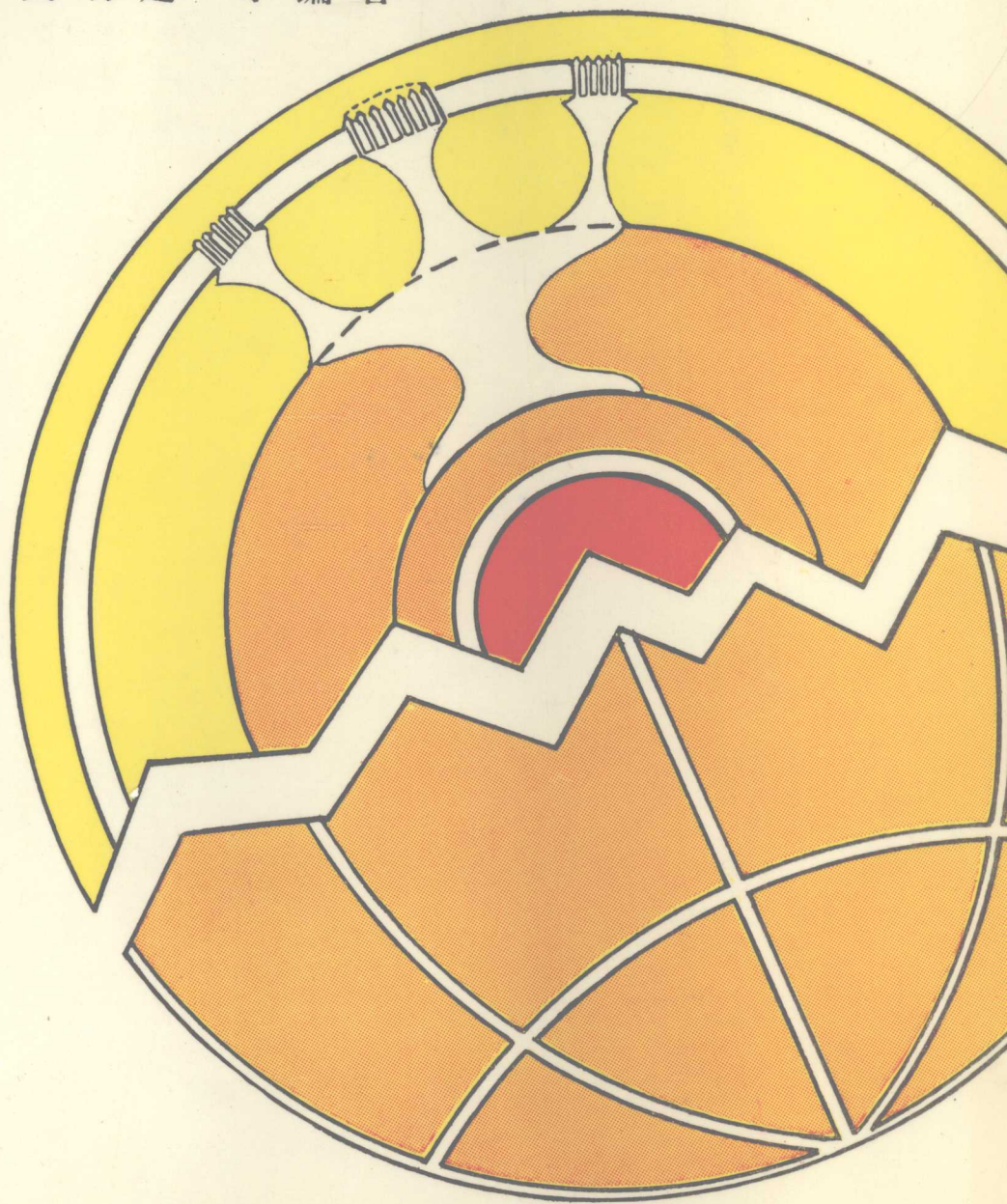


岩石圈 动力学研究

黄怀曾 吴功建 等编著



地质出版社

岩石圈动力学研究

黄怀曾 吴功建 朱 英 刘 伟 刘和甫
孙运生 肖宜君 张勤文 金 旭 孟令顺
洪大卫 徐志刚 唐连江 高恩元 程庆云 编著
傅维舟 潘 渝

(京)新登字 085 号

内 容 提 要

本书从全球的角度出发,较系统全面地阐述了到 20 世纪 80 年代末为止国外岩石圈研究的概貌和动向。依据 80 年代岩石圈研究中的全球地学大断面、大陆反射地震、大陆科学钻探、海洋调查等领域所取得的新成果,对岩石圈结构与组成,岩石圈运动学与动力学,大陆岩石圈的形成与演化等一系列基本问题进行了阐述和讨论。此外,结合我国现有的地质、地球化学、地球物理等方面的资料,就中国岩石圈结构与构造特征,陆壳的发生与发展,碰撞造山带与盆地,构造应力场与深部构造格局等方面的问题进行了探讨。

图书在版编目(CIP)数据

岩石圈动力学研究/黄怀曾等编著. —北京:地质出版社,1994.9

ISBN 7-116-01667-8

I. 岩… II. 黄… III. 岩石圈—动力学—研究 N. P634.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 04547 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑:官毓兰 方义

*

北京航空航天大学印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:8.625 字数:210 000

1994 年 9 月北京第一版·1994 年 9 月北京第一次印刷

印数: 1—600 册 定价:7.50 元

ISBN 7-116-01667-8

P·1345

序

地球是一个极其复杂的地质、地理、物理、化学和生物体系,同时又与环绕它的水圈、大气圈和生物圈之间长期相互作用;它作为太阳系中的一颗星球,已有46亿年的漫长历史。自有人类以来,对地球上发生的各种现象就开始了各式各样的猜测和解释;自有文字记载以来,就记述了地球上所发生的各种自然现象,并力图寻找符合客观实际的科学答案,然而,要认识地球的形成、发展演化过程及现状,绝非一件易事。60年代以来,随着人类社会的发展和科学的进步,使传统的地球科学受到极大的挑战和冲击,活动论的板块构造学说应运而生,它吸收了多学科的成果,为解决重大的地球科学问题提供了一种新的指导思想。通过国际合作,地球科学家逐渐悟解到,大家所研究的是一个共同的地球,同时也了解到应把地球作为一个系统来看待,它的研究工作是个系统工程问题,因为它所显示的现象间彼此是相关的,又互相制约的。只有不断地发展和完善观测地球的新方法和新技术,才能使认识不断深化,把表面的现象与地球内部活动联系起来,并由区域扩展到全球。威尔逊(T·Wilson)等人将活动论的兴起,称之为—场地球科学的革命,大陆漂移说、海底扩张说、板块构造说及全球构造说等相继出现,使地球科学出现了五彩缤纷的繁荣局面。对于地球的研究不断深化,一个一个国际合作计划相继出现,80年代的岩石圈计划就是继50年代末国际地球物理年、60年代国际上地幔计划和70年代国际地球动力学计划之后诞生的一项大型国际合作计划。

在国际上地幔计划即将结束的前夕,由国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)和国际地质科学联合会(IUGS)共同倡议,在80年代应制定一个国际性多学科地球科学研究规划,以便继续完成许多尚需解决的重大关键问题。为此,国际科学联合会理事会(ICSU)确立了80年代地学前沿:“国际岩石圈动力学和演化:地球资源和灭绝灾害的纲要”计划。该项计划的主要任务是阐明岩石圈的性质、成因、演化和动力学。尽管海洋岩石圈的研究还要继续,但把侧重点放在大陆和大陆边缘。为了组织和实施该项计划,国际上曾召开过各种大型科学会议和专题讨论会,提出了12个关键性和意义明确的研究课题。为了达到它所规定的目标,还相应地建立12个工作组和8个协调委员会。后五年改组了岩石圈委员会,调整了机构,改设了6个工作组和7个协调委员会。

国际岩石圈委员会强调了实现地质学家、地球物理学家、地球化学家和大地测量学家间的紧密合作,促使地球科学的多学科相互渗透;还强调了国际间的科技合作;要加强从事基础研究与应用研究地球科学家之间的交流与协作;推动和促进发展中国家的地球科学;要充分认识采用先进技术的重要性,它们能在岩石圈探测与研究中取得突破性的进展。业已取得的许多重大成果,已刊登在各种有关的杂志上,并出版了一些专著和图件。其中包括:大陆地震反射剖面、全球地学断面、世界应力图、大陆深钻、计算机层析成像和地壳三维结构等成就为科学界所重视。

国际岩石圈委员会考虑到,岩石圈计划虽已取得许多令人鼓舞的成果,但从地球整体看,认识得还很不够;而已经取得的一些研究成果中,有些还有待于今后的验证;在学科结合

上多限于地质与地球物理,地球化学和大地测量的结合则刚刚开始,世界上少数的大陆深钻,揭示了地质与地球物理的解释上的不一致,以及出现的一些新现象等等,确认岩石圈计划需要延续。通过反复的酝酿和讨论,确定了90年代地学前沿为“国际岩石圈-生物圈计划”。该项计划由四个分支组成,它们是全球变化中的地球科学、现代动力学和深部作用、大陆岩石圈和大洋岩石圈。岩石圈委员会改工作组为任务组,为期三年,如需延长,待对成果进行评价后再定。初步确定了14个任务组和5个协调委员会,推动该项计划的落实与实施。

我国对岩石圈的探测起步较早,与国际上的时间相差不多,然而进展迟缓,一段时间又曾失去了参加国际合作计划的机会。直至80年代,我国地球科学家才积极要求参加到国际岩石圈计划中去,并希望能制定出我国的岩石圈研究规划。地质矿产部对岩石圈探测与研究十分重视,拨了专款,并在1987年2月召开了地质矿产部深部地质地球物理协调领导小组第二次会议,确立了“中国岩石圈结构构造的地质、地球物理综合研究项目”,下设六个课题,其第6课题为“中国岩石圈研究现状、问题及今后工作建议”,编号为88003-3,时间为两年。它的主要任务是首先弄清国际岩石圈探测与研究的现状和问题,在此基础上结合我国具体情况,提出今后工作的建议。中国地质科学院岩石圈研究中心接受任务后,联络了地矿部地质所、矿床地质所、中国地质大学(北京)、长春地质学院及航空物探遥感中心的十余名地球科学家共同参与。先由各研究人员分别编写分报告,在此基础上,项目负责人作进一步综合、补充,最后文稿虽由少数人执笔,但应视为集体劳动的结晶。各章执笔人分别为:绪论、第一至五章黄怀曾,第六章唐连江,第七章洪大卫,第八章肖宜君、黄怀曾,第九、十章黄怀曾、徐志刚、刘和甫、洪大卫。最后由吴功建审阅全文并修改定稿。

根据任务的要求,我们用八章篇幅来论述国际岩石圈探测与研究的现状和问题,两章来论述中国岩石圈现状和问题(受出版经费所限,删去了“中国岩石圈研究现状”及“我国岩石圈今后发展方向与建议”两章及若干图件。)之所以这样安排是由于:国际上做得多,我国做得少;我们没有参加前几个国际合作计划,需要对之有个较系统的了解,以避免研究上的重复,和能在一个较高的起点紧跟国际地球科学的前沿;也便于寻找我们的差距,结合我国的实际,确定主攻方向,建立具有中国特色的地球科学模型和新的理论,一方面为国际岩石圈计划做出我们自己的贡献,另方面为解决我国新资源的寻找,减轻地质灾害和保护环境提供有科学依据的基础资料,促进我国“四化”的实现。

本书既可供各级领导制定今后计划和安排工作的参考,又是从事岩石圈探测与研究的专家与学者的一本简要而系统的参考资料,也可作为大专院校学生和研究生学习的教材。由于我们的时间和知识面都有限,对于如此庞杂的岩石圈内容来说,进行多学科的综合研究只是个尝试,甚感力不胜任,其中疏漏之处和错误在所难免,望读者批评指正。

吴 功 建

目 录

绪 论	1
一、岩石圈定义	1
二、研究岩石圈的目的和意义	2
第一章 地壳的结构与组成	3
一、大陆地壳	3
二、大洋地壳	6
三、过渡壳	8
四、低速带和壳幔混合带	9
五、莫霍面	11
第二章 地幔的结构与组成	14
一、岩石圈地幔	14
二、软流圈	17
三、深部地幔	20
四、地幔的不均一性	22
第三章 岩石圈成因和演化	26
一、地壳的生长	26
二、水平运动与垂直运动、沉陷与隆起	28
三、新生代、中生代山脉	30
四、中生代前的构造	32
第四章 岩石圈应力与应变	35
一、岩石圈应力	35
二、构造活动区应力、应变的释放和积累	36
三、汇聚边缘的应力与应变	37
四、碰撞造山带的应力与应变	39
五、大陆裂谷带的应力与应变	40
六、地壳和上地幔流变	41
第五章 岩石圈运动学和动力学	44
一、海底扩张与大陆漂移	44
二、地幔对流	45
三、重力牵引作用	46
四、热点或热柱	47
五、重力均衡补偿	49
六、膨胀论	50
七、地球自转	51

第六章 板块运动	53
一、板块的驱动力	53
二、板块运动及参照系	55
三、俯冲与弧沟系	56
四、大陆板块运动	57
五、地体	58
第七章 全球构造和岩浆活动	61
一、全球构造和岩浆活动的关系	61
二、板块边缘的岩浆活动	62
三、板块内部的岩浆活动	67
第八章 国际岩石圈研究动态	76
一、岩石圈研究的背景	76
二、80年代国际岩石圈研究活动	77
三、岩石圈研究展望	80
四、岩石圈、地球与宇宙空间研究中的现代科学技术	82
第九章 中国岩石圈研究——对某些问题的认识	88
一、碰撞造山带的构造演化	88
二、陆壳的形成与演化	91
三、沉积盆地及地球动力学	95
四、构造应力	100
五、中国岩石圈结构与构造特征	102
第十章 中国岩石圈研究中存在的问题	107
一、青藏高原的隆升	107
二、陆壳的发生与发展	108
三、块体运动和内部变形	110
四、下地壳和上地幔性质	111
五、岩浆生成与岩浆活动	114
六、特提斯构造带	116
参考文献	118

绪 论

一、岩石圈定义

人们早就提出了地球成层构造模型。地震学家们根据地震体波的走时、视速度、振幅以及面波频散等可以得知地球内部P波和S波速度随深度的分布,从而由表及里分出地壳、地幔和地核。随着进一步深入的研究,发现在上地幔的上部有一由柔性塑性带组成的低速层,称之为软流圈,位于软流圈之上的地球坚硬外壳称之为岩石圈。也就是说,岩石圈由地壳与软流圈以上的地幔盖层(即岩石圈地幔)两部分组成,地壳与地幔之间为莫霍面所分隔。相对而言,地震学揭示出来的信息,对研究地球刚性表层的结构、构造等特征,远比其它方法丰富和可靠,所以,现在一般沿用的岩石圈定义都以地震学家的概念为基准。地球表面刚性外壳是一个既统一又可分割的综合体,它可分成彼此不同又互有密切联系的块体,不同块体之间以连续的地震活动带分开,我们称这些块体为板块。板块之间不仅可以呈聚敛、离散和滑移运动,同时,它们又共同在下伏的软流圈上移动,不断调整彼此间的相对位置。在不同的板块上,地壳的组成是不同的,既可以是纯粹的洋壳,也可以是纯粹的陆壳,还可为二者的结合。岩石圈的厚度不是固定的,也难以确定,通常认为在大洋中脊处接近于0,到大陆下一般在150km左右。

对于上述概念,部分地球物理学家和地球化学家提出了异议,为获得更精确的板块模型,需了解地球内部物质上升到地表或地表物质沉陷到深部时要发生什么样的地质作用?这就必然要确定岩石圈、软流圈乃至深部地幔的物理、化学、岩石学及运动学、动力学特性。于是,有些学者根据这些特性,对岩石圈还分别赋予以下新的含意^[1]:

根据力学性质,载荷或卸荷的调整幅度,计算出影响弹性或挠性程度的最大深度,从而将岩石圈深度定为(15—40)km;

以热状态确定的岩石圈,由热传导保持的地球冷外层厚约100km,这种岩石圈在大洋中脊处最薄,远离中脊逐步增厚,但大陆热岩石圈厚度则是一个有很大争议的问题;

岩石圈与软流圈之间存在一个化学和(或)矿物成分的界面,因此应以物质成分的变化确定二者之间的界线;

大地电磁测深揭示,上地幔上部存在一个高导低阻层,其上为低导高阻层,两者分属为软流圈和岩石圈。

由上可见,岩石圈尚没有一个为地震学家、构造物理学家和地球化学家共同接受的定义,各自都从自身角度出发去研究岩石圈,这无疑对地球表层的研究和全球地质作用的现代概念起着巨大推动作用。但迄今为止,对岩石圈的力学性质、热状态及物质成分等方面的基本物理、化学参数尚不能确切地肯定,还存在许多扑朔迷离的问题,因此,要将岩石圈的化学成分、物理性质、地质作用过程综合起来,下一个精确的定义,目前尚不可能。

二、研究岩石圈的目的和意义

地球是人类赖以生息繁衍的方舟,它一方面慷慨地奉献出自己的一切,另一方面又给人类带来了巨大灾难。同时,由于人类自身对自然界的破坏,我们正面临着资源、能源、环境、生态、人口等方面的严峻挑战,为了解决与人类生存攸关的这一系列重大问题,我们必须开展对地球的研究,并把对岩石圈的探索作为我们的起点。

80年代,国际上把岩石圈研究列为地学的前沿课题,也是固体地球科学中最重要的课题,今后十年岩石圈的研究将会更加蓬勃的展开,现已制定出新研究计划(见“国际岩石圈研究动态”)。科学家们为开拓人类新生活,正在做不懈地努力,我们深信,通过这种长期的努力,应该而且也能够逐步达到:

1. 为满足人类生活的需要,提供新的矿产资源和能源。随着工业生产的持续增长,能源与矿产资源的巨大消耗,必须得到补充,因此,我们必须不断寻找新的矿产资源和能源,同时还要开拓新的资源和能源领域,最有效地和最充分地利用地球赐给我们的财富。

2. 提供合理评价各种所需资源限度的背景信息,以便人们对未来社会生产与发展作出合理的安排。岩石圈中赋予的各种矿产资源和能源是有一定限度的,而且还存在着地理上的分布不均。在经济建设中,必须根据资源的分布和数量,进行有效的投入,避免盲目建设带来的巨大浪费,同时还可尽早确定生产方式做好准备。

3. 最合理利用消耗性能源和矿产资源,从而制定出环境保护和维持开发之间的科学平衡计划。由于人类对能源、矿产资源的无计划开采和使用,导致大气中 CO_2 急剧增加,放射性物质和有毒物质污染日益严重,等等。如再不加治理和确定环境保护与维持开发之间的合理关系,势必危及人类的安全。

4. 为生活和工业建设提供科学的安全保障。一些工程建筑促使岩石圈变动,如某些水库区诱发人为地震,抽取地下水造成地表下沉,等等。因此,在建筑某些设施时,应充分注意到可能存在的潜伏危险;

5. 评价、预测和减轻地质灾害。地质灾害频频发生,始终威胁着人类的生活和安全,尽管至今,利用最新的科学技术仍然做不到人定胜天,但我们首先应该通过建立在科学基础上的有效分析和准确预报,来减轻地质灾害。如果我们能准确预报大地震、火山、泥石流、山崩、滑坡等灾害发生的具体时间和具体地点,便可以减少不必要的损失。

6. 为开辟新的生活圈提供资料。现在已经注意到,有限的地球容纳不了急速膨胀的人口,人类需要开辟新的生活空间,最大的可能是转入地下建立穴居生活,而不必侵占动植物的世袭领地,还可增加农作物种植面积,也有利于生态平衡,况且地下冬暖夏凉,更可减少能源消耗。

7. 促进基础科学的发展和技术的进步。岩石圈研究的范围和内容十分广泛,涉及到大洋和大陆下岩石圈的成因、演变及其动力机制,这种研究依赖于新概念、新技术、新思维,现今地学事业飞跃进步就是建立在这个基础之上的。反过来,随着岩石圈研究工作的深入,又要求有更高的技术、更新的理论,从而推动整个科学事业的发展。

当今,人类业已进入探索宇宙空间、征服海洋和揭示地球奥秘的新历史时期。现代地球科学的研究已远远超越岩石圈的范畴,而且将岩石圈纳入到整个地球乃至星系的研究之中。这不仅使我们对岩石圈的内涵,而且对研究它的目的和意义都会有更深刻的理解。

第一章 地壳的结构与组成

一、大陆地壳

地盾、地台、古生代与中生代褶皱带、年轻造山带、陆内裂谷带等不同构造单元内,地震波速的明显变化实质上反映了不同地区大陆地壳物质组成和物理性质上的差异,岩石学和实验岩石学亦证明了这一结论的正确性。因此,很难得出关于大陆地壳构造的明确概念,但就整个大陆地壳的总体特征而言,对其分层通常有两种看法,第一种:大陆地壳除上覆沉积层外,由三个地震波速层组成,随深度增加依次为,上地壳花岗质岩层, $V_p=(5.9-6.3)\text{km/s}$,中地壳花岗闪长质-闪长质岩层, $V_p=(6.4-6.7)\text{km/s}$,下地壳玄武质岩-变质玄武质岩层, $V_p=(6.8-7.6)\text{km/s}$ ^[2,3,4]。花岗质岩层不仅出露于地表,亦为许多钻孔所揭示,众所周知,它由沉积岩、变质岩和火成岩组成,地震波速也表明与花岗岩和长英质变质岩的波速相当。花岗闪长质-闪长质岩层主要由片麻岩、混合岩和角闪岩组成。1970年以来,苏联科拉半岛超深钻井揭露了属于中地壳的太古宙地层,其 SiO_2 含量中等,为闪长质岩类,地震测深资料也表明,该层与闪长质岩类的速度一致^[5,6]。玄武质岩-变质玄武质岩层的P波速度值与玄武质岩类的P波速度值基本上在同一区间内,故认为由玄武质岩类组成。第二种:由上地壳花岗质岩层(硅铝层),下地壳玄武质岩层(硅镁层)组成。二者之间有一不连续的康拉德面。大陆地壳厚度变化较大,总厚度在(30—80)km之间,通常为(30—38)km。

近年来不断涌现的新资料表明,陆壳的垂向结构要比上述模式所描绘的情况复杂得多,而且,上述地壳分层与许多实际情况也不相符合。首先,许多地震资料揭示,康氏面并不是一个清楚而连续的间断面,科拉半岛超深钻井资料证实,原预测在地下深7km处应有康氏面,实际上并不存在,而在该深度以下均为太古宙斜长片麻岩、花岗片麻岩和角闪岩,只是随着深度增加角闪岩夹层增多^[5,6]。其他地质和地球物理资料也表明,地壳内部虽有时存在一个上、下岩性截然不同的界面,但更多地呈连续过渡关系。其次,地表上不少花岗岩和流纹英安岩,其地球化学特征暗示来源于地壳深部,这很难甚至不可能从玄武质母岩中分异出来。再次,在下地壳中不但发现有许多与理论成分不一致的麻粒岩,而且也发现有硅铝质岩层和沉积岩层。最后还要指出,出露于地表的下地壳麻粒岩捕虏体,与相似成分的上地壳岩石相比,放射性元素并不亏损^[7,8],而详细研究不同构造地区的热流和放射性元素分布后,所提供的现代热流模型则要求下地壳中放射性元素有普遍亏损,二者显然是矛盾的。

以上种种事实说明,从上地壳到下地壳的化学成分可能较为接近,显然与上述的地壳分层大相径庭。1987年在加拿大温哥华国际大地测量及地球物理联合会(IUGG)第19届大会的学术讨论会上,西方科学家们报告了他们最新研究成果,认为地壳内地震波速的变化是一个连续的系列,不存在二个或三个层次的阶梯式跳跃,波速随深度增加主要是由组成物质中孔隙压力变化所引起而非化学成分所致^[9]。地球物理学家、地球化学家和地质学家们终于在这一点上统一了认识。

实际情况并非如此简单,部分陆壳化学成分的一致,掩盖不了物理性质上的差异及另一部分陆壳化学成分的不均一性,这些认识是基于:

1. 化学成分、温度、压力是决定矿物相的三大因素。不同构造带或不同地区内,由于热动力背景不一样,温度、压力等物理条件也不一样,但它们彼此间互相依存又互相制约,于是在地壳的纵横方向上,绘制出绚丽多彩的变质相图,从而形成不同的变质岩组合。一般说来,在沉积岩之下的结晶岩系中区域性变质作用,当温度逐渐增大时,可以见到,绿片岩相→角闪岩相→麻粒岩相;当压力增大时,可以见到,红柱石带→蓝晶石带→蓝闪石带。现已发现,自然界中并不完全遵循这一规律,因为还要取决于其它因素,尤其是物质成分的影响,如地壳中水和 CO_2 的重要作用,此外地幔顶部和下地壳的脱硫作用,那怕只有微量的 SO_2^{2+} ,对地壳的性质都会有强烈的影响。

2. 不同构造地区,地壳波速结构明显不同。在一些地盾地台区,地震纵波波速突然从 6.8km/s 跃变到 8.1km/s ^[10,11],缺失 $(6.9-7.6)\text{km/s}$ 波速层。岩石学和地球化学也证明了花岗闪长质-闪长质岩类可直接覆于莫霍面之上,只是在一些演化较差的地台区,年轻造山带和活动大陆边缘中才发育有 $(6.9-7.6)\text{km/s}$ 速度层。这种波速层的缺失和跳跃,绝非以孔隙压力的变化所能解释,恐怕还是物质成分上的差异所致。

3. 流变学和磁大地电流测深的最新资料支持地震研究成果,表明上、下地壳物理性质存在明显的差异。

4. 陆壳内有玄武质岩石的存在,大洋地壳还能以无根形式仰冲到增生大陆边缘之上,如北美西部弗朗西斯科杂岩体中见到的景象^[12],印度恒河平原之下也可能有类似的情况。

5. 地壳叠覆是一种常见的地质现象,尤其在多次构造活动区更为常见,如北美东部阿巴拉契亚山的逆掩断层之下,有俯冲的古洋壳和原与非洲相连的陆块^[13]。

从上述错综复杂的情况可以看出,地壳的组构是复杂的。不过,我们还是尊重前人的分层意见,而勿须机械地纠缠在二分还是三分方案上,通常应根据某一地区压缩波速度变化的具体情况而定,在正常情况下,可分上、下地壳或上、中、下地壳。这种划分并不意味着化学成分上的差异,切不可与硅铝层、硅镁层或花岗质层、花岗闪长质-闪长质层、玄武质层对号入座。如果一定要与成分对应起来,在地壳二分时,上、下地壳可能全应归为花岗质-闪长质层;在地壳三分时,上、中地壳纳入花岗-闪长质层,下地壳可为玄武质层,也可为单一的花岗闪长质-闪长质层。换言之,同一性质的构造带内,上、下地壳或上、中、下地壳化学成分可以较为接近,也可以相差甚大。不同性质的构造带内,地壳组成是不一样的。

地壳的最大差异,主要反映在下地壳的变化上。就现有资料分析,下地壳可能有多种类型,当它由花岗质-闪长质岩类组成时,波速随深度增大;当它由花岗质和玄武质岩类混合组成时,有很多的高速反射层。不像早期地壳模式推测的那样,下地壳仅由辉长岩或榴辉岩组成,因为辉长岩和榴辉岩的 P 波速度皆比下地壳常见的波速大。在含水条件下的实验结果表明,角闪岩很可能是下地壳的组成部分,但通过对区域进变质地区的研究发现,随着埋藏深度的增大,区域变质程度相应增高,角闪石、云母等造岩矿物中的结晶水将被析出^[14]。

根据地球物理模型、地壳生长方式、下地壳包体和出露的大陆地壳剖面等不同方法估计的化学成分范围很宽(表 1),可从铁镁质到花岗质。

综合各方面的资料来看,下地壳总体成分应是闪长质-花岗闪长质,所设想的为长英质麻粒岩、闪长岩、斜长岩、角闪岩的某种组合,只是在古造山带和现今活动陆缘的下地壳底部

表 1 地壳平均化学成分

$w_B^{\oplus}$	部 位	陆 壳					洋壳 ^②	
		上地壳	下地壳		总陆壳			7 ^③
		1	2	3	4	5	6	
SiO ₂		65.5	49.2	61.0	57.4	63.3	58.0	49.6
TiO ₂		0.5	1.5	0.5	1.0	0.5	0.8	1.5
Al ₂ O ₃		15.0	15.0	15.6	15.0	15.3	18.0	16.8
FeO _{tot}		4.3	13.0	5.3	8.7	4.8	7.5	8.8
MgO		2.2	7.8	3.4	5.0	2.8	3.5	7.2
CaO		4.2	10.4	5.6	7.3	4.9	7.5	11.8
Na ₂ O		3.6	2.2	4.4	2.9	4.0	3.5	2.7
K ₂ O		3.3	0.5	1.0	1.9	2.2	1.5	0.2
MnO		0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
P ₂ O ₅		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Rb		110	2	10	56	60	42	4
Ba		800	50	780	425	790	350	60
Sr		325	500	570	410	450	400	180
La		30	10	20	20	25	19	3.5
Yb		2.0	1.0	1.2	1.5	1.6	2.2	2.7
Zr		220	30	200	125	210	100	100
Nb		25	3	5	14	15	11	5
U		2.5	0.1	0.1	1.3	1.3	1.3	0.2
Th		11	0.3	0.5	5.7	5.8	4.8	0.6
Cr		35	200	90	118	63	55	230
Ni		20	150	60	85	40	30	80

① 物质 B 的质量分数 w_B 的单位,对氧化物取%,对微量元素取 10^{-6} 。FeO_{tot} 为全铁含量。

② 包括沉积物。沉积物在洋壳组分中 $\leq 5\%$ 。

③ 资料来源:据 Cordie^[3]。不同部位的原始资料来源如下:

1. 据 Taylor 和 McLennan(1985)和 Shaw(1986);
2. 硅镁质下地壳,据 Shaw(1986)及捕虏体成分;
3. 长英质下地壳,据 Weaver 和 Tarney(1984);
4. 1 和 2 的 1:1 混合估计值;
5. 1 和 3 的 1:1 混合估计值;
6. 钙碱性安山岩平均成分(据 Taylor 和 McLennan,1985);
7. 混合来源洋脊玄武岩平均值。

可能有基性麻粒岩。

尽管对大陆地壳组成及纵向变化比过去了解得多了,但对于下地壳的性质及上、中、下地壳是否一样不均一?下地壳生热元素是否亏损?以及若地壳由变质沉积岩和变质火成岩组成,二者的比例如何?等问题还是模糊不清。

尤其要指出,地壳内的一些地震界面性质,可以有各种各样的成因解释,诸如静压载荷

下岩石加密作用、变质作用、相变、岩层不整合构造面、岩石成分的交替、地壳中存在高密度岩石的薄层或某种矿物的特殊夹层、岩石含水程度的急剧变化、存在延伸很长的断裂或脱滑面、沉积层与结晶基底界面、地壳中全球性机械应力作用等等。许多研究者指出,每个地震界面都有自己的性质,它可以是物性界面或构造界面或矿物相变界面等,若用统一的概念来解释,必然会导致错误的结论。实验证明,模拟深层的热动力条件,在密度不断加大的情况下,随着组成物质中孔隙压力增加,地震波速相应地缓慢增加,但没有发现有跃变。变质相变界面多半具有过渡的性质,因为变质岩的密度和速度特征首先取决于它们的成分和构造,而决不是变质相,例如,同为麻粒岩,在密度和波速上,基性成分的大于中酸性成分。现在已经知道,在上地壳内,确有物理-力学界面截切了其它地质构造。有时候,一些巨大的矿床、裂隙带、含水带和局部受热区等均有可能构成地震界面。但是地质学家们认为,最常出现的地震界面还是由不同矿物成分和化学成分,不同岩浆成因和变质成因的岩相界面;构造界面也不容忽视,尤其是在地壳上部。还应指出,地壳乃至莫霍面上的一些纹层状构造,会使各种不同的波混在一起,加之由于波的干涉作用而形成虚假的界面^[15]。

大陆地壳在横向上的变化决不亚于纵向上的变化。现已知道,地壳上部物质在增生区和消减区是不一样的,不同构造带的地壳组成、分层及厚度也不相同,就是在同一构造带内,断裂作用还可将地壳分成若干断块,造成地层重复或缺失。尽管我们已得出地壳在纵横走向上不均一的结论,但要细致地描述这种变化,作一张某一地区较为详尽的大陆地壳结构与组成的立体图,则往往因为资料不足而束手无策,即使勉强依靠推测做了,置信度也很低。造成这种结果的原因,一方面是对大范围的水平界面、波速结构、波速横向变化的了解甚少,另一方面是由于从获得的地壳结构和组成的信息中,得不到唯一解。各学科之间,甚至是同一学科不同研究人员对资料的解释和分析的结果亦是各异的。为此,必须提高研究的广度、深度和精度。应积极开展对反射波和折射波的综合研究,运用宽角反射和大陆反射地震进行长距离的观测,以宽频带代替窄频带,大大加密拾震器台阵,还要用爆炸源提高信噪比,以及开展对天然地震的S波震相、PS波转换的剪切波震相及其振幅特征的研究。总之要综合利用P波、S波,PS转换波和面波的成果,发展以地震波层析成像技术为基础的地壳三维结构探测研究,再辅以地壳电导率和热流值的测量,可得到地壳深部结构和各个层次物理特征的信息,并将测得结果进行对比。地质构造填图对侵入地质体、地球物理研究有十分重要意义,岩石学的研究,特别是地壳-地幔包体的研究,除了了解包体的化学成分和物理特征外,对包体的岩石学和显微构造特征的研究也是必不可少的,再结合实验岩石学方面的工作和广泛的地球化学调查,建立地球化学和地球物理统一模型,这对确定大陆地壳成分和所处的物理状态也是至为重要的,只有这样,才能大大提高我们对大陆地壳认识的深度。

二、大洋地壳

对大洋地壳组构的了解基于深海打捞、海洋勘探和地震资料基础上。洋壳厚度通常为(5—15)km,一些大洋岛屿可增至20余公里。大洋地壳分为三层,第一层上覆海洋沉积物,或称沉积层,厚度不一,从数百米到一公里左右,由没有完全固结的沉积物组成,与大陆沉积物相比,含较高的CaO和较低的SiO₂,其P波波速颇低,仅为2.2km/s。第二层洋壳上层,又称玄武岩层,主要为枕状熔岩,或含少量蚀变和变质的沉积物。洋中脊下大部分为低钾拉斑

玄武岩,只有少量高铝玄武岩和碱性玄武岩,反映了大离子亲石元素(LIL)普遍亏损,轻稀土元素(LREE)相对亏损,而重稀土元素(HREE)则相对富集,显示出贫化了的地幔特征^[3]。大洋地壳生成于大洋中脊,因此大洋盆地中的洋壳玄武岩成分与洋中脊玄武岩成分类似,只是由于大洋拉斑玄武岩的蚀变程度随着远离大洋中脊而增强^[16],导致Fe、K、H₂O、B、Li、Rb、U和Os以及Sr、Ba和轻稀土元素不同程度的增加。大洋中还有星罗棋布的海底火山高原,有的呈规律的线型排列,约占大洋地壳的一半,从皇帝海山链和夏威夷群岛采集的样品分析表明,它们主要为拉斑玄武岩,仅有少量碱性玄武岩出现在火山活动的最后阶段^[17]。玄武岩层厚度一般在(0.5—2.5)km之间,在大洋岛屿处陡然剧增,可达10km以上,P波波速约为5.2km/s。第三层洋壳下层,也称大洋层,厚约4.5km,P波波速(6.7±0.25)km/s。根据对蛇绿岩的研究,认为该层主要是由辉绿岩,辉长岩组成的席状岩墙杂岩体,这已为深海钻探发现的席状岩墙所证实,并与第二层玄武岩呈过渡关系^[18]。

虽然我们对洋壳的组成已有相当的了解,但至今仍存在不少争议的问题,诸如对大洋地壳化学成分虽然已有粗略的估计(表1),但其详尽的化学成分,尤其是大洋层的组成及下限(见“莫霍面”)仍很不清楚。Hess^[19,20,21]早就假设大洋层由蛇纹石化橄榄岩组成,因为(60—70)%蛇纹石与(30—40)%橄榄岩组合层的P波波速恰好与实际测量值相吻合。磁测也表明,大洋层的弱磁化与蛇纹岩磁化率是一致的,何况还从大洋层露头的断崖处挖掘到了蛇纹石化橄榄岩。然而,这种假设面临着一系列无法解释的困难。首先,大洋层的S波波速要比蛇纹石化橄榄岩中的波速大,这是因为蛇纹石比橄榄石和辉石泊松比高的缘故;其次,大洋壳的P波波速变化范围很窄,这就要求橄榄岩蛇纹石化的程度相当均一,而天然的橄榄岩蛇纹石化却变化很大;第三,蛇纹岩约含20%的水,Hess指出它是来源于地幔,但从玄武岩的研究中,上地幔中原始水份仅在0.1%左右;第四,Fox和Opdyke进行大量测量^[22]证明,海洋蛇纹石化橄榄岩磁化率颇高,与Hess测量结果正好相反。尽管由蛇纹石化橄榄岩构成大洋壳的设想已为大多数学者所摒弃,但仍有人坚持地震学上大洋层的含义。在现今解释大洋地壳厚度随年龄或远离洋脊而增厚时,也还有人认为是因橄榄岩蛇纹石化所致。大洋层具有低磁化强度,因而被认为与镁铁质成分不相符合,实际上镁铁质成分的缓慢冷却,可能形成结晶颗粒粗大的粗玄岩和辉长岩,这些岩石通常比玄武岩磁化强度还要低。另一种设想,大洋层为绿片岩相岩石组合,原岩为玄武岩,这虽满足了磁化强度随着玄武岩的变质而急剧下降和P波速度与大洋层相近的条件,但却不足以说明在相对短暂的冷却过程中,玄武质岩石会发生这样的转变。不过,毕竟有几处洋底发现了绿片岩,只不过它是热水溶液渗入到细脉和破裂带后形成的,不具有真正区域变质的意义。

洋壳的地震波速和厚度与陆壳相比,相对较均一,但年轻洋壳孔隙发育,常为热液充填,故波速偏低。转换断层处的洋壳异常薄,可能与岩浆不能充分补给有关。近些年来,运用多束回声仪、各种Seabeam、Sea MARC TAMU系统及洋底地震仪对大洋扩张中心的研究,发现了一系列不连续的规模不大的岩浆房,如劳盆地东部海底下的岩浆房,深3.5km,宽(2—3)km^[23],在东太平洋洋脊处也见有类似的岩浆房^[24,25]。地震、重力、热流及岩石学综合研究表明,快速扩张中心之下的岩浆房可沿走向逐渐变大或变小,最后在较大的脊轴不连续处消失。尽管岩石学资料指出,在缓慢扩张中心也可能存在岩浆房,但地震资料与热模式表明,规模非常小,可见岩浆活动的强弱和热流值的大小控制了扩张中心的形态。总的说来,对脊轴的细微形态、岩浆房的总体分布格局、规模大小、岩浆体的物理性质、化学成分、持续时间、物

质补给情况等等,还知之甚少,这也是当前海洋地区研究的重点之一。

随着多束回声测深仪、各种 Seabeam 系统、宽幅制图工具、多频道地震反射装置及海洋遥感卫星(Seasat)资料的广泛应用,再结合深海钻探和精确的热流测量,在获得大量信息的基础上,可作出精确的高分辨率的海洋图,而且是从静态的二维图象转向包括动态演化因素在内的三维图象,这将会大大丰富我们对大洋盆地下岩石圈的认识,对大洋地壳结构与组成也会提供更为充分,更为可靠的证据。

三、过渡壳

过渡壳主要发育在现代大陆边缘,这是大陆和大洋两种迥然不同地壳类型的过渡地区。不同类型的现代大陆边缘,地壳的结构与组成是不同的,就是在同一类型的现代大陆边缘中,处于不同构造演化阶段的地壳结构与组成亦不一样。一般说来,过渡壳厚(15—30)km,由薄层的大洋型硅镁质地壳和大陆型硅铝质地壳组成。大陆边缘往往是陆壳的增生带及洋壳的消减带,因此它的组构较陆内和洋内地壳复杂得多。

众多的穿越岛弧型活动大陆边缘的地震测深资料揭示,岛弧下面的地壳,可以是陆壳型,也可以是洋壳型,或介于两者之间的过渡类型。前者为成熟岛弧的特征,后者为不成熟岛弧的特征。日本具有为大陆上地震所特有的地震速度结构^[26],地壳厚度从海沟处开始增加,经弧-沟间隙带,上、中波速层迅速增厚,至日本列岛,逐渐达到正常陆壳厚度。清晰的三个波速层可与某些大陆地区类比,不过,其成分不一定与大陆上对应的速度层次相同,因为在岛弧发展过程中,深部岩浆的贯入,并在不同深度定位和最终的喷出,极大地改造了岛弧带。日本列岛广泛出露的花岗岩,使得人们相信,波速低的中、上层是由各种花岗岩、不同程度变质的火成岩和变质岩、沉积岩组成,与某些大陆区相比,前二者所占的比例可能更高。下层虽确认为是玄武质层,但缺乏强有力的证据。从强烈的岩浆活动看,下地壳还应是熔融岩浆储藏所,可能还会夹有由垫托作用(Underplating)形成的薄板状块体,目前尚没有见到地壳的细微结构的资料,因此无法证实这一推测。弧-沟间隙带沉积层之下,人们普遍认为,是由刮落下来的大洋沉积物组成的巨厚叠瓦状增生棱柱体,奇怪的是深海钻探中,为什么没有发现被刮落保存下来的远洋沉积物?偏偏是陆源和半陆源物质构成的浊积岩。对日本海沟的勘查也表明,内坡沟壁上基本不发育叠瓦状沉积柱。Uyeda^[27,28]作了较为令人信服地解释,他认为,中新世时日本海处于张应力状态,大洋沉积物沿俯冲板块上的堑-垒相间的锯齿口进入地幔,上新世以来,随着海沟应力状态的改变,才在本州外的海沟发育了规模很小的增生柱。还要指出,在多通道地震记录中^[29],陆坡下观测到一个明显的声波反射面,它究竟是大洋板块与大陆板块之间的滑动面,还是陆壳内部的玄武岩层与硅铝质岩层的不整合界面?这涉及到弧-沟间隙带原由硅铝壳构成,还是由硅铝壳和硅镁壳共同构成的问题。现更多地倾向于后一种意见,增生棱柱体不发育本身就说明了这一点。岛弧的陆侧,伴随有弧后盆地,地壳明显减薄,仅在洋壳上保留着薄陆壳,局部地区甚至已出现了洋壳。

马里亚纳岛弧可作为不成熟岛弧的实例^[30],它是在洋壳基础上发育的,该群岛由洋壳物质、岛弧拉斑玄武岩及其碎屑物堆积而成,间夹层状礁灰岩。由于远离大陆,而无陆源沉积。地壳厚 20 余公里,弧-沟间隙带上不发育增生棱柱体,岛弧内侧有一近南北向狭窄的马里亚纳脊岭,位于水下 1500m,从其上捕捞到始新世礁灰岩和火山岩,说明脊岭上有薄薄的

沉积盖层,地壳厚约 21km。再向西为西马利亚纳海槽,即弧后盆地,地壳厚 10km 左右,地球物理资料和地质资料均表明,是个正在引张的海盆,缺失陆壳。

不同类型的岛弧,地壳结构、组成与厚度差别很大,这首先取决于沟-弧-盆系发育的构造环境,是洋壳俯冲到陆壳之下,还是洋壳自身的俯冲;其次,受俯冲的速度和角度制约。人们曾就地壳组构与俯冲之间的对应关系作过尝试性研究,力图建立起行之有效的模式,可惜由于受研究程度的限制,因而具有相当大的难度。

安第斯火山弧型活动大陆边缘地壳结构,充分反映了增生作用的重要意义。以秘鲁中部为例,海岸外侧为最新形成的脱水俯冲杂岩,波速(2.0—3.6)km/s,该杂岩体横贯于大陆坡下部,构成 15km 宽的一个楔状体。从深海钻探和地震资料所揭示的物质组分来看,上地壳物质(包括沉积物和水)是可以被逆推推到大陆边缘之下,最后被卷入到大陆推覆体的深部地壳中的。(5.0—5.6)km/s 波速层出现在楔状体靠陆一侧,并延伸至中-上陆坡,为脱水的、强固结的海沟-陆坡浊积岩、半深海沉积以及与俯冲的玄武质板片混在一起的沉积混杂岩。这些自西而东不同的波速层统一为速率(1.5—3.0)km/s 的陆架-陆坡沉积物覆盖,其下均为俯冲带上的玄武岩板片。地质资料表明,玄武岩来自大洋板块内的洋壳,多通道地震记录暗示了由于逆冲断层作用,使大洋玄武岩破碎,而且速率增加的幅度与所含大洋板片的碎片量成正比。大陆边缘下较深的构造层为(5.7—6.1)km/s,为前寒纪叶片状变质岩。在前寒武纪结晶基底之下,深 30km 处波速达 8.2km/s^[9]。地震测深资料不仅反映了急剧的横向变化,还反映出朝陆方向地壳厚度显著增厚的趋势。在这里,我们强调了大陆边缘侧向生长对地壳结构和组成的重大影响,在中、南美洲西海岸外南北向海沟中,各处的增生棱柱体体积变化明显不同,究其原因,不仅与汇聚速率有关,还取决于海沟沉积物是否能得到充足的供应。顺便指出,从现代大陆边缘增生杂岩体中混有大洋玄武岩得到的启示,古大陆边缘中、下地壳也会是各种岩石的混合物。

转换型大陆边缘不仅硅镁质壳明显变薄,岩浆活动亦十分微弱,这是否意味着缺少来自地幔的硅镁壳的物质。

大陆边缘横向上不均一,并具有多种不同规模的难以捉摸的变化,因此,要探明大陆边缘的地壳组构是一件颇为艰难的任务,必须用在横向和纵向上具有很高分辨率的并能穿透很大深度的设备才能解决。遗憾的是,目前尚无一种地球物理方法能够提供这样的分辨率,现今分辨率最高的是用人工震源的地震探测法,并结合其它综合的方法和手段,对测量结果加以分析,比较,去伪存真,去粗取精,以求取得最为客观的效果。深潜海底的直接观察和测量,大大促进了对大陆边缘的认识,然而受经济制约,尚不能普遍开展这样的工作。

四、低速带和壳幔混合带

前已述及,地壳地震波速由表及里总体上由低变高,但在陆壳和过渡壳内,还会出现波速突变式的倒转,无论是古生代、中生代褶皱带或是年轻的造山带和现代大陆边缘,再或是地盾、地台区均可见到这种现象。传播速度突然降低构成的低速带,究竟具有什么样的地质含意?一直为人们所关注。

老的观点认为,地台、地盾区的一些低速带由花岗岩层引起,因为花岗岩虽具有(5.7—6.1)km/s 的传播速度。但当低速带伴随着高电导率和高磁化强度时,显然不能解释为花岗

岩,因为它的电导率和所含磁性矿物均不至于达到如此高的程度。值得重视的是科拉半岛超深钻揭示的事实,在4500m以下,突然遇到了异常破碎的变质岩带,其电导率很高。如果仅仅是破碎带,恐怕也难以使电导率增高,重要的是这里隐藏着大量炽热的含矿水溶液,其上有2km厚的火山岩作天然屏障。由于这种水的水压超过了岩石的抗张强度,以致形成无数条显微裂隙,从而使岩石的密度从 3.1g/cm^3 降到 2.9g/cm^3 ,波速相应降低,直到9km处,地震波速陡然增高^[32]。从前没有见到过变质岩中的这种水压破裂现象,它在大陆构造中可能占相当重要的地位。从这里又引伸出新的问题,即地壳浅部含水溶液破碎带可以构成低速带,能否适用于地壳深部呢?传统的观点认为,在不活动的热变质区,深(15—20)km以下,如果为麻粒岩相组合,只能存在少量的含水矿物或碳酸盐矿物,它基本上是干的,没有自由液体相存在,因为在这种深度压力下,即使处于正常的地壳温度下,自由液态水将因水化反应而完全被消耗掉,直至全部进入含水矿物中,促使麻粒岩相组合的退化变质。况且无论从实验研究还是根据地热场反应,都清楚表明水化反应是相当快的,排除了深部地壳中自由液态水持久存在的可能性^[33]。我们知道,干的长英质麻粒岩相组合是无法用以解释为什么会出现异常高的电导率;而如果是铁镁质成分的,电导率虽高,但P波速率不会那么低,因此仍有一些学者坚持含水流体相观点。他们提出,如果水在下地壳中呈连续的膜状体,游离水溶液还是可以存在的^[34]。这种牵强附会的解释,很难令人信服。尽管现在一般认为中、上地壳可以是湿的,但下地壳是干的,然而物理、化学证据的矛盾还不足以对深层低速带建立一个能自圆其说令人满意的模式。一般说来,运用物质成分或相的变化来解释,更易为人们所接受。

在年轻造山带和活动大陆边缘中的低速带则是另一番景象。我国西藏雅鲁藏布江以南,在(20—29)km深度上,有波速(5.7—5.8)km/s的低速层,顺走向断断续续延伸二、三百公里,它同时亦是波速扰动带和地震波衰减的低Q值(品质因子)带^[35]。大地热流测量指出,在这一深度上具有高热流背景。众多地球物理证据说明,这里可能是尚未完全固结的一些深成岩体,零星出露的时代颇新的花岗岩体证实了这一推论。位于阿尔卑斯山脉的瓦朗斯-勃朗峰一线东南的低速带,埋深(11—23)km,至阿尔卑斯谷地以西,该低速带消失。由于在阿尔卑斯山脉内,中、上地壳的重力推覆体极为普遍,下地壳推覆体或叠瓦片不甚发育,且研究程度也差,因此一般将这种低速带视为被水塑化的花岗岩基底内部蠕变变形带,但野外并没有任何构造窗能证实这一点^[36]。喜马拉雅地区的主中央、主边界冲断层也属于这类地壳块体滑脱构造带,沿这些软弱带可滑动数十至数百公里。滑脱带本身是具有一定厚度的糜棱岩带或韧性剪切带,而且在不同层次上滑动,因此同一地区可以不止一个低速带。

大洋中脊和边缘海盆地之下,测得 $V_P=(7.1-7.6)\text{km/s}$ 的波速层,现发现它在太平洋盆地中普遍存在^[36],只是在正常折射中,常常被掩盖。在大陆裂谷区,造山带和活动大陆边缘,可测到 $V_P=(7.7-7.8)\text{km/s}$ 的波速层^[3],因速度值介于下地壳和上地幔之间,称之为壳幔过渡层或壳幔混合带。借助于地震和重力的研究,Talwani等^[37]推测大洋中脊处玄武岩层之下,存在着一个巨大而厚的异常地幔层,其内存在大量供洋中脊喷出的玄武质熔融的岩浆。Lliboutry^[38]指出,这是由于上地幔受到对流的搅动,在大洋中脊处发生了分凝作用和局部熔融,较轻的玄武质岩浆上升聚集在一起形成的,而小部分上升到地壳中,构成洋脊中小的岩浆房(见“大洋地壳”)。显然,他们更倾向于把异常地幔层作为上地幔的组成部分,只是由于波速偏低,才称为壳幔混合带,与上地幔传播速度对比,又可称为低速带。这种假设似乎