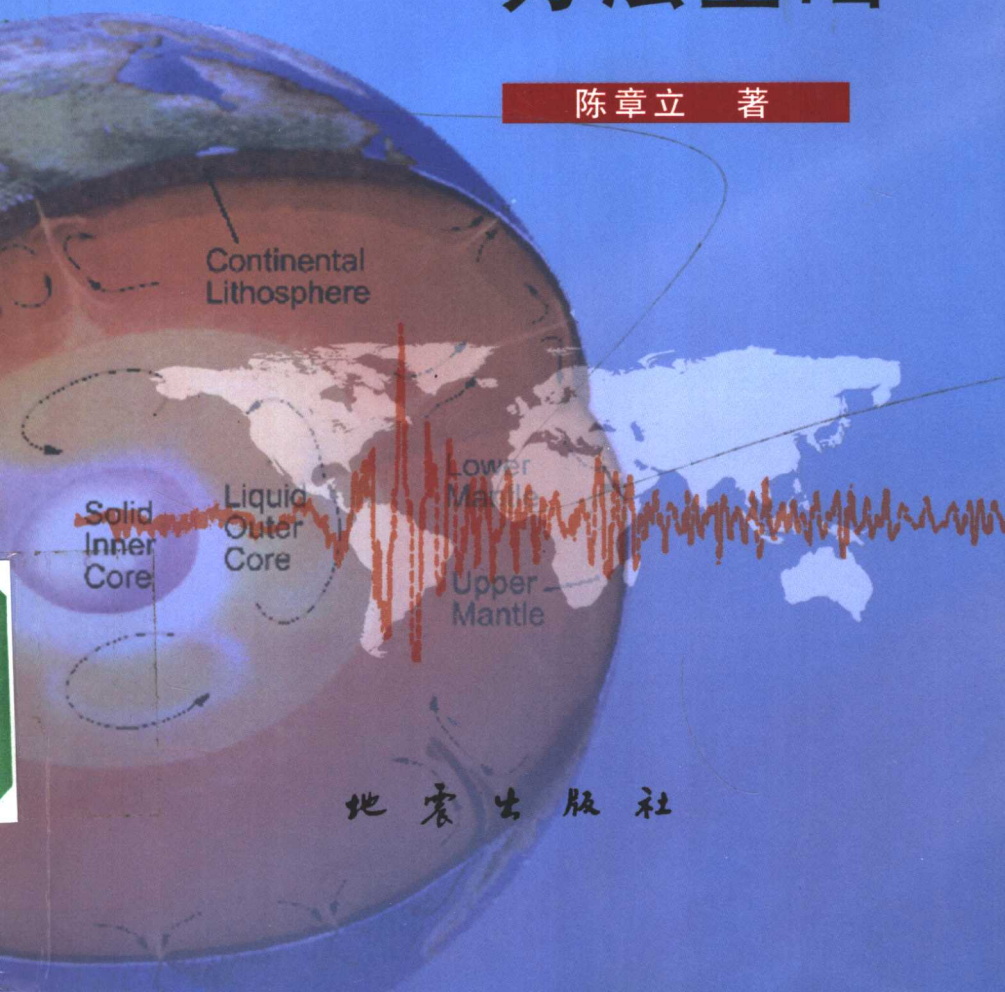


///

浅论

地震预报 地震学 方法基础

陈章立 著



地震出版社

浅论地震预报 地震学方法基础

陈章立 著

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

浅论地震预报地震学方法基础/陈章立著. —北京:

地震出版社, 2004.12

ISBN 7-5028-2593-2

I. 浅… II. 陈… III. 地震预报—地震学—方法— IV. P315.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 113320 号

地震版 XT200400232

浅论地震预报地震学方法基础

陈章立 著

责任编辑: 李玲

责任校对: 庞娅萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2004 年 12 月第一版 2004 年 12 月第一次印刷

开本: 850 × 1168 1/32

字数: 219 千字

印张: 8.125

印数: 0001—1000

书号: ISBN 7-5028-2593-2/P·1218 (3221)

定价: 20.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

前 言

自从20世纪60年代中期国内外开始开展短时间尺度的地震预报探索以来,在地震预报研究与实践中使用的方法很多,其中尤以地震学方法的研究与应用最为广泛。所谓地震学方法意指以观测的地震数据为基础,研究大震的可能孕育过程,进而对大震的发生作出预报的方法,即“以小震报大震”的方法。显然,这里所称的大与小是相对的,仅以震级的相对大小而言。地震学方法之所以被广泛研究与应用,不仅在于地震观测避免了其他前兆观测中的“干扰”问题,观测的物理量较明确,更主要的是运行于震源和地面接收点之间的地震波,犹如一盏盏明灯照射着地球内部,为人们克服地球内部的“不可见性”提供了重要的途径。地震学的发展不仅为人类认识所居住的地球的结构和寻找隐藏于地球内部的资源作出了重要的贡献,而且逐渐为地震预报提供了可能。回顾地震预报研究与实践的历史,可清楚地看出,地震预报问题的提出与地震预报研究的深入是与现代地震学自身的发展紧密联系在一起。可以期望,现代地震学的发展必将为人们进一步揭示地震孕育发生过程作出更大的贡献。但是,也应清醒地看到,自从开展地震预报研究与实践以来,地震学方法在地震预报的实际应用中虽然获得某些成功,但也遇到不少困难和挑战。这是由多种因素所导致的,其中一个不可忽视

的因素在于地震预报的实践者对浅源地震发生的物理实质及与之相关的地震学方法原理的理解和实践的经验。

鉴于地震学是在力学、固体物理学、地质学，乃至热力学、光学等基础学科有关理论的基础上建立和发展起来的，因而决定了要正确理解浅源地震发生的物理实质及相应的地震学方法原理，需要有多方面的知识。作为一个对地震预报执着追求 30 多年的实践者，作者对此深有体会。本人在 30 多年的工作生涯中，虽然在地震部门扮演过多种“角色”，但始终没有离开地震预报这一主题。集 30 多年的体会，可以用这样一句话来概括：面对地震预报这一当代世界性的科学难题，要使自己成为一个合格的实践者，除树立正确的价值观，积极实践外，加强学习，不断丰富自己的知识是至关重要的。离开工作第一线后，在与志同道合的朋友们致力于推进数字地震观测资料在地震预报中的应用之际，对此有了更加深刻的体会，于是围绕着地震预报地震学方法，对多年来点点滴滴学习的笔记作了整理，并根据学习的有关知识和 30 多年来实践的体会对地震预报地震学方法的分析原理作了一些思考，提笔写了这一拙见，但愿在告别执着追求 30 多年的工作之前，所整理的这一拙见能为繁忙于工作第一线的同行思考地震预报问题提供某些参改和学习有关知识提供一定的索引。全书共分三章。第一章基于正确理解浅源地震发生的物理实质是思考地震预报问题的基本出发点，围绕这一问题，介绍了有关基础知识。第二章鉴于地震预报研究与实践以观测的参数为基础，对地震预报研究与实践中经常论及的一

些地震参数和介质参数的物理含义和测定方法的基本原理作了简要归纳。第三章根据前两章论及的有关基础知识,对地震预报地震学方法的分析原理作了简要讨论。后语则是个人对地震预报的点滴体会。由于这是个人读书笔记和对地震预报地震学方法思考的整理,难以论及其系统性,完整性,且由于个人知识水平的限制,书中难免有不妥乃至错识之处,敬请读者予以指正。

序

我国地震预报工作开始于地震前兆的观测。最早为人们认识的前兆来自邢台地震现场。1996年3月8日邢台6.8级地震前小震活动的“密集—平静”现象及大量地下水的宏观异常是最早为人们认知的地震前兆。自此前兆预报地震的研究就在我国各个地震区广泛地开展起来。地震学者首先从地震序列特征、地震活动性异常、地震波异常等方面进行探索，发现了许多有用信息，据此发展了很多方法，粗算数十种，细算上百种。在过去30多年较成功的预测震例中，地震学的贡献经常是第一位的。例如在海城地震的成功预报中，地震活动显示的“密集—平静”现象发挥了重要作用。实践表明，预测地震的地震学方法在长中短临预报阶段都有不同程度的发言权，但报不准的情况也不少。地震学前兆如何判定的问题是个关键。

天然地震是在特定地质条件下，地下发生的物理现象。这个现象不是孤立的，而是一个物理过程中能量逐渐积累后突然释放的结果。只有认识了这个过程，才能正确地判定哪些现象是地震前兆，从而做出地震预报。问题在于人们对这个过程的认识至今仍很模糊。地震的基本成因、发展过程、产生方式、表现特征都认识得很不够。现代地震学的快速发展为这些问题的探索提供了有利条件。加里津说：“地震是霎那间照亮地球内部的一盏明灯”。通过地震波的运动学与动力学特征研究，人们既可了解地球

内部的分层结构，又可了解地震孕育地区的详细结构与物性特征；可以了解震源的动力环境与破裂的孕育发展过程，揭示地震前兆产生的机制，为判别不同阶段的地震前兆提供理论依据。对提高地震预测的准确性是极其重要的。近些年来，随着我国数字地震学观测、理论的发展，数字化台网的大量建设，高质量地震波观测资料的海量积累，为地震学在地震预测中潜力的发挥提供了有利条件。

如果将30年来在地震活动性、地震序列、震源机制等预测地震的经验与数字化台网提供的丰富资料紧密地结合起来，大力开展上述基本问题的研究，一定会找到地震前兆判定的有效途径和方法，从而大大提高地震预测的科学水平。在此情况下，将经典地震学的基本内容与数字地震学联系起来，进行综合论述，撰写一部《地震预报的地震学方法》专著是非常必要的。本书作者是一位长期从事地震预测研究与实践的学者，他既有坚实的地球物理基础知识，又有丰富的预测预报经验，对地震预测中的问题了解很深。书中系统地论述了地震学预测地震的理论基础、方法要点、存在的问题等等，对地震学的许多内容进行了深入浅出地阐述，可读性很强，是一部难得的专业读物。这本专著不仅对合理运用30年来已建立的许多测震学方法大有帮助，而且对利用数字化台网数据，发展新的预测方法和理论也有推动作用。

梅世蓉

2004年10月25日

目 录

第一章 思考地震预报问题的基本出发点 及有关基础知识	(1)
第一节 浅源地震发生的物理实质及有关问题	(1)
1.1 地球结构与作用于地壳的外力	(3)
1.2 地壳应力与应变	(17)
1.3 脆裂圈介质的强度与破裂准则	(39)
第二节 浅源地震孕育、发生的可能机制与过程	(58)
2.1 断裂带的摩擦作用与地震活动	(59)
2.2 地震孕育可能的物理模式	(64)
第二章 地震参数与介质参数的物理 含义及测定的基本原理	(76)
第一节 地震参数、介质参数的物理含义	(77)
1.1 地震基本参数	(77)
1.2 新的地震参数和介质参数	(80)
第二节 地震参数与介质参数测定的基本原理	(98)
2.1 地震仪器记录的一般表述	(99)
2.2 Q 值、台站场地效应和中小地震震源参数 的测定	(110)
2.3 震源机制解和 S 波分裂参数的测定	(133)
2.4 地震基本参数的测定	(147)
第三章 地震预报的地震学方法概述	(166)
第一节 地震活动空间分布图像的分析	(168)
1.1 大陆地区地震活动震中分布基本图像的分析	(169)

1.2	大陆地区地震活动震中分布动态图像的分析	(176)
第二节	地震活动时间序列的分析	(202)
2.1	地震活动三个基本参数随时间变化的分析	(203)
2.2	大震活动时间分布的不均匀性与 地震活跃期的划分	(216)
2.3	地震序列类型研究	(223)
后 语		(234)
参考文献		(242)

第一章 思考地震预报问题的基本出发点及有关基础知识

地震预报, 尤其短时间尺度的预报作为当代自然科学领域中一个直接关系人民生命财产的安全, 而科学难度很大、综合性很强的、复杂的前沿课题, 吸引了许多有志之士为之孜孜地追求, 广泛的探索。近几十年来, 国内外广泛的探索所涉及的学科方法很多, 其中地震学方法更受到普遍的关注和应用。而且, 不论是其他学科方法, 还是地震学方法自身又包含若干方法。对于每个探索者来说, 在研究和应用每种预报方法时, 虽然思考问题的角度可能有某些差别, 但归根到底都是从浅源地震发生的物理实质和可能的孕育过程出发。换句话说, 浅源地震发生的物理实质和可能的孕育过程是人们思考地震预报问题的基本出发点。这里有必要指出的是, 尽管在地震预报研究与实践中, 人们往往或从假定的某种可能孕震物理过程出发来分析所观测到的现象, 或通过对所观测到的各种现象的分析来探讨孕震的可能物理过程, 但不论用哪种模式表达的孕震的可能物理过程, 实际上都是对浅源地震发生的物理实质的进一步的、具体的描述。因此, 本章首先对浅源地震发生的物理作重点论述, 然后, 在此基础上对地震孕育的可能物理过程作简要讨论。

第一节 浅源地震发生的物理实质及有关问题

地震究竟是怎么回事, 是一个古老的话题。这实际是一个有待深入研究的有关地震成因的问题。许多专著 (傅承义, 1976; 郭增建等, 1991; 陈运泰等, 2000; 茂木清夫, 1982; Scholz, 1990;

Shearer, 1999) 或对地震成因作了专门的论述, 或在讨论有关问题时, 提及成因问题。傅承义 (1976) 指出: 对于地震成因问题, 主要的假说有三种:

(1) 断层说——地下岩层突然破裂, 形成断层, 释放出很大能量, 其中一小部分以地震波的形式传播出去, 造成地震, 能量的来源是岩石在构造应力作用下所积累的应变能。

(2) 岩浆冲击说——地下岩浆对四周岩石冲击而产生地震, 能量的来源是岩浆的化学能, 热能和动能。并认为岩浆冲击说可能是火山地震的合理成因。

(3) 相变说——地下岩石中的矿物晶体在一定的临界温度和压力下, 从一种结晶状态变到另一种状态, 发生突然的体积变化, 从而产生地震。能量的来源是固体结晶能的变化。

相变说虽然曾被认为是深源地震的可能成因, 但仍有许多争议。而断层说可能是浅源构造地震的成因, 被多数人所接受。其中一个具体模式为弹性回跳, 即认为, 地层在大地构造力的长期作用下发生变形。变形超过一定限度后, 岩层突然破裂和错动, 释放出所贮存的应变能而产生地震。对于几公里深的浅震, 弹性回跳似乎是最可能的成因, 但对更深 (几十公里) 的地震情况复杂些, 认为可能是粘滑的结果, 故将弹性回跳和粘滑一起作为浅源构造地震的可能成因。茂木清夫 (1982) 认为, 地壳不断受到大范围应力的作用, 在高压下地壳尤其是薄弱处容易发生剪切变形, 地震是地壳薄弱处发生急剧破裂, 应力和应变突然释放的结果。Scholz (1990) 认为, 在构造应力作用下, 断层作用的不稳性是绝大部分浅源构造地震的成因。陈运泰等 (2000) 认为, 天然地震是由于地球介质承受应力的能力骤然降低而自发地发生于地球介质内的一种快速破裂现象。因此, 可以看出, 地震成因仍是一个有待深入探讨的问题。对于预报的主要对象——浅源构造地震来说, 目前的研究多倾向于断层说, 这与大多数浅源地震发生于断裂带上或其近邻的观测事实是一致的。但也有少

数地震,并没有发现震前震中区有相应尺度的断层存在。因此,从描述浅源地震发生的物理实质上来说,这里比较倾向于陈运泰等(2000)的表述。这种表述符合有关岩石介质的破裂准则,可认为是一种普适性的表达。同时鉴于浅源地震发生于脆裂圈的观测事实和应力—应变的关系,这里在陈运泰等(2000)的基础上,对浅源地震发生的物理实质作如下概括:浅源地震是地球脆裂圈介质的某一有限部分(即俗称的震源区),在外力作用下发生非弹性变形和应变能的积累,在某时刻、其介质的强度低于应力,从而在地球内部自发发生的快速脆性破裂,释放出所积累的应变能的结果。外力作用、脆裂圈、脆性破裂、应力、应变、非弹性变形、应变能、介质强度和震源区是该表述中的关键词,要把握浅源地震发生的物理实质,必然涉及这些关键词的物理含义和破裂准则的问题。下面根据已有的研究,分别对其作简单的归纳和讨论。

1.1 地球结构与作用于地壳的外力

众所周知,力是物理学中一个既抽象、又具体的基本概念,指的是物体间的相互作用。物体A对物体B的作用叫做物体A对物体B的作用力,反之亦然。两者大小相等,方向相反。对地球的某一部分来说,其作用的外力包括两大部分:来自宇宙其他星体的作用力和来自地球其他部分的作用力。由于宇宙星体与地球的距离很大,按万有引力定律,前者的量值是很小的,而后者则涉及到地球结构的问题。这里不对已有的研究给出的地球结构作详细的复述,仅摘取与我们研究的问题有关的部分。然后,对作用于地壳介质的一些主要作用力作简要的归纳和讨论。

1.1.1 地球结构

地球不论是径向,还是横向,其结构都是不均匀的。这种不均匀性可分为许多级别,这里首先讨论的是一级的不均匀性问题。它在径向上,表现为分层结构,在横向上表现为板块构造。

(1) 地球的分层结构。

地震学对人类作出了许多重要的贡献，其中一个重要的贡献是发现了地球的分层结构。布伦 (Bullen) 在 20 世纪 40 年代初根据地震波速度的变化将地球分为 7 个同心球层区 (表 1.1)，至今仍被广泛的引用。

表 1.1 地球分层结构

代 号	区 域	深度范围/km
A	地 壳	0 ~ 33
B } C } D }	地 幔	33 ~ 410 410 ~ 1000 1000 ~ 2900
E	外 核	2900 ~ 4980
F	过渡区	4980 ~ 5120
G	内 核	5120 ~ 6370

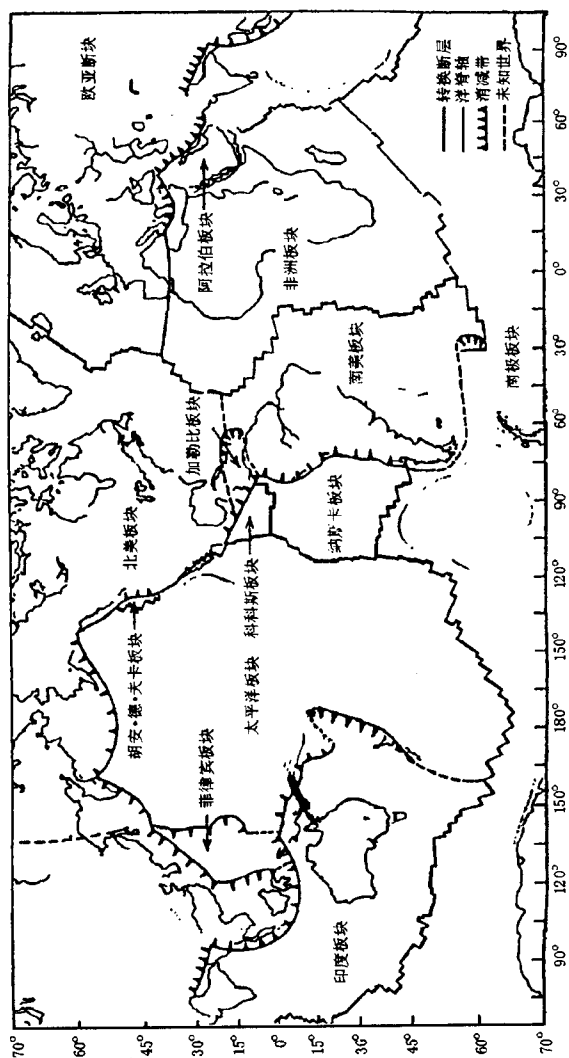
近几十年来有些研究还对上述分层结构作了进一步的划分，这里我们所关心的是地壳和地幔部分。通常把表 1.1 中的 B 层区称为上地幔。地壳和上地幔是地震预报研究中的主要对象。全球各地区地壳厚度不同，海洋地壳平均的厚度为 5km 左右，而大陆地壳平均厚度达 33km 左右，但各地有别，甚至相差较大。例如，在我国东部平原有些地区尚不到 30km，而在青藏高原则可达 65km 以上。地壳与地幔物质成分不同，密度有别，地壳平均的密度为 2.7g/cm^3 ，而上地幔顶部密度则达到 3.3g/cm^3 左右。因此，相对于地幔，地壳在重力上是稳定的。上地幔在某一深度处存在一个等温面，在该等温面以下的岩石温度比等温面以上岩石的温度高得多。通常将等温面以上的部分与地壳一起，称为岩石圈。在大洋盆地下面，岩石圈的厚度约为 100km 左右，而在大陆地区，岩石圈的厚度

要大得多，最大可达大洋盆地地区的两倍 (Turcotte et al., 1982)。等温面以下的岩石，因温度很高，易于发生固体蠕变，在地质时间尺度上，具有类似流体的性质，故将地幔在等温面以下的部分称为软流圈。

(2) 板块构造。

板块构造又称全球大地构造。海岭、岛弧和水平大断层等一些全球大的活动构造把岩石圈分割成若干单元，这些单元就叫做板块。板块构造首先是 Morgan, J. 于 1968 年提出来的。1973 年 Lepichon, X. 等人将全球岩石圈分成六大板块，即欧亚板块，美洲板块、非洲板块、太平洋板块、澳大利亚板块和南极板块。随着研究的深入，许多人又对板块作了更详细的划分。图 1.1 展示了其中一个划分的结果 (Turcotte et al., 1982)，在 Lepichon 等人划分的六大板块的基础上，进一步划分出若干次一级的板块。

许多人 (傅承义, 1976; Turcotte et al., 1982) 对板块问题作了进一步的论述，阐明板块构造是海底扩张的引伸。在大洋绵延几万公里的海岭上，有密集的弱震震中分布，反映这是一条巨大的破裂带。地幔热物质沿该破裂带上涌。由于这种上涌，在张力的作用下，海岭两边的板块作彼此分离的运动 (即所称的海底扩张)。当两个板块彼此分离时，其空隙为上涌的热物质所填充。上涌的热物质在由海岭向两边流动的过程中，逐渐冷却增生在岩石圈的底部，成为板块的一部分。同时，上涌的地幔热物质在流动过程中的逐渐冷却，导致体积收缩，密度明显增大。因此，尽管几公里厚度的大洋地壳相对于地幔在重力上是稳定的，但大洋岩石圈作为一个整体，相对于之下的软流圈，重得使其处于重力上不稳定的状态。这使得大洋岩石圈在岛弧前面的海沟处下沉到软流圈，即出现通称的消减作用。而在大陆地区，由于其厚度比大洋地壳厚得多的大陆地壳，岩石更富含硅质，其密度明显小于大洋地壳的玄武岩，使得大陆岩石圈在重力上是稳定的，不在海沟处出现消减作用。



1.1.2 作用于地壳的外力和中国大陆地震的力源

自从开展地震预报研究与实践以来,地震的可能力源一直是人们关心和致力于探索的重要问题。显然,按力的物理含义,对不同的区域由于相互作用的物体有别,其地震的力源也应有所差别。这里我们关心的是中国大陆地震的力源问题,但这离不开对作用于大陆地壳的可能外力的总的认识,因此,下面首先根据已有的研究对作用于大陆地壳的可能外力作简要的归纳,然后在此基础上对中国大陆地震的力源问题作粗略的讨论。

(1) 地幔物质对流与水平和垂直的作用力。

地幔物质对流是地球科学中的一个重要的假说。虽然至今没有关于地幔物质对流的直接观测事实,但由于这种假说较成功地对大陆漂移、造山运动、重力异常和热流的分布,尤其是对板块运动作出了较合理的解释,因而普遍认为地幔物质对流是客观存在的。

前面论及了由于地幔热物质沿海岭上涌,在张力的作用下,海底扩张,海岭两边的板块在水平方向上作分离运动,也论及了由于重力上的不稳定性,大洋岩石圈板块在海沟处下沉到软流圈里。这种水平和垂直运动的合成,使大洋岩石圈板块在海沟处的下沉不是垂直的,而是朝大陆岩石圈板块下面俯冲。在这俯冲的过程中,一方面遇到周围地幔里密度越来越大的岩石,同时由于围压随深度增大,俯冲的大洋岩石圈板块自身岩石的密度也相应增大,只要俯冲的大洋岩石圈岩石的密度比周围地幔岩石的密度大,这种俯冲作用就继续下去,直到两者的密度大致相同为止。由于俯冲的岩石圈岩石的密度越来越大,引起了向下的体力作用,使得俯冲的岩石圈板块边缘和海沟里的沉积物剧烈变形,从而导致在俯冲带上地震活跃,且不同深度的震源斜插排列。另方面大洋岩石圈板块的这种俯冲作用,驱动了大陆岩石圈板块与之发生相对运动,其相对运动的速度每年约为几十毫米 (Turcotte et al., 1982)。由于大陆岩石圈上半部,岩石的刚性较大,因此,大洋岩石圈板块俯冲对大陆岩石