

中国科学院大学研究生教材系列

沉积盆地成因学

王清晨 著



科学出版社

中国科学院大学研究生教材系列

沉积盆地成因学

王清晨 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书为中国科学院大学研究生专业核心课程教材,力求反映国际沉积盆地研究发展趋势。全书分为7章。第1章介绍沉积盆地成因学的基本概念和中国沉积盆地研究历史;第2章和第3章介绍地球的圈层结构和岩石圈的流变学特征,是认识沉积盆地成因的必备基础;第4章和第5章把沉积盆地成因分解为盆地形成和盆地充填两个过程,阐述沉积盆地形成的物理机制、沉积物从“源”到“汇”的搬运、沉积过程和盆地充填体结构;第6章介绍沉积盆地成因分析的思路、流程和常用方法,结合实例对一些新方法及其原理做了深入浅出的说明;第7章从沉积盆地充填角度介绍了沉积矿产的形成环境与分布特征,并从成矿物质富集过程角度归纳了沉积矿产形成机制。

本书适用于沉积地质学、构造地质学和能源地质学领域的研究生和二年级大学生阅读、学习,并可供这些领域的教学、生产和科研人员参考。

审图号:GS(2018)4292

图书在版编目(CIP)数据

沉积盆地成因学/王清晨著. —北京:科学出版社,2018.9

中国科学院大学研究生教材系列

ISBN 978-7-03-058910-1

I. ①沉… II. ①王… III. ①沉积盆地—研究生—教材 IV. ①P531

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第217842号

责任编辑:孟美岑 韩 鹏 陈姣姣/责任校对:王萌萌

责任印制:肖 兴/封面设计:北京图阅盛世

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年9月第一版 开本:787×1092 1/16

2018年9月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:332 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

中国科学院“科教融合”的改革浪潮把笔者推上了中国科学院大学的讲台。议定的任务是给研究生们讲解“沉积盆地分析”。在编写教学大纲时，笔者和同事们都感到，“沉积盆地分析”是一门实践性很强的学科，在二十世纪中期应运而生，其早期的发展侧重于盆地充填物的沉积学研究，被归属于宏观沉积学或沉积地质学的范畴。二十世纪六七十年代，板块构造学说的出现给盆地研究带来了深刻的影响，使沉积盆地分析这一学科从概念体系到研究内容都产生了巨大的飞跃，成为地球科学的热点研究领域。二十世纪九十年代出现了研究沉积盆地动力学的新趋势，综合、汲取了构造地质学、大地构造学、地球物理学、地球化学和计算机技术等许多学科的成就，用于研究沉积盆地的成因、演化和其中油气资源的聚集规律，提出了“沉积盆地动力学”概念，使得对沉积盆地成因的研究成为探索地球演化动力学过程、揭示化石能源和矿产资源在地下深处分布规律的重要学科。这表明，“沉积盆地成因学”已经成型，它作为反映沉积盆地形成规律的知识体系已经确立。因此，沉积盆地分析课程应该与时俱进，努力反映这些新进展，包括基于先进的地球动力学理论对盆地形成、演化的认识。正是基于这一认识，笔者和同事们提出，应该把“沉积盆地成因学”作为我们讲授课程的名称。

从“沉积盆地分析”到“沉积盆地成因学”，不仅仅是术语的变换，而是把对沉积盆地的分析研究提升为地质学的一个分支学科，使沉积盆地成因研究成为一门科学。感谢中国科学院大学认可了“沉积盆地成因学”教学大纲，并从2014年起把“沉积盆地成因学”列为研究生专业核心课程。“沉积盆地成因学”是跨沉积地质学、构造地质学、现代地层学、地球物理学和地球化学等多学科的综合交叉学科。假定来学习“沉积盆地成因学”的研究生们已经具备了上述基本学科的基础知识，因此，“沉积盆地成因学”课程不拟在有限的学时中过多地复习基础知识，而只是指出学习“沉积盆地成因学”所需要了解的基本学科的相关知识要点。对于那些在“沉积盆地成因学”中所需，而在大学阶段讲授力度不够的一些重要基本原理，会进行拓展、补充和深度阐释。

本书是以“沉积盆地成因学”课程讲义为基础编著的，全书分为7章。第1章为绪论，介绍沉积盆地成因学的一些基本概念和中国沉积盆地研究历史。第2章和第3章介绍地球的圈层结构和岩石圈的流变学特征，这些是认识沉积盆地成因的必备基础。第4章和第5章从正演角度讲解沉积盆地成因，阐述沉积盆地的形成机制和沉积盆地的充填过程。第6章从反演角度分析沉积盆地成因，概略介绍沉积盆地分析方法，尤其侧重介绍一些新技术和新方法。第7章从沉积盆地形成过程角度介绍沉积矿产的形成机制。实

际上，盆地成因研究还涉及盆地流体、充填物成岩作用、有机质成熟度演化及相关成藏/成矿效应等内容。这些内容已经分别在“沉积地质学”和“能源地质学”等核心课程中重点讲授，“沉积盆地成因学”课程中未再重复。因此，以课程讲义为基础的本书没有再刻意增加这些内容。笔者期盼将来能在课程讲授中适当增加相关内容，并在本书再版时做适当增补。

在本书撰写过程中，一直受到中国科学院大学原校长丁仲礼院士、副校长郭正堂院士的指导和鼓励；中国科学院地质与地球物理研究所孟庆任研究员、胡圣标研究员、林伟研究员和李忠研究员，以及中国科学院大学据宜文教授对本书的撰写提供了大力支持；中国科学院大学谭锋奇博士一直担纲“沉积盆地成因学”课程的助教，并协助清绘了本书的大部分插图。中国科学院大学教材出版中心为本书的出版提供了资助。在此谨对他们表示由衷的感谢。

真诚地希望本书能激发研究生对“沉积盆地成因学”的浓厚兴趣和研究冲动，愿更多的研究生投入到对沉积盆地成因的研究中，为我国的能源和矿产资源勘探开发贡献力量。

王清晨

2018年6月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 关于“沉积盆地”的定义	1
1.2 从“沉积盆地分析”到“沉积盆地成因学”	1
1.3 中国沉积盆地研究简史	3
小结	5
复习思考题	5
参考文献	5
第2章 地球的圈层结构	7
2.1 地球外圈的主要特征	7
2.2 地球内圈的主要特征	9
2.3 地球圈层相互作用与沉积盆地	16
小结	23
复习思考题	23
参考文献	23
第3章 岩石圈流变学特征	26
3.1 岩石圈中的力	26
3.2 岩石的变形	31
3.3 岩石圈流变	39
3.4 岩石圈的热状态	44
小结	52
复习思考题	53
参考文献	53
第4章 盆地形成机制	55
4.1 盆地的沉降机制	55
4.2 岩石圈拉张形成的盆地	56
4.3 岩石圈挤压形成的盆地	68
4.4 岩石圈走滑形成的盆地	78
4.5 地幔对流对盆地形成的贡献	86
小结	93
复习思考题	93
参考文献	93

第5章 沉积盆地的充填	98
5.1 盆地充填物.....	98
5.2 母岩的风化与剥蚀.....	101
5.3 陆源碎屑物的搬运与沉积.....	107
5.4 溶解物质的搬运与沉积.....	123
5.5 沉积环境、沉积相和沉积体系.....	124
5.6 盆地充填体结构.....	126
小结.....	140
复习思考题.....	140
参考文献.....	140
第6章 沉积盆地分析	145
6.1 沉积盆地分析的主要任务.....	145
6.2 沉积岩石学分析.....	146
6.3 物源区分析.....	159
6.4 盆地沉降史分析.....	180
6.5 盆地热史分析.....	189
小结.....	195
复习思考题.....	195
参考文献.....	195
第7章 沉积盆地与沉积矿产	201
7.1 从沉积盆地形成过程看沉积矿产.....	201
7.2 风化沉积矿产.....	202
7.3 机械沉积矿产.....	205
7.4 化学沉积矿产.....	206
7.5 生物化学沉积矿产.....	210
7.6 低温层控沉积矿产.....	214
7.7 成矿物质的富集机制.....	220
小结.....	222
复习思考题.....	222
参考文献.....	222

第1章 绪 论

1.1 关于“沉积盆地”的定义

什么是沉积盆地？前人对盆地下过各式各样的定义，主要分为两类。一类强调盆地是沉降大地构造单元，如朱夏(1965)把盆地定义为“地壳的一定地段在大地构造运动体制下形成发展的统一的沉降大地构造单元”。另一类强调盆地是地层岩石体，如Ingersoll(2012)给出的定义为“盆地是指任一由沉积岩或火山岩堆积而成的地层体，盆地的三维构型可以是碟状、楔状、席状或不规则形状的”。这两种不同的定义至今还都在沿用。

叶连俊和孙枢(1980)提出“持续地接受沉积的地区称为沉积盆地”，认为沉积盆地的形成、沉积作用的持续和地壳的演化与活动互为表里。他们根据盆地的沉积作用与盆地形成作用的配合关系把盆地分为先成盆地、同生盆地和次生盆地三类。张文佑(1984)同样强调要区分前构造期盆地、同构造期盆地和后构造期盆地的意义。Einsele(1992)也提出有三种盆地，即沉积前盆地、同沉积盆地和沉积后(侵蚀)盆地。他们使用的术语不同，但都强调了同样的学术思想，即沉积作用与盆地形成作用同时发生的盆地才是“活”盆地，是同生的或同构造期的，才能被称为“沉积盆地”。后构造期的盆地是“死”盆地，只有构造改造作用，没有沉积作用，只能被称为构造盆地、次生盆地。这一思想在国内得到广泛接受，如认为“沉积盆地是基底表面相对于海平面长期洼陷或拗陷并接受沉积物沉积充填的地区”(王成善和李祥辉，2003)，或定义“沉积盆地是地球表面发生构造沉降、形成了沉积充填的地区”(李思田等，2004)。遵循这一思想，本书把沉积盆地定义为“持续接受沉积的沉降大地构造单元”，强调沉积盆地必须同时发生沉降和接受沉积物充填这两种作用。

1.2 从“沉积盆地分析”到“沉积盆地成因学”

沉积盆地中充填的沉积物成岩后称沉积岩。世界上最古老沉积岩的年龄为 38 亿年(Dauphas et al., 2007)。可以说，地球演化的大部分历史可以在沉积岩中查阅到。沉积岩中还赋存着丰富的化石能源(煤、石油、天然气)和矿产资源。地质学界常引用法国石油地质学家 Perrodon 的一句名言：没有盆地就没有石油。这可以理解为，生成石油的烃源层是在沉积盆地中堆积的，生成的石油赋存在沉积盆地中。从事金属矿床研究和勘查的地质家通过对许多矿床成矿作用的精细研究，认识到沉积盆地为形成超大型层控矿床提供了必要条件。盆地和盆地沉积物还是人类所需淡水资源的最重要储库，水资源对人类生存和发展的重要性毋庸置疑。

正是人类生活和活动对沉积盆地和盆地沉积物(岩)的依赖性突显了研究沉积盆地的重要性。如同其他学科发展一样,是人类社会对能源和矿产资源日益增长的需求推动了沉积盆地研究学科的发展。

对沉积盆地进行考察和研究的朴素思想古已有之。我国北宋沈括所著《梦溪笔谈》中就有诸多论述涉及对沉积盆地的思考,如:“盖石油至多,生于地中无穷”,太行山“此乃昔日之海滨,今东距海已近千里,所谓大陆者,皆浊泥所湮耳”,“今关陕以西,水行地中,不减百余尺,其泥岁东流,皆为大陆之土,此理必然”。十九世纪中期,美国古生物学家 Hall 在进行地层对比时,发现阿巴拉契亚山的古生界厚度竟达 12 km,几乎是中部地台同期沉积物的 10 倍。Dana 认为,是地壳的沉降为沉积物的堆积提供了空间,他将这种长期沉降、充填了巨厚“浅水”沉积物的巨型凹陷称为“地槽”(geosyncline)。由此,开创了在板块构造理论诞生前统治大地构造学界一百多年的“地槽学说”。

沉积盆地分析作为一个学科起源于二十世纪中期。欧美国家和苏联地质学家对许多重要盆地进行了全面分析,研究盆地的沉积充填特征和盆地不同演化阶段的古地理,重建盆地中煤、油、气资源的聚集史,以期对能源资源预测和勘探起到指导作用。*Paleocurrents and Basin Analysis* (Potter and Pettijohn, 1977) 是当时的代表作,“沉积盆地分析”(sedimentary basin analysis) 自此盛行于世。盆地分析是对地质学家多年研究沉积盆地及相关资源过程中所形成的理论和方法体系的总结,早期发展侧重于盆地充填物的沉积学研究,并被归属于宏观沉积学或沉积地质学。

二十世纪六七十年代,板块构造学说的出现给盆地研究带来了深刻的影响。人们从岩石圈板块的相互作用中,重新认识沉积盆地的成因和演化(Dickinson, 1974),使沉积盆地分析从概念体系到研究内容都产生了巨大的飞跃,体现了多学科综合的特征,并成为地球科学的热点研究领域。

二十世纪八十年代以后,关于沉积盆地分析的系统专著大量涌现(Miall, 1984; Einsele, 1992; Busby and Ingersol, 1995),其中 Miall(1984)的 *Principles of Sedimentary Basin Analysis* 堪称当时的代表作。Miall 总结了当时沉积学和地层学研究的重要进展,不失时机地出版了全面进行盆地分析的教科书。他强调,盆地分析最重要的结果就是揭示沉积盆地的古地理演化,而其中最重要的工作内容就是沉积学、地层学和构造地质学。该书不强调理论阐述,而偏重介绍盆地分析的实用方法,从学科上讲,那时的盆地分析仍归属于沉积地质学。

二十世纪九十年代初期,出现了研究沉积盆地动力学的新趋势,使盆地研究进一步深化。Allen 和 Allen(1990)编著的 *Basin Analysis: Principles and Applications* 标志着盆地分析进入了新的发展阶段。该专著是以盆地形成的动力学模型为核心进行论述的,综合、汲取了构造地质学、大地构造学、地球物理学、地球化学和计算机技术等许多学科的成就,用以研究沉积盆地的成因、演化和其中油气资源的聚集规律。该书于 2005 年和 2013 年两次再版。以 Dickinson 为首席科学家的专家组编写了对沉积盆地研究具有前瞻性的纲要文件——“沉积盆地动力学”(Dickinson et al., 1997)。他们指出,盆地研究的集中点应从盆地分类转向盆地形成过程的动力学分析,在纲要中提出了沉积盆地研究的六大科学问题:①板块构造和地幔对流格架中盆地的形成;②盆地演化过程中烃类的生成和运移;

③现今和古流体的活动及其运移的化学动力学;④与构造环境有关的盆地充填和热演化;⑤地下岩石孔渗性的时空变化;⑥保存在盆地中的构造、古气候和海平面变化的记录。显然,这使得对沉积盆地成因的研究成为探索地球演化动力学过程、揭示化石能源和矿产资源在地下深处分布规律的重要学科。从学科角度讲,对沉积盆地成因的研究已经成为跨沉积地质学、构造地质学、现代地层学、地球物理学、地球化学和计算机技术等多学科的新兴交叉学科,称为“沉积盆地成因学”是当之无愧的。以 Allen 和 Allen(1990)编著的 *Basin Analysis: Principles and Applications* 为标志,“沉积盆地成因学”已经成型,它作为反映沉积盆地形成规律的知识体系已经确立。

1.3 中国沉积盆地研究简史

对中国沉积盆地的研究,既包括中国学者的工作,也包括外国学者的工作。这些研究工作大体上可以划分为三个阶段。

1949年中华人民共和国成立前为第一阶段。此阶段只有针对盆地的零星工作,没有真正的盆地成因研究。值得指出的工作有三件。一是在1924年,时任北京大学教授的美国地质学家葛利普(A. W. Grabau)先生出版了《中国地质史》(*Stratigraphy of China*)一书,对中国地层和亚洲古地理进行了系统总结。正是在这一论著中,他论述寒武纪古地理时命名了“华夏古陆”(Cathaysia)这一著名的构造古地理单元。二是1931年九一八事变后,日本学者开始在我国松辽盆地开展石油勘探工作。我们非常幸运:他们没有发现石油!倘若松辽盆地之下的大油田被他们发现,真不知我国东北地区的命运会怎样,第二次世界大战的走向会发生什么变化!三是1941年,潘钟祥先生在AAPG发表“Non-marine origin of petroleum in North Shensi, and the Cretaceous of Szechuan”研究论文,明确提出陆相盆地中也能生成石油,为日后我国陆相石油的大规模勘探奠定了理论基础。

从1949年中华人民共和国成立到1979年为第二阶段。此阶段的工作多以盆地的岩相古地理研究为重点,但已经开始考虑盆地的动力学成因。中国的建设对油气、煤炭和铁、铝、磷等矿产资源的需求与日俱增。我国地质学家在沉积成矿作用研究中极为重视岩相古地理的研究,刘鸿允先生于1955年编制出版了我国第一代古地理图集,定性地概略性显示了海陆分布状态。叶连俊先生于1963年提出了“外生矿床陆源汲取成矿论”,指出我国外生矿床的空间分布多半是以古陆为中心向两侧依次规律性地出现铝、铁、磷、锰等矿床的成矿系列,其沉积环境具局限海盆或潟湖海盆特点,而其上覆岩系多半是开阔海洋沉积物。

石油地质学家对盆地分析具有得天独厚的优势,因为他们对含油气盆地的研究不仅是对已知事实的归纳,更重要的是要找出油气藏的分布规律并据之进行预测,指导油气勘探。因此,油气勘探的天职使他们对盆地的认识最为深刻,一直把油气和盆地联系在一起。在我国油气勘探实践中,苏联和我国石油地质学家都对盆地进行了许多研究。其中,苏联学者的研究以瓦林佐夫为代表,他于1962年撰文归纳了我国含油气洼地的大地构造特点,指出“在中国的情况下,‘含油气洼地’和‘含油气盆地’基本上是吻合一致的”,并按盆地所在基底的大地构造属性(地台-地槽、褶皱带)对盆地进行了分类,其

他诸如乌斯宾斯卡娅、巴基洛夫、布罗德和耶列明柯等基本上都持类似看法,认为地台与平原等同、地槽与山系等同(朱夏,1965)。朱夏先生是我国石油地质学家的杰出代表,他根据自己的实践和对含油气盆地的深刻认识,强调盆地形成与大地构造演化历史有关,十分注重地质历史发展的“阶段性差别”(朱夏,1965),提出所有含油气盆地都可按其形成发育过程中的主导运动体制分为造山运动体制、造陆运动体制和变格运动(diktyogenese)体制三类,特别指出两套富油气远景的盆地因变格运动(构造格局的重大变化)而叠加在一起,为多种油气藏的形成提供了有利条件,“新阶段的运动体制统一作用于旧阶段的不同单元,以其新生作用形成盆地”。

借改革开放的东风,中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会和中国地质学会沉积地质专业委员会于1979年成立,标志着第三阶段的开始。中国的盆地研究在此阶段得到蓬勃发展,逐步从盆地分析发展为盆地成因研究。这些研究主要集中在两个方面,一是盆地古地理重建,二是盆地动力学研究。

古地理重建是盆地分析中的重要内容之一,狭义的古地理重建是恢复盆地长期构造演化过程中某一地质历史时期的自然地理环境特征,广义的古地理重建则包括了沉积盆地分析的大部分内容,包括陆源区的确定、古盆地的格架、古气候、古流向、古构造分析等内容。古地理重建所涉及学科包括岩相古地理、生物古地理和构造古地理。岩相古地理研究是通过研究沉积相恢复古沉积环境和古地理景观,生物古地理研究是运用古生物生态特征进行古地理反演,构造古地理研究则是确定古大地构造位置和恢复沉积盆地边界构造的动态演化历史。盆地古地理重建方面的代表性成果有王鸿祯(1985)的《中国古地理图集》、刘宝珺和许效松(1994)的《中国南方岩相古地理图集》等。

盆地动力学研究强调沉积盆地形成过程中的地球动力学演化历史。中国地质学家日益清楚地认识到许多盆地都不是一个由具有固定边界的盆地基底经过多次沉降和构造变动而形成的,而是由一系列小型陆、海地质单元经历多期、多方位构造叠加复合,并在最新一期构造变动中定格形成的。他们对这类盆地赋予不同的名称,如多旋回盆地、叠加盆地、叠合盆地、复合盆地等(黄汲清等,1980;朱夏,1983;王尚文,1983;张文佑,1984;关士聪等,1984;王鸿祯,1985)。与此同时,外国科学家也开始关注中国盆地的成因,如Bally和Snelson(1980)在其盆地分类方案中就提出了“中国型盆地”的概念,将其作为与大型缝合带的远程作用相关的代表性盆地。

在盆地成因研究方面,中国地质学家有两个很有特色的创举。一个是对盆地的形成机制按力学类型进行分类。刘和甫(Liu,1986)提出,根据盆地边界断裂的性质,可把沉积盆地分为张性、压性和扭性三类。该分类方案简明实用,被Miall(1990)再版的*Principles of Sedimentary Basin Analysis*引用。另一个是在20世纪90年代出现盆山耦合的研究高潮,把沉积盆地与相邻造山带的共同演化视为统一的地球动力学过程,关注重点为盆山体系在构造、沉积和深部结构方面的耦合现象(刘和甫等,1999,2000a,b)。构造耦合研究关注盆山结合带的统一变形特征,沉积耦合研究关注盆地演化对相邻造山带演化的沉积响应,深部结构耦合的重点是研究盆山体系在岩石圈尺度的动力学统一性。国际上相应领域的研究重点为压力与盆地演化、岩石圈流变与盆地形成、岩石圈深部过程与近地表构造过程的耦合等(Cloething et al., 1993; Quinlan et al., 1993; Vilotte et al.,

1993; Zoback et al., 1993)。可以说,国内对盆地成因的盆山耦合研究既与国际盆地成因研究有相同之处,又有独到的思维特色(王清晨和李忠, 2003)。

小 结

本章介绍了沉积盆地的定义,阐述沉积盆地研究从“沉积盆地分析”到“沉积盆地成因学”的发展进程,并尝试对中国沉积盆地研究的历史做了概略总结。

目前文献中对沉积盆地的定义主要分为两类。一类强调盆地是沉降大地构造单元,另一类则强调盆地是地层岩石体。本书把沉积盆地定义为“持续接受沉积的沉降大地构造单元”,强调沉积作用与盆地形成作用同时发生的盆地才是“活”盆地,后构造期的盆地只有构造改造作用,没有沉积作用,是“死”盆地。

复习思考题

1. 沉积盆地的定义有哪两类?各自强调的重点是什么?
2. 研究沉积盆地的重要意义是什么?
3. 你从中国沉积盆地研究历史中得到什么启示?

参 考 文 献

- 关士聪, 滨怀玉, 丘东洲, 王守德, 陈显群, 周经才, 袁风钊, 陈绍琪. 1984. 中国海陆变迁、海域沉积相与油气(晚元古代—三叠纪). 北京: 科学出版社.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 张正坤, 秦德余. 1980. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社.
- 李思田, 解习农, 王华, 焦养泉, 任建业, 庄新国, 陆永潮. 2004. 沉积盆地分析基础与应用. 北京: 高等教育出版社.
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集. 北京: 科学出版社.
- 刘和甫, 夏义平, 殷进垠, 尚培乐. 1999. 走滑造山带与盆地耦合机制. 地学前缘, 6(3): 121-132.
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 殷进垠, 朱德丰, 刘立群. 2000a. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. 地学前缘, 7(4): 477-486.
- 刘和甫, 汪泽成, 熊保贤, 李永林, 刘立群, 张建珍. 2000b. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析. 地学前缘, 7(3): 55-72.
- 刘鸿允. 1955. 中国古地理图. 北京: 科学出版社.
- 王成善, 李祥辉. 2003. 沉积盆地分析方法和原理. 北京: 高等教育出版社.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集. 北京: 中国地图出版社.
- 王清晨, 李忠. 2003. 盆山耦合与沉积盆地成因. 沉积学报, 21(1): 24-30.
- 王尚文. 1983. 中国石油地质学. 北京: 石油工业出版社.
- 叶连俊, 孙枢. 1980. 沉积盆地的分类. 石油学报, 1(3): 1-6.
- 张文佑. 1984. 断块构造导论. 北京: 科学出版社.
- 朱夏. 1965. 我国中生界含油气盆地的大地构造特征及有关问题//朱夏. 朱夏论中国含油气盆地构造. 北京: 石油工业出版社, 1-26.
- 朱夏. 1983. 中国中生代盆地构造和演化. 北京: 科学出版社.

- Allen P A, Allen J R. 1990. Basin Analysis: Principles and Applications. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Allen P A, Allen J R. 2005. Basin Analysis: Principles and Applications, Second Edition. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- Allen P A, Allen J R. 2013. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment, Third Edition. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- Bally A W, Snelson S. 1980. Realms of subsidence//Miall A D (ed.). Facts and principles of world petroleum occurrence. Canada Society of Petroleum Geologists, Memoir, 6: 9-94.
- Busby C, Azor A. 2012. Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. Oxford: Wiley-Blackwell.
- Busby C, Ingersoll R V. 1995. Tectonics of sedimentary basins. Cambridge, Massachusetts: Blackwell Science, 579.
- Cloetingh S, Sassi W, Horvath F, Puigdefabregas C. 1993. Basin analysis and dynamics of sedimentary basin evolution. *Sediment Geol*, 86: 1-201.
- Dauphas N, Cates N L, Mojzsis S J, Busigny V. 2007. Identification of chemical sedimentary protoliths using iron isotopes in the >3750 Ma Nuvvuagittuq supracrustal belt, Canada. *Earth and Planetary Science Letters*, 254(3): 358-376.
- Dickinson W R. 1974. Plate tectonics and sedimentation//Tectonics and sedimentation. SEPM (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists). Special Publication, 22: 1-27.
- Dickinson W, Anderson R N, Biddle K T, Clifton H E, Carven G, Gurnis M C, Ingersoll R V, Kominz M A, Miller E I, Walter L M, Warner J L, Weimer P, Westrich J T, Zeitler P K. 1997. The Dynamics of Sedimentary Basins. USGC, Washington D. C.: National Academy of Sciences.
- Einsele G. 1992. Sedimentary Basins: Evolution, Facies and Sediment Budget. Berlin: Springer-Verlag.
- Grabau A W. 1924. Stratigraphy of China: Part I, Palaeozoic and older. Peking: Geological Survey of China.
- Ingersoll R V. 2012. Tectonics of sedimentary basins, with revised nomenclature//Busby C, Azor A (eds.). Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. Cambridge: Blackwell, 3-46.
- Ingersoll R V, Busby C J. 1995. Tectonics of sedimentary basins//Busby C J, Ingersoll R V (eds.). Tectonics of Sedimentary Basins. Cambridge: Blackwell, 1-52.
- Liu H. 1986. Geodynamic scenario and structural styles of Mesozoic and Cenozoic basin in China. *AAPG Bulletin*, 70(4): 337-395.
- Miall A D. 1984. Principles of Sedimentary Basin Analysis. Berlin: Springer-Verlag.
- Miall A D. 1990. Principles of Sedimentary Basin Analysis (2nd Ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- Pan C H. 1941. Non-marine origin of petroleum in North Shensi, and the Cretaceous of Szechuan. *AAPG Bulletin*, 25(11): 2058-2068.
- Potter P E, Pettijohn F J. 1977. Paleocurrents and Basin Analysis. Berlin: Springer-Verlag.
- Quinlan G, Walsh J, Sassi W, Cloetingh S, Skogseid J, Lobkovsky L, Bois C, Stel H, Banda E. 1993. Relationship between deeper lithospheric processes and near-surface tectonics of basins. *Tectonophysics*, 226: 217-225.
- Vilotte J P, Melosh J, Sassi W, Ranalli G. 1993. Lithosphere rheology and sedimentary basins. *Tectonophysics*, 226: 89-95.
- Zoback M D, Stephenson R A, Cloetingh S, Larsen B T, Van Hoorn B, Robinson A, Horvath F, Puigdefabregas C, Ben-Avraham Z. 1993. Stresses in the lithosphere and sedimentary basin formation. *Tectonophysics*, 226: 1-13.

第2章 地球的圈层结构

地球具有圈层结构，可分为地球外圈和地球内圈。地球外圈包括大气圈、水圈和生物圈；地球内圈包括三个基本圈层，即地壳、地幔和地核。沉积盆地的形成演化至少涉及其中五个圈层的相互作用。

2.1 地球外圈的主要特征

2.1.1 大气圈

大气圈位于地球圈层的最外圈，是围绕着地球的一层混合气体，包围着海洋和陆地。大气圈厚约 1000 km，但并没有确切的上下界，在离地表 3000~16000 km 的高空仍有稀薄的气体和基本粒子，在地下，土壤和某些岩石中存在少量气体，也是大气圈的组成部分。

大气圈是由混合气体、水汽和悬浮物组成的。除去水汽和杂质的空气称为干洁空气。干洁空气的主要成分为 78.09% 的氮，20.94% 的氧，0.93% 的氩。这三种气体占总量的 99.96%，其他总含量为 0.04% 的微量气体包括氦、氖、氦、氙等稀有气体。

大气圈自下而上分为对流层、平流层、中间层、电离层等。

对流层(troposphere)是大气圈的最下层，其底界与地面相接，顶界高度随地理纬度和季节而变化。在赤道和低纬度地区平均高度为 17~18 km，在中纬度地区平均高度为 10~12 km，在地球两极和高纬度地区平均高度为 8~9 km。对流层顶界的高度在夏季高于冬季。对流层的主要特征包括两个方面：①温度随高度的增加而降低。这里不能直接吸收太阳的短波辐射，但能吸收地面反射的长波辐射，因而从底层加热大气，致使对流层的空气下热上冷。从地面向上，每增高 1 km，气温约下降 6.5℃。②风云变幻多姿。对流层是大气中最稠密的一层，集中了约 75% 的大气质量和 90% 以上的水汽质量。由于空气温度下热上冷，冷热空气会发生垂直对流；又由于地貌的海陆之分、温度的昼夜之别及高低纬度之差，空气会发生水平运动。这些因素造成了种种冷热气团的风云际会，水汽形成雨、雪、雹、霜、露、云、雾等一系列天气现象。

平流层(stratosphere)是从对流层顶到约 55 km 高度的大气层。平流层的主要特征包括两个方面：①大气中氧分子受短波紫外线照射形成臭氧(ozone)，臭氧含量在 25~50 km 高处最多，形成臭氧层，是保护地球上生物免受太阳紫外线及高能粒子袭击的天然屏障层。②臭氧吸收太阳紫外线辐射后能对大气加热，致使气温随高度的增加而递增。因此，平流层中空气下冷上热，垂直对流极弱，气流主要表现为水平运动，又由于平流层内基本没有水汽，很少发生天气变化，适于飞机航行。

中间层(mesosphere)是指自平流层顶到 85 km 之间的大气层，其物质组成以氮气和

氧气为主,几乎没有臭氧。中间层的主要特征为,气温下热上冷,垂直递减率很大,顶部的温度为 $-83\sim-113^{\circ}\text{C}$,因此出现空气对流运动。当然,由于这里空气稀薄,对流的强度远远比不上对流层。

电离层(ionosphere)是从中间层顶部开始一直向上伸展到约 1000 km 高度的地球高层大气空域。该层的主要特征包括两个方面:①空气处于高度电离状态。在 270 km 高度处,空气密度约为地面空气密度的百亿分之一。由于空气密度小,在太阳紫外线和宇宙射线的作用下,氧分子和部分氮分子被分解,并处于高度电离状态。②气温随高度增加而迅速升高,在 300 km 高度处,气温可达 1000°C 以上。故电离层又称暖层(thermosphere)。电离层具有反射无线电波的能力,对无线电通信有重要意义。

外层(exosphere)位于大气圈之外,是大气圈向星际空间过渡的区域,外层没有明显的外边界。在通常情况下,上部界限在地磁极附近较低,近磁赤道上空在向太阳一侧,有 9~10 个地球半径高。这里的温度很高,可达数千摄氏度,大气极其稀薄,其密度仅为海平面处大气密度的一亿亿分之一。

2.1.2 水圈

地球上的水以气态、液态和固态三种形式存在于空中、地表和地下,这些水不停地运动着和相互联系着,以水循环的方式共同构成水圈。水圈是一个连续不规则的圈层,其范围向上伸展至大气对流层顶以上,向下可及的深度平均约 1000 m。按照水体存在的方式可以将水圈划分为海洋、河流、地下水、冰川、湖泊五种主要类型。

地球的总储水量约 $1380\times 10^6\text{ km}^3$,其中海洋水为 $1338\times 10^6\text{ km}^3$,约占全球总水量的 97%。然而,这些海水却不能饮用。人类主要利用的淡水只有不到 3%,约 $35\times 10^6\text{ km}^3$ 。它们大部分则以冰川、永久积雪和多年冻土的形式储存,极地冰川的储水量约 $25\times 10^6\text{ km}^3$,约占世界淡水总量的 70%,其余少部分分布在湖泊、河流、土壤和地表以下浅层地下水中。地下水和土壤中的储水量约 $8\times 10^6\text{ km}^3$,约占世界淡水总量的 23%。地表水的储水量约 $2.3\times 10^6\text{ km}^3$,约占世界淡水总量的 6%。此外,在大气中还有 $0.013\times 10^6\text{ km}^3$ 的水蒸气。

水圈是一个永不停息的水循环动态系统。在太阳辐射和地球引力的作用下,水在水圈内各组成部分之间不停地运动着,构成不同尺度的水循环。地球上循环的水量每年大体为 $42\times 10^4\text{ km}^3$,其中降落陆地上的约为 $10\times 10^4\text{ km}^3$,而后通过江河流入海洋的水量约 $4\times 10^4\text{ km}^3$ 。

水循环分为海陆间循环、陆地内循环和海洋内循环。从海洋蒸发出来的水蒸气,被气流带到陆地上空,凝结为雨、雪、雹等落到地面,一部分被蒸发返回大气圈,其余部分成为地面径流或地下径流等,最终回归海洋。还有一部分比较长久地储存于内陆湖泊和冰川中。海洋和陆地之间水的往复运动过程,称为水的大循环。仅在局部地区(陆地或海洋)进行的水循环称为水的小循环。大、小循环交织在一起,在全球范围内和在地球上各个地区内不停地进行着,把各种水体连接起来,使得各种水体能够长期存在。

水循环使地球上各种形式的水以不同的周期或速度更新。水的这种循环复原特性,可以用水的交替周期表示。由于各种形式水的储蓄形式不一致,各种水的交换周期也不

一致。大气圈中的水分参与水圈的循环,交替速度较快,周期仅几天,河水交换周期也仅仅为几天,湖泊淡水的交换周期为10~100年,地下水的交替周期为100~1000年,海洋水体的交替周期约5000年,而冰川水的交替周期则为10000年。

2.1.3 生物圈

生物圈的概念是由奥地利地质学家休斯(E. Suess)在1875年首次提出的,是指地球上所有生命活动的领域及其居住环境的整体(Wikipedia, 2001)。它并不单独占有空间,其范围包括大气圈的底部、水圈的全部和岩石圈的上部。

生物圈是地球上所有生命存在的特殊圈层。就目前所知,在宇宙中所有星球中只有地球上存在生物圈。

生物圈主要由生命物质、生物生成性物质和生物惰性物质三部分组成。生命物质是生物有机体的总和;生物生成性物质是由生命物质所组成的有机矿物质相互作用的生成物,如煤、石油、泥炭和土壤腐殖质等;生物惰性物质是指大气低层的气体、沉积岩、黏土矿物和水。因此,可以说生物圈是一个生命物质与非生命物质的自我调节系统。

生物圈存在的基本条件如下:

(1)来自太阳的充足光能。因一切生命活动都需要能量,而其基本来源是太阳能,绿色植物吸收太阳能合成有机物而进入生物循环。

(2)存在可被生物利用的大量液态水。几乎所有的生物全都含有大量水分,没有水就没有生命。

(3)适宜生命活动的温度条件,在此温度变化范围内的物质存在气态、液态和固态三种变化。

(4)提供生命物质所需的各种营养元素,包括C、N、P、S、K、Ca、Fe等,它们或是生命物质的组成,或是生命活动的中介。

生物圈是地球上自然地理环境系统中最活跃的圈层,生物的生命活动促进了能量流动和物质循环,并引起生物的生命活动发生变化。生物要从环境中取得必需的能量和物质,就得适应环境,环境发生了变化,又反过来推动生物的适应性,这种反作用促进了整个生物界持续不断的变化。

2.2 地球内圈的主要特征

2.2.1 地球内圈结构的划分

对地球内圈结构的划分需要借助有效的识别工具,这个有效的工具就是地震波,可以说,地震波是照亮地球内部的一盏明灯。

地震发生时,地下物质受到强烈的冲击会发生弹性振动,并以波的形式向四周传播,这种弹性波被称为地震波。19世纪,人们在研究天然地震时发现,震源会产生在地下传播的体波和沿地表传播的面波,其中体波又分为传播速度不同的两种波,速度快的波先被记录到,称为P波(primary wave),速度慢的波后被记录到,称为S波(secondary wave)。

P 波传播时, 质点的振动方向与传播方向一致, 这种波又被称为压缩波或纵波。S 波传播时, 质点的振动方向与传播方向垂直, 因而又被称为剪切波或横波。由于地球内部物质不均一, 地震波在不同弹性、不同密度介质中的传播速度和通过的状况也不一样。P 波在固体、液体和气体介质中都可以传播, 速度也较快; S 波只能在固体介质中传播, 速度比较慢。地震波在密度不同的介质中具有不同的传播速度, 当遇到不同介质相邻的界面时, 地震波不仅会改变速度, 而且会发生折射和反射。正是利用这一特性, 人们间接地知道了地球内部具有圈层结构(曾融生, 1984; 滕吉文, 2003)。

1897 年, 英国人 Richard Dixon Oldham 首先在地震图上识别出了 P 波和 S 波, 拉开了用地震波研究地球内部结构的帷幕。1906 年, Oldham 研究发现, 地震波速度随深度增加到一定深处后开始降低, 表明地球具有双层结构, 内部存在一个致密的液态地核。1909 年, 南斯拉夫地震学家 A. Mohorovicic 发现, 在地下 30~60 km 深处存在一个地震波速度突增的界面, P 波速度从 6~7 km/s 跃增到 8 km/s 以上, 他把这个界面作为地壳与地幔的界面, 后人以 Mohorovicic 的名字命名, 称为莫霍(Moho)面。德国地震学家 B. Gutenberg 于 1914 年发现, 在地下大约 2900 km 深处, P 波速度突然从 13 km/s 下降到 8 km/s 左右, 指出其为地幔与地核的界面, 后人称为古登堡界面(G 面)。至此, 确立了地球的“地壳-地幔-地核”三层结构模型。1936 年, 丹麦地震学家 Inge Lehman 在纵波影子区中识别出新震相, 是地核中一个介质层面的反射, 记为 L 面。从而, 她提出地核具有双层结构, 外核为液态, 而内核为固态。

除上述几个大的界面外, 人们发现地球内部还有另一些较大的界面。例如, 康拉德(V. Conrad) 1925 年在奥地利进行观测时, 发现在地壳中部存在一个不连续面, 后人称为康拉德界面, 把地壳分为上地壳和下地壳。在康拉德界面上地震波发生加速, P 波由 5.6 km/s 左右增加到 7.6 km/s 左右, S 波由 3.2 km/s 左右增加到 4.2 km/s 左右。不过, 康拉德界面常常不好确定, 一些地区可能在几千米厚的区间内逐渐变化。再如, 古登堡于 1926 年发现在 100~200 km 深处, P 波和 S 波的速度都有明显的降低, 他据此提出, 上地幔上部存在一个低速层。

上述地球内部的圈层结构在 20 世纪 50 年代就已大体确定。后来, 人们不断提出日益细化的地球的分层结构模型, 如古登堡(Gutenberg)模型、布伦(Bullen)模型等。1981 年, Dziewonski 和 Anderson 提出初步地球参考模型(preliminary reference earth model, PREM), 经国际地球标准模型委员会推荐成为国际参考模型, 并于翌年在国际地震学与地球内部物理学委员会(IASPEI)上正式通过(滕吉文, 2003)。本书关于地球内部分层的数据就是参考了 PREM。

2.2.2 地壳

地壳位于地球内圈的最上层。根据厚度, 地壳大体上可被划分为大陆型(30~80 km)、过渡型(15~30 km)和大洋型(5~15 km)。大陆壳加过渡壳组成地壳总面积的 41%和总体积的 79%。

无论是大陆型还是大洋型地壳, 一般都由三个地震波速层组成。大陆地壳的顶部为沉积岩层, P 波速度为 2~4 km/s, 厚度为 0~5 km; 上地壳 P 波速度为 5.8~6.2 km/s,