

“十一五”国家重点图书

中国科学技术大学 精品教材

大气-海洋学概论

◎ 陈月娟 周任君 王 雨 郑建秋 编著

中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学 精品 教材

大气 - 海洋学概论

DAQI-HAIYANGXUE GAILUN

陈月娟 周任君 王 雨 郑建秋 编著

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是中国科学技术大学地球和空间科学学院所设的“大气-海洋学”课程的专用教材。这本教材突出了大气圈和水圈的共同特点和相互关系,把大气和海洋结合一起来讲述。内容比较广泛,但并不很深。它包括了大气科学和海洋学中的一些基本概念、大气和海洋中发生的物理和化学现象及过程、大气和海水运动的特征以及目前普遍关心的海-气相互作用、气候异常和全球性的环境问题(酸雨、全球变暖和臭氧层破坏)等内容。它既包含了大气和海洋学的一些基础知识,同时也介绍了一些目前大气科学和海洋学中的重要科研成果。

本书可供高等院校地球科学类的师生和从事相关方面的科技工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气-海洋学概论/陈月娟等编著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.1
(中国科学技术大学精品教材)
“十一五”国家重点图书
ISBN 978 - 7 - 312 - 02245 - 6

I . 大… II . 陈… III . 海-气关系—高等学校—教材 IV . P49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 186793 号

中国科学技术大学出版社出版发行
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
网址 <http://press.ustc.edu.cn>
安徽辉煌农资集团瑞隆印务有限公司
全国新华书店经销

开本: 710 mm×960 mm 1/16 印张: 10.75 插页: 6 字数: 209 千
2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
印数: 1—2000 册
定价: 22.00 元

编审委员会

主任 侯建国

副主任 窦贤康 刘斌 李晓光

委员 (按姓氏笔画排序)

方兆本 史济怀 叶向东 伍小平

刘斌 刘兢 孙立广 汤书昆

吴刚 李晓光 李曙光 苏淳

何世平 陈初升 陈国良 周先意

侯建国 俞书勤 施蕴渝 胡友秋

徐善驾 郭光灿 郭庆祥 钱逸泰

龚立 程福臻 窦贤康 褚家如

滕脉坤 霍剑青 戴蓓蒨

总序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

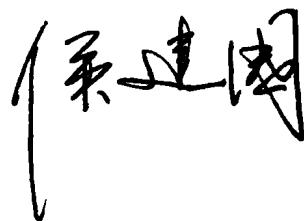
学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他

们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。五十年来,进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

这次入选的 50 种精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校五十年教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。该系列精品教材的出版,既是向学校五十周年校庆的献礼,也是对那些在学校发展历史中留下宝贵财富的老一代科学家、教育家的最好纪念。



2008 年 8 月

前　　言

“大气-海洋学”课程是在教育部地球科学类的教学指导委员会关于加强地球科学基础教学的倡议下,中国科学技术大学地球和空间科学学院专门设立的三门全院本科生必修课之一(另外两门是“地球科学概论”和“普通天文学”)。《大气-海洋学概论》是这门课程的专用教材。目的是为了增加地球和空间科学学院各专业的本科生的大气和海洋学的基础知识,以便加深地球科学类(特别是大气科学专业以外的)专业的学生对整个地球系统的认识。这本教材突出了大气圈和水圈的共同特点和相互关系,把大气和海洋结合一起来讲述,在国内首次做这样的尝试。

这本教材的建设始于1996年,本教材的编写人陈月娟教授参加了国家教育部“面向21世纪大气科学教学内容和课程体系改革研究”项目(1996~2001年),并经中国科学技术大学地球和空间科学学院确定开设“大气-海洋学”课程后,于1998年完成书稿(约20万字,150幅图),同时还制作了计算机教学幻灯片。后经周任君等整理,放到中国科学技术大学教务处的网上作为网上教材供学生使用。

由于“大气-海洋学”课程的开设和教材的编写的目的是为了增加地球和空间科学学院各专业的本科生的大气和海洋学的基础知识,加深地球科学类专业的学生对整个地球系统的认识,因而内容比较广泛,但并不很深。它包括了大气科学和海洋学中的一些基本概念、大气和海洋中发生的物理和化学现象和过程、大气和海水运动的特征以及目前普遍关心的海-气相互作用、气候异常和全球性的环境问题(酸雨、全球变暖和臭氧层破坏)等内容。它既包含了大气和海洋学的一些基础知识,同时也介绍了一些目前大

气科学和海洋学中的重要科研成果。

这本教材作为网上教材已经9年，在教学中使用过9次，经过多次修改和补充，内容上已经比较成熟。又由于采用多媒体教学，改善了教学条件，提高了教学质量。在教学过程中学生们强烈要求购买这本教材，所以我们决定出版这本书。在出版前，周任君、王雨和郑建秋参加了部分章节的修改，周任君还负责全书图片的整理和排版工作。

大气科学和海洋学及其分支分别开设的课程和出版的教材已经很多，为本书的编写提供了很好的条件。在本书的后面附有主要参考文献，如有遗漏，敬请原谅，在此一并致谢。

由于编者的水平有限，本书不可避免地会存在各种错误和不足之处，敬请读者提出宝贵意见。

陈月娟

2008年2月13日

目 录

总 序	(1)
前 言	(1)
第1章 绪论	(1)
1.1 地球的圈层,大气圈和水圈	(1)
1.1.1 大气圈和水圈的概况	(1)
1.1.2 大气和海洋的边界	(2)
1.1.3 大气圈和水圈的形成和演化,海底扩张和板块构造理论	(4)
1.1.4 大气圈和水圈与人类生活的关系	(5)
1.2 大气科学和海洋学的研究内容和方法	(6)
1.3 大气科学和海洋学的发展和新技术的应用	(7)
1.3.1 大气科学和海洋学的发展	(7)
1.3.2 新技术在大气科学和海洋学中的应用	(8)
第2章 大气和海水的成分及结构	(13)
2.1 大气和海水的组成	(13)
2.1.1 大气的基本成分	(13)
2.1.2 海水的化学组成	(14)
2.2 海水的盐度和氯度	(14)
2.2.1 海水的盐度	(14)
2.2.2 海水组成的恒定性	(15)
2.2.3 海水的氯度	(15)
2.2.4 海水盐度与氯度的关系	(15)
2.2.5 海洋盐度的分布	(15)
2.3 大气和海水的垂直结构	(17)
2.3.1 大气的垂直结构	(17)
2.3.2 海洋的垂直结构	(20)
2.4 大气和海洋的温度、密度、压强及盐度之间的关系	(20)

2.4.1 大气温度、密度和压强的关系,气体状态方程	(20)
2.4.2 大气压强随高度的分布	(21)
2.4.3 海水密度与温度、盐度和压强的关系	(22)
2.5 高层大气简介	(23)
2.5.1 臭氧层	(23)
2.5.2 电离层	(25)
2.5.3 磁层	(26)
第3章 大气和海水运动的能源和热量收支	(28)
3.1 大气和海洋对太阳辐射的吸收	(28)
3.1.1 太阳和太阳辐射	(28)
3.1.2 大气对太阳辐射的吸收	(29)
3.1.3 海水对太阳辐射的吸收	(31)
3.2 海-地-气系统的长波辐射	(32)
3.2.1 海面和陆地面向上的红外热辐射	(32)
3.2.2 大气放射的红外热辐射	(33)
3.3 感热交换和潜热交换	(33)
3.3.1 大气与海洋或大气与陆地的感热交换	(33)
3.3.2 海洋与大气的潜热交换	(33)
3.4 海-地-气系统的能量收支	(35)
3.4.1 海-地-气系统的辐射收支	(35)
3.4.2 地球表面的热量平衡	(36)
3.4.3 温室效应和全球变暖的概念	(36)
3.5 大气和海水温度的分布	(37)
3.5.1 近地面大气温度的分布	(37)
3.5.2 大气温度的高度-纬度分布	(38)
3.5.3 海表水温(SST)的分布	(39)
3.5.4 海温的垂直分布	(40)
3.5.5 海温异常和厄尔尼诺现象	(41)
第4章 云和云系	(42)
4.1 云的分类及其宏观特性	(42)
4.2 云生成的原因及条件	(45)
第5章 大气和海洋中的声、光、电现象	(47)
5.1 声波在大气和海洋中的传播	(47)

5.1.1	声波在大气和海洋中的传播速度	(47)
5.1.2	声速在大气和海洋中的垂直分布	(48)
5.1.3	声波在大气和海洋中的传播路径	(49)
5.1.4	声波在大气和海洋中传播时的衰减	(53)
5.2	大气和海洋中的光学现象	(54)
5.2.1	光波在大气中的折射	(54)
5.2.2	光波在大气和海水中的散射	(58)
5.2.3	云、雾和降水中的光象	(61)
5.3	大气中的电现象	(63)
5.3.1	大气中的离子	(64)
5.3.2	晴天大气电场和大气电流	(64)
5.3.3	雷暴电场	(66)
第6章	大气和海水的热力学特性和静力稳定度	(68)
6.1	热力学第一定律的应用	(68)
6.2	绝热过程、位温和绝热递减率	(69)
6.2.1	大气的干绝热过程	(69)
6.2.2	大气的干绝热温度递减率	(70)
6.2.3	大气的位温	(70)
6.2.4	大气的湿绝热过程和假绝热过程	(70)
6.2.5	海水温度的绝热变化和位温	(71)
6.3	静力稳定度及其判据	(72)
6.3.1	大气的静力稳定度	(72)
6.3.2	海水的静力稳定度	(73)
第7章	大气和海水运动的基本形态	(74)
7.1	大气环流和大洋环流	(74)
7.1.1	全球性平均大气环流	(74)
7.1.2	局地性的热力环流	(78)
7.1.3	大洋环流	(80)
7.2	涡旋运动	(86)
7.2.1	大气中的涡旋运动	(86)
7.2.2	海洋中的涡旋运动	(89)
7.3	波动	(89)
7.3.1	重力波	(90)

7.3.2 罗斯贝波	(92)
7.4 垂直运动和对流	(94)
7.4.1 大气中的垂直运动	(94)
7.4.2 海洋中的垂直运动	(94)
7.5 湍流	(95)
7.6 潮汐运动	(96)
第8章 大气和海洋动力学简介	(97)
8.1 大气和海水所受的力和运动方程	(97)
8.1.1 球坐标系和局地坐标系	(98)
8.1.2 大气和海水运动所受的力及其在局地坐标系中的表达形式	(99)
8.1.3 旋转地球上大气和海水的运动方程	(103)
8.2 大气和海洋中的平衡运动	(104)
8.2.1 地转风和地转流	(104)
8.2.2 梯度风、旋衡风和摩擦风	(105)
8.2.3 风生海流	(107)
8.3 大气和海洋动力方程组	(110)
8.3.1 连续方程和散度	(110)
8.3.2 大气和海洋动力方程组	(111)
第9章 天气预报的原理和方法	(112)
9.1 天气学方法	(113)
9.1.1 天气图	(113)
9.1.2 天气系统	(115)
9.1.3 诊断分析	(119)
9.1.4 天气形势预报和气象要素预报	(120)
9.2 数值预报方法	(122)
9.3 统计预报方法	(126)
9.4 动力-统计预报	(126)
9.5 卫星、雷达探测资料的应用	(127)
9.5.1 气象卫星探测资料的应用	(127)
9.5.2 雷达探测资料的应用	(128)
9.6 天气预报业务现代化系统简介	(128)
第10章 海-气相互作用和气候异常	(130)

10.1 海—气的相互作用	(130)
10.1.1 热带海洋与低纬大气环流的相互作用	(131)
10.1.2 热带海温异常对中纬度环流的影响	(133)
10.2 厄尔尼诺与南方涛动	(134)
10.2.1 厄尔尼诺的确定	(136)
10.2.2 厄尔尼诺发生的频率、持续时间和强度	(137)
10.2.3 ENSO 事件的发展过程	(139)
10.2.4 ENSO 事件的成因	(140)
10.2.5 ENSO 与中纬度大气环流	(141)
10.3 海—气相互作用过程的数值模拟和气候预测模式	(143)
第 11 章 全球环境的三大问题	(145)
11.1 “空中死神”——酸雨	(146)
11.1.1 全球酸雨的状况	(147)
11.1.2 污染物的输送和扩散规律的研究	(148)
11.1.3 控制酸雨的根本措施	(148)
11.2 臭氧层的破坏和臭氧洞	(149)
11.2.1 臭氧层的破坏,臭氧洞和臭氧低值中心	(149)
11.2.2 臭氧洞的形成原因	(152)
11.2.3 臭氧层被破坏对气候的影响	(154)
11.2.4 关于蒙特利尔条约	(156)
11.3 温室效应和全球变暖	(156)
11.3.1 全球变暖的发展趋势	(157)
11.3.2 关于《京都议定书》.....	(159)
主要参考文献	(160)

第1章 絮 论

1.1 地球的圈层、大气圈和水圈

地球是一个由不同物质组成的、呈若干同心圈层构造的球体。以固体地面为界，可以将它分为内圈和外圈两大部分。内圈包括岩石圈和地核，外圈包括大气圈、水圈和生物圈。本课程主要讨论大气圈和水圈。

1.1.1 大气圈和水圈的概况

大气圈的厚度从地面或海面向上到大气顶，约为 $2\ 500\sim3\ 000\text{ km}$ 。但是事实上大气质量的73.9%集中在10 km以下，98.81%集中在30 km以下，99.92%集中在50 km以下的气层中，所以相对于地球而言它只是薄薄的一层。

水圈包括海洋、江河湖泊、陆地上的冰雪、地下水以及大气中的水汽和液态水等，以海洋为主。地球表面积为 $510\times10^6\text{ km}^2$ ，其中海洋面积为 $362\times10^6\text{ km}^2$ ，约占地球表面积的71%，相当于陆地面积的2.5倍。它在南北半球分布不均匀，北半球海洋占60.7%，陆地占39.3%，南半球海洋占80.9%，陆地占19.1%。海陆分布如图1.1(见彩页I)所示。

通常把世界大洋分成四大部分，即太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋。四大洋的划分如下：

太平洋：北至白令海峡，东到通过合恩角的经线(68°W)，西边沿马来半岛，经苏门答腊、爪哇、帝汶至澳大利亚的伦敦德里角，再沿 147°E 到南极。

大西洋：北边沿格陵兰经冰岛和法罗群岛到苏格兰，西边以通过合恩角的经线(68°W)与太平洋分界，东边在通过非洲厄加勒斯角的经线(20°E)与印度洋交界。

印度洋：东边沿马来半岛，经苏门答腊、爪哇、帝汶至澳大利亚的伦敦德里角，

再沿 147°E 经线与太平洋分界,西边界为通过非洲厄加勒斯角的经线(20°E)。

北冰洋:以白令海峡和格陵兰经冰岛和法罗群岛到苏格兰为分界线。

太平洋、大西洋和印度洋的南边是相通的,故有时又称其为南大洋。

1.1.2 大气和海洋的边界

大气和海洋可以看成是密度不同的两层流体,它们的运动状况和物理过程有很多共同特征,同时它们又通过它们之间的边界产生相互作用和影响。因此,可以放在一起研究。

1. 大气和海洋的下边界

大气和海洋的下边界即为岩石圈的上边界,有各种地形。大气下边界有各种地形,海洋下面也有各种地形。大气的下边界处有高原、高峰、山地、平原、谷地等等。海底地形有大陆架、大陆坡、大陆裙、洋盆、洋中脊、海岛、海沟等等。如图 1.2 所示。

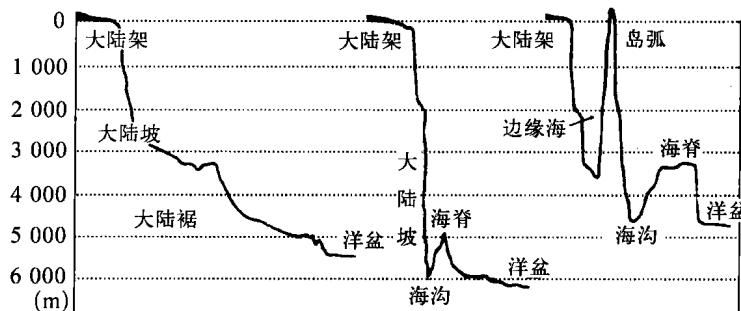


图 1.2 海底的几种地形(引自杨殿荣,1986)

(1) 洋中脊及其位置

洋中脊是大洋底部大规模的山脉,它们是海底扩张的中心。洋中脊是一个世界的体系,从北冰洋开始,穿大西洋,经印度洋,入太平洋,绵延七万余公里,占海洋总面积的 32.7%。

洋中脊的位置:在大西洋它从南北向贯穿大洋中部,在印度洋它呈“人”字形分布在大洋中部。太平洋洋中脊则位于东部,又称太平洋海隆。三大洋的洋中脊在南部互相连接。如图 1.3 所示。

(2) 海沟及其位置

海沟是大洋边沿狭长的海底陷落带,具有陡的侧壁和极大的深度(多在 6 000 m 以上)。如图 1.4 所示。

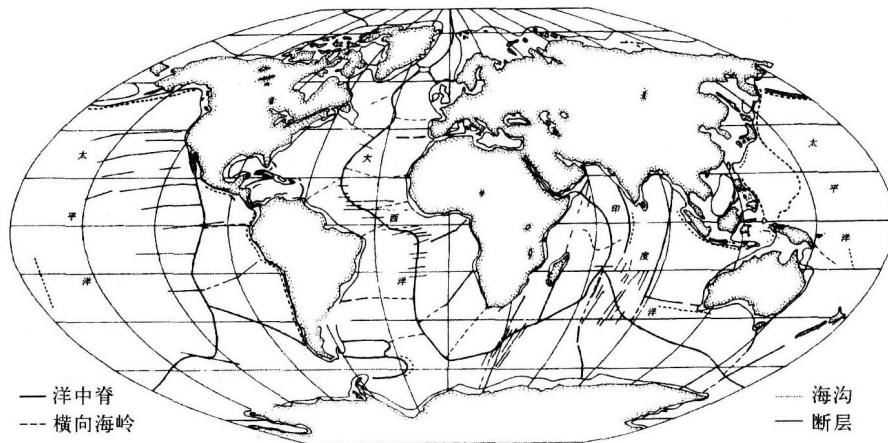


图 1.3 洋中脊系统(引自杨殿荣,1986)

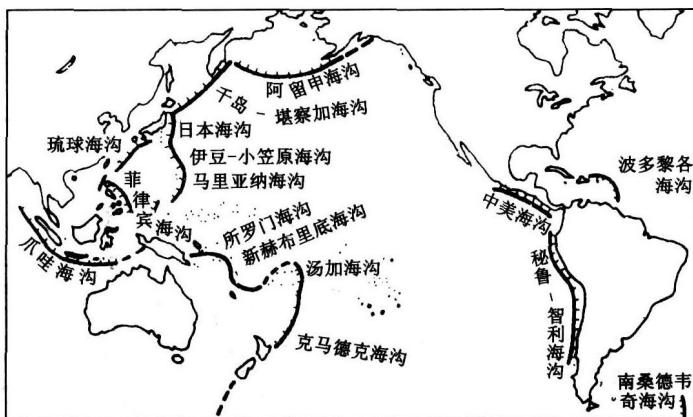


图 1.4 世界大洋的海沟分布(引自杨殿荣,1986)

海沟是由于大洋板块向大陆板块下方俯冲而形成的。全世界 20 余条海沟,绝大部分分布在太平洋的边缘海区。在这些海区附近,是地震多发区。

2. 大气和海洋的上边界

海面既是海洋的上边界,也是大气的一个下边界。大气和海洋通过这个边界交换其动量、热量和水分,产生相互作用和影响。

大气的上边界一般认为应是地球大气与星际空间的交界处。根据天体物理,星际空间中的中性质点的密度为 $1 \text{ 个}/\text{cm}^3$,电子浓度为 $10^3 \sim 10^2 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。据此,人

造卫星测得大气上界为2500~3000 km。在理论研究中,为方便起见常取大气上界为 $Z \rightarrow \infty$ 或 $P \rightarrow 0$ (P 为大气压强)。

1.1.3 大气圈和水圈的形成和演化,海底扩张和板块构造理论

大约在 4.5×10^9 年以前,在地球形成的当时或稍晚,曾有一段时间地球上不存在大气和水(因地球曾为炽热的火球)。今天观测到的大气圈和水圈是由火山活动从地球内部排出的挥发性物质变成的。火山喷发物中大约含85%的水汽,10%的CO₂,百分之几的氮、硫和硫化物(SO₂和H₂S)。当地球表面逐渐冷却之后,火山喷出的水汽只能有一小部分留在空中,大部分凝结成云雨降落,形成地球表面的水体,进而形成水圈。水通过离解和光合作用生成氢气、氧气和形成植物细胞的碳水化合物,最后形成现在的大气圈和生物圈。

关于世界大洋的形成,目前公认的理论为海底扩张说。首先认为地球的岩石圈被分裂成大小不等的板块。如图1.5所示,共分成六个较大的板块和若干小的板块,这六个板块是:太平洋板块、美洲板块、非洲板块、欧亚板块、印度洋板块和南极洲板块。通常一个板块中既有大洋也有大陆,唯独太平洋板块全是由大洋底组成。

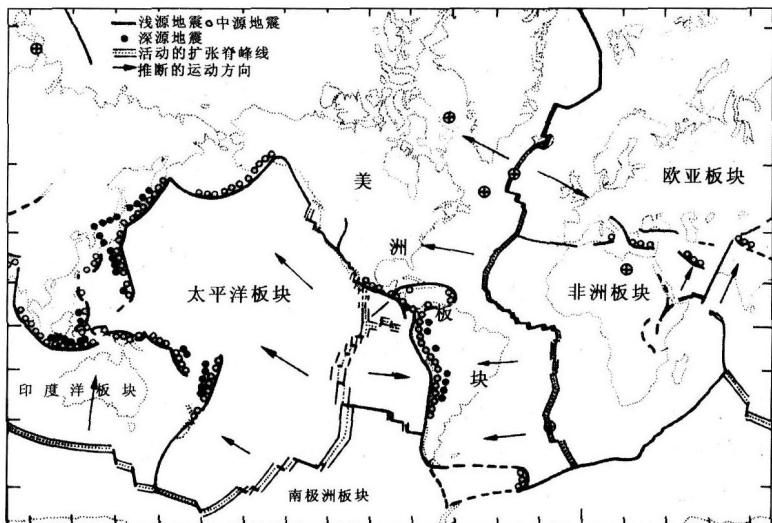


图1.5 地球上的主要板块(引自杨殿荣,1986)

板块内部一般没有变形,它们作为整体而在软流圈上沿球面作水平移动;由于板块之间的相互作用而形成了地壳的构造运动。