

● 高等院校地质专业研究生教学用书

碎屑岩系 油气储层沉积学

(第二版)

于兴河 编 著



石油工业出版社

校地质专业研究生教学用书

中国地质大学(北京)研究生教材基金
教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目

联合资助

碎屑岩系油气储层沉积学

(第二版)

于兴河 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

油气储层沉积学是储层地质学与沉积学相结合而产生的新兴学科,它属于沉积学中的一个重要分支,即应用沉积学的范畴。碎屑岩系地层则是我国最主要的油气资源储层。

本书综合国内外有关储层沉积学研究的众多资料,并结合笔者多年的教学与研究心得,对碎屑岩储层的基本特征、沉积作用、成岩作用、非均质性、各种沉积体系的沉积模式及储层特点做了详细论述。

本书作为一本储层沉积学的研究生教学用书,可供广大从事储层研究、油气勘探、开发人员及高等院校相关专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

碎屑岩系油气储层沉积学(第二版)/于兴河编著.

北京:石油工业出版社,2008.3

ISBN 978-7-5021-6399-0

I. 碎…

II. 于…

III. 碎屑岩-油气聚集-储集层-沉积学

IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第195903号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523544 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2008年3月北京第2版 2008年3月北京第2次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 35

字数: 873千字 印数: 2001—4000册

定价: 98.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

再版前言

《碎屑岩系油气储层沉积学》一书于2002年9月第一次出版,迄今已届5年有余,在此期间该书一直作为高等院校地质类专业研究生的教材,尤其是在中国地质大学(北京)的广泛采用,得到了广大师生的认可与好评。在国内有关油气储层和沉积学的各种专业培训中,尤其是中国石油、中国石化和中国海洋三大石油公司及其油田系统的专业培训中,该书被作为教材使用20多次,受到了工业界与学术界专业人员的普遍关注及青睐。随着油气勘探开发工作的发展,越来越多的石油地质科技工作者认为该书不仅对科研工作具有理论指导作用,也对油气勘探开发实践具有非常重要的实用价值,十分希望此书能够再版。在该书的使用过程中,一些热心读者指出了第一版中的不足之处,并提出了许多宝贵的修改意见。另外,由于近年来科研工作的深入以及笔者在储层沉积学方面又有了一些新的积累,希望能够再系统地修改与增补该书,故又萌发了再版该书的愿望。鉴于以上原由,笔者重新整理原稿,结合近几年的教学笔记、科研成果、公开发表的文章、新的学术观点以及其他学者的最新成果,最后笔者用了200多个日日夜夜对全书进行了逐字逐句修订并增加了部分章节,终于完成了本书的再版编著。成书之际,还是借鉴第一版前言中的语句来表达此时的心境:“‘吾生也有涯,而知也无涯’,自知管窥蠡测,聊作抛砖引玉”。

本书共十二章,内容涉及碎屑岩油气储层沉积学的诸多方面,除包括国内外有关储层研究的最新动态、储层的基本特征、成岩作用及储层非均质性等基础知识外,还包括碎屑岩各类沉积体系(冲积扇、河流、湖泊、三角洲、滨岸及深水)的沉积特点与储层特性;对各体系的分类、地质特征、沉积序列、识别标志、相模式及其相应的储层特征等均进行了较为详细的论述。另外,鉴于目前层序地层学在中国的发展比较迅猛,故又新增了第三章“碎屑岩层序地层研究的理论与方法”。

再版过程中,参加本书编写与修改增补工作的有李胜利副教授(第三章、第十章)、郑秀娟博士(绪论)、白振华硕士(第三章和第四章)、付菊硕士(第五章),同时,邹德江、杨帆、任小军、常淑云、詹路锋、张书平、李梅、孙相灿、苑坤、高栋臣等也参与本书的查错与增补及资料整理工作,郑秀娟博士对第一版文字进行了全面校对。另外,裘怿楠教授、王德发教授、郑浚茂教授、田世澄教授等专家和学者也提出了很好的修改建议,在此一并表示感谢。需要指出的是中国地质大学(北京)研究生院在此书的再版中给予了大力资助,同时还得到了教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20050491001)的资助。特别值得一提的是笔者的夫人于胡忆虹女士和参加本书工作的全体人员的家属,在本书漫长而繁忙的编写与修改的日日夜夜里,表现出极大的耐心、热情及全身心的支持,笔者对他们的感激之情已不是“谢谢”二字所能涵盖的。

笔 者

2007年12月于北京

第一版前言

笔者经过近 20 年的教学与科研实践,在油气储层沉积学方面积累了一些心得和体会,加上近年来在地学专业大学本科与研究生的教学中发现缺少一本这样的系统教材,因此一直有个心愿,希望在储层沉积学方面写一本综合性的教科书。目的是通过学习和交流,一方面提高我国高校地质专业本科与研究生的专业素质,另一方面推动这一学科在我国学术界和生产单位的研究和应用,使其能更好地为石油及相关工业所利用,从而发展这一学科并服务于实际生产。但笔者迟迟未敢和未能动笔,正是因为国内外的相关书籍很多,加上知识更新又十分迅速,恐不能写出其真谛。恰值此时,应中国石油学会物探专业委员会之邀进行储层沉积学的培训,笔者在与袁秉衡和王德发两位教授多次讨论讲课提纲的基础上,综合多年的试用教材、教学笔记、科研成果以及前人的知识与认识,终于下笔完成了本书的编著,借此东风完成了这一夙愿,也算是为地质事业的发展尽一点自己的微薄之力。但在最后合笔之时,才真正感到“吾生也有涯,而知也无涯”,自知管窥蠡测,聊作抛砖引玉。

本书内容涉及碎屑岩油气储层沉积学的许多方面,全书共十一章,除包括国内外有关储层研究的最新动态、基本特征、成岩作用及储层非均质性等基础知识外,还包括碎屑岩各类沉积体系(冲积扇、河流、湖泊、三角洲、滨岸、重力流)的沉积特点与储层特性;对各体系分类、地质特征、沉积序列、识别标志、相模式及其相应的储层特征等进行了较为详细的论述。笔者力求言简意赅,特色鲜明地阐述各部分内容,因而大量引用了国内外的相关图件及本研究组近 20 年来的部分成果。笔者衷心希望本书能成为大家的朋友,如果在今后的学习和工作中,大家能从本书中得到一些启发和心得,这便是笔者最大的欣慰和满足。协助本书编写工作的有李胜利(第九章)、张志杰(第三章第三节,第十一章)、张兴权(第八章)、马兴祥(第七章)、高兴军(第三章第二节);另外参与本书校对的人员还有郑秀娟、陈永峭、陈占坤、姜辉、李庆明及陈瑞等。

本书在编写过程中参阅了大量中英文资料,力求涉及储层沉积学的各个方面,但由于篇幅与时间关系,难免挂一漏万,错误与纰漏也在所难免,望各位专家与同仁不吝批评和指正。笔者希望把本书的出版当作一次学术参与和交流,能给大家带来更多的启示。学海无涯,唯不辞辛劳者可窥其一斑,笔者愿与大家共勉。编写过程中得到了袁秉衡教授的大力支持,王德发与郑浚茂教授为此书的出版提出了一些良好的建议,并提供了部分资料,同时参与本书编写和修订的各位同仁也不辞辛苦,在此一并表示感谢。特别值得一提的是,中国地质大学(北京)研究生院与教务处对此书的出版在资金上给予了大力资助,同时也得到了“973”边缘海项目的资助。尽管笔者清楚所有这一切决非用感谢二字所能表达和包容,但还是要由衷地向各位道一声谢谢!

谨以此书向中国地质大学 50 周年校庆献礼!

笔 者

2002 年 5 月于北京

目 录

绪论	(1)
第一章 储层沉积学的形成、发展与趋势	(14)
第一节 储层沉积学的概念、性质与任务	(14)
第二节 储层沉积学研究的动态、趋势及方法	(17)
第三节 国内外油气储层研究动向	(25)
第二章 碎屑岩储层的基本特征	(34)
第一节 碎屑岩储层的岩石学特征	(34)
第二节 储层的物理特性	(36)
第三节 储层的几何特性	(47)
第三章 碎屑岩层序地层研究的理论与方法	(55)
第一节 层序地层学形成与发展	(55)
第二节 海相碎屑岩层序地层学理论体系	(58)
第三节 陆相碎屑岩层序地层学理论体系	(69)
第四节 高分辨率层序地层学理论体系	(77)
第五节 陆相碎屑岩层序格架研究方法	(83)
第六节 碎屑岩层序地层学在油气勘探开发中的应用	(99)
第四章 沉积相的研究方法与沉积作用	(104)
第一节 流体动力学的概念与水动力条件分析	(104)
第二节 粒度分布特征及其环境意义	(114)
第三节 沉积构造特征及其识别	(126)
第四节 岩心描述与岩相划分	(142)
第五节 测井相的识别与模式	(149)
第六节 地震相分析	(163)
第七节 碎屑岩的八大沉积作用	(173)
第五章 储层成岩作用	(179)
第一节 研究方法及其内容	(179)
第二节 成岩作用和孔隙演化	(191)
第三节 成岩阶段划分及其演化模式	(208)
第六章 储层非均质性	(220)
第一节 概念与影响因素	(220)
第二节 储层非均质性的分类	(221)
第三节 非均质性的研究与定量描述	(225)
第四节 储层非均质性与油气采收率	(235)
第七章 冲积扇沉积体系	(239)
第一节 冲积扇的基本特征与分类	(240)

第二节	冲积扇的沉积作用、沉积物类型及其特征	(244)
第三节	冲积扇的沉积环境及其沉积序列	(246)
第四节	冲积扇沉积的鉴别	(251)
第五节	冲积扇的几何形态及其储层特征	(253)
第八章	河流沉积体系	(259)
第一节	河流的分类	(260)
第二节	不同河型的基本特征	(275)
第三节	沉积环境及其沉积序列	(282)
第四节	河流沉积的识别	(300)
第五节	河流体系的储层特征及预测	(303)
第九章	湖泊沉积体系	(308)
第一节	湖泊分类与基本特征	(308)
第二节	湖泊相带划分与特点	(315)
第三节	湖泊垂向沉积序列及其演化模式	(322)
第四节	湖泊沉积的识别	(332)
第五节	湖泊砂体类型	(334)
第十章	三角洲沉积体系	(338)
第一节	三角洲的基本特征、分类及其模式	(339)
第二节	三角洲形成的水动力状态及沉积作用特点	(345)
第三节	三角洲的形成、发育及废弃	(351)
第四节	三角洲沉积环境及相的划分	(360)
第五节	各种三角洲的沉积机理	(367)
第六节	三角洲的层序特征	(373)
第七节	扇三角洲	(379)
第八节	辫状三角洲	(395)
第九节	三角洲的识别	(402)
第十节	三角洲砂体储层特征及实例	(407)
第十一节	三角洲沉积与油气的关系	(417)
第十一章	砂质海岸(滨海)与浅海沉积体系	(421)
第一节	砂质海岸的基本特征与分类	(422)
第二节	海岸的水动力条件	(423)
第三节	无障壁海岸环境	(427)
第四节	有障壁海岸环境	(434)
第五节	陆源碎屑海岸的识别标志	(444)
第六节	海岸环境的储层特征	(447)
第七节	浅海沉积及垂向序列特征	(449)
第八节	风暴流及其沉积特征	(454)
第十二章	深水沉积体系	(467)
第一节	深水沉积作用	(467)
第二节	沉积物重力流	(472)

第三节 沉积物重力流形成机理..... (478)

第四节 鲍马序列及其特征..... (486)

第五节 重力流沉积相与相模式..... (489)

第六节 深海等深流沉积..... (503)

参考文献..... (514)

附录一 词汇表..... (529)

附录二 图版..... (540)

绪 论

随着全球油气勘探与开发程度的不断深入,以油气储层或油气藏为对象的精细描述与研究逐步深入,油气储层的外观形体——空间展布与其内部属性——物理特性则成为油气勘探与开发的研究重点。然而,不同地质条件下油气储层的外部形体(构形)与其内部属性的分布规律则主要受其形成环境和条件的制约。就沉积储层而言,不同沉积体系所形成的油气储层具有不同的展布规律和非均质性特征,这就需要从沉积学的角度来分析不同储层形成的地质作用和沉积环境,而成岩作用则对储层的内部属性具有明显的影响。可以说影响油气储层非均质的三大因素“构造演化的阶段性、沉积环境的多样性以及成岩作用的复杂性”决定着油气储层的综合特性,这一基本地质认识和理论为储层沉积学的形成奠定了坚实的基础。

由于储层沉积学是沉积学的一个重要分支,属于应用沉积学的范围,这就有必要对沉积学的形成与发展进行一个全面的回顾,为分析储层沉积学的历史、研究动态与发展趋势奠定基础。同时,沉积环境和沉积相又是沉积学的重要组成部分,是恢复岩相古地理、研究沉积体系展布、解释地震相、建立等时层序地层格架、进行盆地分析以及预测有利储层分布的基础。这就更需要明确沉积环境与相的概念及其内涵,了解相模式的作用以及与储层模型的不同。

一、沉积学的形成与近代发展

沉积学的概念最早是由 H. A. Wadell 于 1932 年提出的,当时只是简单地定义为“研究沉积物的科学”。直到 1978 年, G. M. Friedman 和 J. L. Sanders 在《沉积学原理》一书中才对沉积学的研究领域给予了比较完整的定义,即:“研究沉积物、沉积过程、沉积岩和沉积环境的科学”。1980 年出版的 Glossary of Geology 一书中将沉积学定义为“对沉积物的来源、沉积岩的描述和分类以及沉积物形成过程进行研究的学科”。

从沉积学概念的提出到现今,所经历的风雨历程正是由于全球沉积学家的不懈努力,才使得沉积学不断发展、充实及完善。首先,在其发展历程中现实主义——“将今论古”的原理起到了推波助澜的作用;1837 年, S. C. Lyell 在他正式出版的《地质学原理》专著中提出“现代正在进行着的地质作用也曾以基本相同的强度或方式在整个地质时期发生过,古代的地质事件可以用今天所观察到的现象和作用加以解释”,即“现代是认识过去的钥匙”(A. Geikie, 1905 年)。其次,不同学科的交叉与渗透,如海洋学、物理学、化学、大气学、水文学、板块构造学、石油地质学、古生物学、地球物理测井、地震地层学等与沉积学的相互渗透,对其发展也起到了不可忽视的作用。再者,新技术的引入加速了沉积学的发展,如偏光显微镜、X 衍射仪、扫描电镜、能谱仪、质谱仪、计算机等新仪器设备的发明、利用及推广。

沉积学的发展经历了近代与现代两大时期,其中近代可划分为三个阶段。

(一) 萌芽阶段 (1830—1894 年)

这一阶段侧重于古生物地层、煤和生物礁的研究。1837 年, S. C. Lyell 推出划时代的《地质学原理》专著,提出了“将今论古”的现实主义原理与方法,这一思想成为以后地质

科学领域各方面研究的指南；1857 年，H. C. Sorby 首次使用偏光显微镜研究岩石，并指出“利用所有偏振光手段是绝对必须”的观点，从此拉开了对岩石进行镜下微观研究的序幕；1884 年，美国的 J. Murray 和 A. F. Renard 合著了《深海沉积物》一书，对深海沉积物进行了分类与描述；1894 年，J. Walther 撰写了《作为历史科学的地质学导论》，并提出了“相序”的概念，即 Walther 相律“相的垂向相序也是它的横向相带——在没有沉积间断的条件下，只有在横向上相邻及相依的相，才能在垂向上互相叠覆”。这期间专著不多，但其分量与学术观点在沉积学中的地位不容忽视，甚至影响至今（表 1）。

表 1 1950 年以前沉积学发展中的代表作及其贡献

阶段	时间	作 者	书名或文章名	主要观点或作用及意义
萌芽	1837	C. Lyell	《地质学原理》	提出了“将今论古”的现实主义原理
	1884	J. Murray 等	《深海沉积物》	开始了深海沉积物的分类与描述
	1894	J. Walther	《作为历史科学的地质学导论》 (共三卷)	提出了 Welther 相律，首次使用了“比较岩石学”一词
初步形成	1905	Vaat Hoff	《蒸发岩》	提出了化学沉淀的观点
	1913	F. H. Hatch 等	《沉积岩石学》	沉积岩石学已从地层学中分离成为一门独立的地球科学分支学科；从此开始了水槽实验的研究；粒级的划分走向科学量化，并开始重视其形成的沉积作用研究
	1922	H. B. Milner	《沉积岩石学导论》	
	1922	C. K. Wentworth	《碎屑岩的粒级范围和分类术语》	
	1925	Twenhorel	《沉积作用教程》	
	1926	W. H. Twenhorel	《沉积作用论文集》	
	1929	Lucien Cayeux	《法国沉积岩》	标志着沉积学已成为一门独立的学科
	1931	美国的 SEPM 学会	创刊了《沉积岩石学》杂志	
专业研究	1932	Д. В. Наивкин (纳利夫金)	《相论》	沉积岩石学由定性研究趋于半定量化，更重视沉积作用与沉积物形成机制的研究
	1932	М. С. Швецов (什维佐夫)	《沉积岩石学》	
	1939	P. D. Trask (特拉斯科)	《近代海洋沉积物》	
	1939	Twenhorel	《沉积作用原理》	
	1940	М. С. вечов (普斯托瓦洛夫)	《沉积岩石学》	沉积岩石学达到成熟阶段的重要标志
	1949	F. J. Pettijohn	《沉积岩》(1975 年修订出版第三版)	
	1950	P. D. Trask (特拉斯科)	《应用沉积作用》	

(二) 初步形成阶段（1894—1931 年）

由于社会发展对矿产的需求，地质勘探工作显得十分重要，促使人们对沉积物（岩）进行了大量的研究工作，积累了一些资料，并在此基础上出版了一批沉积岩石学专著与文章（表 1），早在 1881 年就开始用显微镜研究重矿物，并由此分析沉积物的物源方向与性质。1913 年，F. H. Hatch 和 R. H. Rastall 合著了第一本《沉积岩石学》；1914 年，G. K. Gilbert 为了解决金矿用水力采矿的问题，首次用各种粒径的砂和不同的水流强度进行了水槽实验，这为沉积学提供了流体力学实验的一个重要步骤；1922 年，H. B. Milner 著出了《沉积岩石学导论》；1926 年 W. H. Twenhorel 主编了《沉积作用论文集》；1929 年，法国人 Lucien Cayeux 出版了《法国沉积岩》第一卷，即硅质岩部分。1922 年，C. K. Wentworth 提出以 2 的幂次作为划分碎屑沉积颗粒的粒级界限，并以 2mm 作为砂的粒级上限，从而使砂岩和砾

岩的分类走向了科学的量化领域；1931年，美国的 SEPM 学会创刊了《沉积岩石学》杂志。这些著作的问世，表明沉积岩石学已从地层学中分离成为一门独立的学科。

（三）专业研究阶段（1932—1950年）

随着差热分析、X 衍射等新技术在沉积学领域的应用，沉积岩研究趋于半定量化。这一时期相继出版和发表了一系列沉积岩石学专著与文章（表 1）。1932 年，前苏联的纳利夫金（Д. В. Наивкин）出版了《相论》；1932 年与 1940 年，什维佐夫（М. С. Швецов）和普斯托瓦洛夫（М. С. Вечов）分别出版了《沉积岩石学》；特拉斯克（P. D. Trask）分别于 1939 年印出《近代海洋沉积物》和 1950 年出版《应用沉积作用》。1940 年，M. T. Halbouty 研究了墨西哥湾物源、海水进退、古岸线变化、地层尖灭和油气远景；1934 年，W. C. Krumbein 对沉积环境所作的定量研究，使用了碎屑的圆度和形状，指出边界条件、颗粒及能量为沉积体系中的三个主要因素，并率先将统计学应用到了沉积学中；1949 年，F. J. Pettijohn 编写了《沉积岩》一书，该书的出版标志沉积岩石学已进入成熟的成长期。因而，近代沉积学的发展可以说是以沉积岩石学单学科的研究为主题，探讨各种常规沉积岩的形成机理。

二、现代沉积学的发展与特色

自第二次世界大战结束、全球进入冷战时期以来，各国都对发展科学技术给予了极大的重视，并加大了投入，科学界受到激励和新的需求影响，各门学科都在加速发展，其特点是科学本身的分工趋于精细，沉积学的发展也不例外。正是由于现代科学的迅猛发展，从 20 世纪中叶到 21 世纪初，沉积学的发展每 10 年就走上一个新的台阶，经历了四个明显的发展阶段。

（一）基本成熟阶段（20 世纪 50—60 年代）

二次世界大战后，世界各国加速发展国民经济建设，尤其是欧美。此时，全球工业革命进入了一崭新的历史时期，正是由于工业发展对矿产资源的需求，沉积学已经从基础理论纯科学渐渐转变成为应用科学，与生产实践的联系日益密切，尤其表现在石油和天然气的勘探方面。自 1950 年以来，对于现代沉积物的研究规模和研究方向均有很大的拓展，出版与发表的专著和文献也很多（表 2）。其中代表作有：1951 年，D. J. Doeglas 出版的《从沉积岩石学到沉积学》；1954 年，A. Vatan 发表的《沉积岩石学》；1957 年，E. D. McKee 发表的《现代沉积物中的原生沉积构造》一文；1963 年，F. J. Pettijohn 与 P. E. Potter 合作出版的《古水流和盆地分析》以及 1964 年出版专著《原生沉积构造图谱及术语》；1965 年，G. S. Visher 用沉积柱状剖面进行沉积环境的重塑等。这一时期内，H. N. Fisk 对现代密西西比三角洲作了详细的研究；L. V. Illing 对于巴哈马滩的研究是首次对于现代碳酸盐沉积的细致研究，对于人们从新的观点来认识碳酸盐岩起了很大的推动作用。这个时期突破性的进展为模式化、成因解释及图解法的应用，具体表现在以下几个方面（它们使这一时期的沉积学发展具有划时代的意义）。

1. 浊流与牵引流的认识

人们在研究碎屑岩形成机制时，就认为牵引流是其形成的主要水动力方式。然而，1950 年 P. H. Kuenen 和 C. I. Migliorini 发表了《浊流为形成递变层理的原因》一文，从此揭开了浊流研究的新篇章。浊流的形成与分布研究，得到地学界的广泛重视，成为沉积学界的一场革命。其后，1961 年 A. H. Bouma 在 Kuenen 的指导下研究浊流及复理石建造，提出了浊流

沉积的特征，建立了著名的“鲍马序列”，随后他与 A. Bronwer 主编了《浊积岩》专著，形成了 20 世纪 50—60 年代的两大特色理论：碳酸盐岩生物化学成因论与浊流的“鲍马序列”。

表 2 基本成熟阶段的代表作及其贡献 (1951—1969)

时间	作 者	书名或文章名	主要观点或作用及意义
1950	P. H. Kuenen 等	《浊流为形成递变层理的原因》	揭开了浊流研究的新篇章
1951	D. J. Doeglas	《从沉积岩石学到沉积学》	沉积学作为沉积岩石学发展的一个新阶段和归宿，为地球科学开拓了一个新的领域
1955	叶连俊	《中国锰矿的沉积条件》	对中国沉积矿床的研究有着巨大的影响
1955	刘鸿允	《中国古地理图》	编制了我国第一部完整的古地理图集
1957	E. D. McKee	《现代沉积物中的原生沉积构造》	强调了不同沉积环境形成的原生构造特点
1957	F. J. Pettijohn	《沉积岩》	是沉积岩石学达到成熟阶段的重要标志，也是对半个世纪以来的沉积岩石学的历史总结
1959	R. L. Folk	《石灰岩的实用岩石学分类》	标志着碳酸盐岩研究进入了新阶段
1961	A. H. Bouma 等	《浊积岩》	提出了著名的鲍马序列
1961	曾允孚，刘宝珺主编	《沉积相及古地理教程》	结束了外国学者的著作占据我国高校课堂的局面，开始试用我国自己编写的沉积岩石学教材
1962	戴东林	《沉积岩石学》	
1962	刘宝珺主编	《沉积岩研究方法》	
1962	吴崇筠主编	《沉积岩石学》	
1963	P. E. Potter 等	《古水流和盆地分析》	率先将盆地作为一个整体进行沉积学研究
1964	业治铮，孟祥化，何起祥	《碳酸盐岩的结构成因分类》	标志着我国碳酸盐岩研究现代概念的开始
1967	W. L. Fisher 等	《得克萨斯地区 Wilcox 群沉积体系与 Gulf 海岸油气藏的关系》	提出了沉积体系概念及内涵

2. 水槽实验对沉积构造解释的作用

1960 年前后，美国地质学家应用水力学的概念进行水槽实验，并从其结果了解到层理和波痕形成的水动力条件 (D. B. Simons 和 E. V. Richardson, 1962)。根据他们的实验，发现当流速加大、深度减小时，非粘性床砂可出现无运动→下部平坦床砂→沙纹→沙浪→沙垅→过渡区→上部平坦床砂→逆行沙丘→冲坑和冲槽的床砂形体变化顺序。床砂底形的变化很好地解释了各种沉积构造：板状、槽状交错层理与平行层理形成的机理和水动力条件。

3. 粒度分析应用于水动力条件的解释

R. Passega 和 G. S. Visser 分别于 1964 年和 1969 年提出了 C—M 图和牵引流解释的累计概率图，用粒度定量的方法从水动力条件上进行沉积环境的分析与解释，使其成因分析更趋于科学化和可操作性。

4. 碳酸盐岩研究新阶段

1959 年，福克 (R. L. Folk) 将碎屑岩的成因观点引入到碳酸盐岩的分类之中，并对碳酸盐岩进行了分类和解释，揭示了碳酸盐岩与陆源碎屑岩在形成过程和机制方面的同一性，这标志着碳酸盐岩的研究方法与认识进入了一个崭新的阶段。

5. 垂向沉积序列或相模式的建立

1965 年，G. S. Visser 从垂向沉积序列的角度建立了 13 种相模式，其中包括四个河流

模式、四个海退模式、两个海进模式、一个三角洲模式、一个深海模式和一个湖相模式。垂向模式的建立, 这为沉积相的识别, 尤其是为野外与井下资料进行沉积相分析的具体操作奠定了基础。

(二) 总结提高阶段 (20 世纪 70 年代)

20 世纪 70 年代初期, A. V. Carozzi 将法国卡耶的《碳酸盐岩》一书译为英文, 并广为流传。与此同时, 1971 年, R. G. C. Bathurst 出版了《碳酸盐沉积物及其成岩作用》, 从此, 碳酸盐岩方面的研究基本趋于完备。这个时期, 沉积学方面的总结性专著大量涌现 (表 3): 1970 年, J. P. Morgan 主编了《现代和古代三角洲的沉积作用》, R. C. Selley 完成了《古代沉积环境》一书, J. R. Allen 写出了《沉积作用的物理过程》, R. M. Garrels 与 F. T. Mackenzie 合出了《沉积岩的演化》等。1972 年, H. Blatt 和 G. Middleton 等合著的《沉积岩成因》一书, 综述了形成沉积岩的各种机制, 引用了流体力学方面的研究成果; 同年, F. J. Pettijohn, P. E. Potter 及 R. Siever 合著的《砂和砂岩》一书正式出版, 该书是在 1964 年加拿大举办的研讨会的基础上, 总结了碎屑岩研究中的一些重要成果, 认为对于回溯地层历史, 砂岩能起到很重要的作用。1973 年, 德国的 H. E. Reineck 与印度的 I. B. Singh 合作从沉积构造研究出发出版了《陆源碎屑沉积环境》。1976 年, 加拿大的 R. G. Walker 编写了《相模式》一书, R. C. Selley 重著了《沉积学导论 (第二版)》。最值得一提的是 70 年代后期, 1978 年, 英国的 H. G. Reading 主编的《沉积环境和相》与同年美国的 G. M. Friedman 和 J. L. Sanders 出版的《沉积学原理》两本巨著, 系统总结了各种沉积环境的地质特征与形成机理, 反映了当时沉积学研究的最高水平。以上著作的特点是对沉积学的理论进行了全面的上升与总结, 尤其是碎屑岩, 形成了一些权威性著作, 为沉积学随后的发展奠定了坚实的基础。而我国学者此时主要是引进与学习国外的新理论与新技术, 各高校开始编写出了一批《沉积岩石学》与《沉积环境和沉积相》的试用教材, 使我国的大学生从零散的了解走向了系统的学习与掌握, 笔者就是在这些著作的引导下走进沉积学这一科学殿堂的。值得一提的是, 我国的部分高校 (武汉地质学院北京研究生部、成都地质学院等) 开始与生产部门结合, 对沉积矿产、油气资源进行沉积环境与矿产成因的研究, 出版了一些符合我国陆相沉积的论文与专著, 为我国的沉积学发展奏响了新的篇章。

综上所述, 这个时期的总体特点是: ①广泛开展沉积相识别标志的研究, 并建立了各种沉积环境的相模式, 使沉积学研究的可操作性加强; ②沉积相的研究具有明显的演化观, 即从演化的角度来分析沉积相的变迁; ③开始了全球沉积盆地范围的相分析; ④重力流的认识进入了颗粒支撑机理的解释与分类; ⑤将沉积学的理论应用于油气勘探与开发。

在石油工业面临大转折的 20 世纪 60—70 年代, 为了更好地利用沉积学的基本理论和方法来解释油气储层的形成演化, 预测储层的宏观和微观特性以及寻找油气藏, 于是一门新的学科——储层沉积学应运而生。

(三) 理论升华阶段 (20 世纪 80 年代)

对于全球沉积学来讲, 此时可以说是一个全面、迅速、蓬勃发展的时期, 同时对于我国沉积学界, 也是一个高速发展的历史阶段 (表 4)。这个时期出现了许多新观点、新认识及新理论, 尤其是对特殊沉积物的成因问题, 主要表现在以下几个方面。

1. 风暴沉积

1975 年, J. C. Harms 发现了丘状交错层理——风暴事件的标志性层理, 尽管丘状交错层理广泛形成于近滨—陆架之间 (W. L. Duke, 1985), 但在河口湾、潮坪以及三角洲边缘

环境 (J. Bourgeois, 1980) 乃至深水浊积岩中也发现了丘状交错层理, 因此, 必须将丘状交错层理和其他代表风暴事件的各种标志进行综合来判别。同时, R. H. Dott (1988) 在提出幕式沉积 (Episodic Sedimentation) 的概念时指出, 在某一环境中可以有一种平均状况或均衡状态, 同时存在离开平均状况的偏离。以近岸风浪带沉积为例, 正偏离可以产生风暴沉积, 负偏离则产生无沉积或硬底。

表 3 总结提高阶段的代表作及其贡献 (1970—1980)

时间	作 者	书名或文章名	主要观点或作用及意义	备注
1970	S. J. Pieson	《测井资料地质分析》	最早把测井用于油区沉积学研究	
1970	R. C. Selley	《古代沉积环境》	明确了环境与相的关系, 并系统地介绍了各种沉积环境的地质特征	1976 年第二版 1985 年第三版
1970	J. R. Allen	《沉积作用的物理过程》	提出了“沉积速率”与“沉降速率”相互关系控制沉积过程与沉积物的分布	
1971	R. G. C. Bathurst	《碳酸盐沉积物及其成岩作用》	将成岩作用纳入碳酸盐岩的主要研究内容, 使其研究基本趋于完备	
1972	H. Blatt 等	《沉积岩成因》	综述了形成沉积岩的各种机制, 引用了流体力学方面的成果	1980 年第二版
1972	F. J. Pettijohn 等	•《砂和砂岩》	提出“对于回溯地层历史, 砂岩能起到很重要作用”的观点	1987 年第二版
1973	H. E. Reineck 等	《陆源碎屑沉积环境》	从沉积构造描述出发详细阐述了各种陆源碎屑沉积环境的地质特征, 为沉积相的识别奠定了理论基础	1980 年第二版
1974	K. J. Hsu 等	《陆上与海底的远洋沉积》	对深海沉积物开始有了新的认识	
1976	R. G. Walker	《相模式》	分述了各种沉积环境所形成的相模式, 使沉积学的研究具有可类比的范例	1986 年第二版 1992 年第三版
1977	P. R. Vail	《地震地层学》	率先将地震资料与沉积相分析相结合	
1976	R. C. Selley	《沉积学导论》	系统阐述了沉积物搬运的水动力条件、方式以及各种环境的沉积机理	1982 年第二版
1978	H. G. Reading	《沉积环境和相》	这两本巨著全面总结了沉积学的理论, 反映了当时沉积学研究的最高水平, 可谓沉积学的经典之作	1986 年第二版 1996 年第三版
1978	G. M. Friedman 等	《沉积学原理》		
1973	孙枢	《川西磷酸盐岩》	率先应用沉积学理论来分析沉积矿产的分布, 出版了一些符合我国陆相沉积特点的报告与专著, 为我国的沉积学发展奏响了新的篇章	
1978	李继亮等	《我国几个地区浊积岩系的特征》		
1978	何起祥	《沉积岩和沉积矿床》		
1980	刘宝珺	《沉积岩石学》		

表 4 理论升华阶段的主要代表作及其贡献 (1981—1990)

时间	作 者	书名或文章名	主要观点或作用及意义
1983	W. E. Galloway	《陆源碎屑沉积体系》	使沉积体系分析的理论和方法逐渐走向系统化阶段,并向应用发展
1983	R. A. Davis	《沉积体系》	
1984	A. D. Miall	《沉积盆地分析原理》	盆地分析是地层学、构造地质学和沉积学等研究内容的综合
1985	A. D. Miall	《构形要素分析法:应用于河流沉积相分析的新方法》	提出了构形要素与界面分级的新概念,并将河流划分为 12 类,从不同层次定量研究了河流储层的非均质性,使沉积学的研究更具操作性
1988	A. D. Miall	《河流砂岩储层的非均质性》	
1988	W. Nemec 等	《扇三角洲》	提出了三角洲的结构—成因分类法
1988	P. R. Vail	《层序地层学工作手册》	标志着层序地层学诞生,强调了等时地层格架,影响层序的四大作用(构造运动、海平面升降、沉积物供给及气候变化)
1988	J. B. Sagree	《层序地层学基础》	
1988	J. C. Wagoner	《SEPM 层序地层学特刊》	
1981	中国科学院地质所	《沉积岩石学》	* 我国的沉积学在高起点的基础上,应用国外的先进理论对我国的地质特征进行较为系统的总结与上升,形成了具有中国特色的沉积学理论
1981	中国岩相古地理委员会	《岩相古地理》创刊	
1981—1982	孙枢等	《豫陕中一晚元古代沉积盆地》	
1982	王英华等	《华北地台早古生代碳酸盐岩岩石学》	
1983	中国沉积学会	《沉积学报》创刊	
1983	叶连俊	《华北地台沉积建造》	
1985	王鸿祯	《中国古地理图集》	
1986	吴崇筠	《湖泊砂体沉积类型》	
1986	曾允孚、夏文杰	《沉积岩石学》	
1986	孙永传、李蕙生	《碎屑沉积相和沉积环境》	
1986	何起祥等	《中国西沙礁相沉积》	
1987	孙枢等	《中国地台区张裂盆地沉积》	
1987	何镜宇、孟祥化	《沉积岩和沉积相模式及建造》	
1987	余素玉、何镜宇	《沉积岩石学》	
1987	叶连俊	《沉积学发展的现状和趋势》	
1988	叶连俊、孙枢等	《中国的沉积学进展与展望》	
1989	沙庆安	《福建平潭岛大福全新世海滩沉积及其成岩作用》	
1989	朱夏	《中国的沉积盆地》	成为《世界沉积盆地丛书》的第一卷
1989	郑俊茂, 庞明	《碎屑储集岩的成岩作用研究》	系统介绍了碎屑储集岩成岩作用研究的方法

2. 复理石建造

早在 1978 年, G. M. Friedman 在《沉积学原理》一书中把复理石定义为海相地层所特有的产物, 过去曾认为它局限于深海海槽, 陡坡和浊流是其形成的必要且充分条件。20 世纪 80 年代则出现了截然不同的观点, 即其他环境中 (如大陆坡上的盆地、大陆边缘盆地等) 也可有复理石沉积。

3. 盆地分析与沉积体系研究

1981 年我国学者孙枢等从大地构造环境的角度, 对豫陕沉积盆地的碎屑岩沉积环境与岩相古地理进行了系统研究, 总结了其形成与演化历史, 进而对沉积铁矿的分带性进行了探讨。

1984 年, A. D. Miall 指出盆地分析是地层学、构造地质学和沉积学等研究内容的综合, 主要回答盆地的古地理演化问题, 并出版了《沉积盆地分析原理》一书。1983 年, W. E. Galloway 出版了《陆源碎屑沉积体系》, 同年 R. A. Davis 出版了《沉积体系》。1982 年, P. A. Scholle 主编了附有大量彩色图版的《砂岩沉积环境》等。此外, 板块构造理论已成为沉积作用的理论基础之一。研究不同类型盆地沉积作用及演化规律, 是解决构造与沉积作用间关系的重要课题。盆地沉积模式的建立就是对不同类型盆地的沉积体系分析、沉积充填型式以及盆地演化过程的综合研究, 使沉积体系分析的理论和方法业已走向系统化阶段。

4. 成岩作用对孔隙的影响

20 世纪 70 年代末, 由于油气勘探开发工作的深入发展, 以及新技术、新方法的不断引入, 使碎屑岩的成岩作用研究取得了突破性进展, 其中最重要的是在砂岩中发现了大量的由成岩作用形成的次生孔隙。其中有代表性的文章有: H. Blatt (1979) 发表了关于砂岩中的成岩作用的文章, 朱国华 (1982) 发表了《成岩作用与砂岩 (层) 的孔隙演化》, R. C. Surdam (1984) 发表了《次生孔隙的化学演化》一文, L. J. Crossey 等 (1986) 发表了《有机/无机成岩作用在孔隙预测中的应用》一文, 郑俊茂等 (1989) 出版了《碎屑储集岩的成岩作用研究》一书。这一切标志着成岩作用的研究与理论已基本成熟。

5. 层次分析与构形概念的形成

1985 年, A. D. Miall 在第二届国际河流会议上提出了“构形或建筑结构要素”与河流层次划分的“界面分级系列”的概念, 并将河流沉积物划分成 8 种基本构形要素, 提出了 12 种河流沉积模式, 使沉积体系的研究进入了一个崭新的历史时期。一是突出了层次概念; 二是体现了沉积物的三维形体与内部岩相; 三是河流的研究走出了简单的形态分类阶段。这三大特征或理念不仅对储层沉积学的形成与发展, 而且对沉积学的完善均具有划时代的意义, 直到 21 世纪的今天仍具有着明显的指导作用与借鉴价值。尤其是在当前高效开发高含水油田中广泛使用这一概念来研究隔夹层的问题。

6. 大地构造沉积学的进一步发展

随着板块构造对沉积盆地分类的系统化 (W. R. Dickinson, 1979; 叶连俊, 1983; 许靖华, 1985; G. Klein, 1987; 朱夏, 1989), 各国学者对不同沉积盆地的沉积作用进行了较为系统的研究, 以大陆动力学、板块构造及沉积学的基本理论为基础, 探讨各种大地构造背景中沉积盆地的形成、发展与演化, 着重从构造及其演化的角度对沉积的控制来探讨沉积体系在盆地中的展布规律, 进而对沉积矿产的分布进行预测。

7. 三角洲的结构—成因分类

在 1988 年由 W. Nemec 和 R. J. Steel 主编的《扇三角洲》一书中, G. J. Orton 和

J. G. Mcpherson (1988) 将粗碎屑三角洲进一步划分为扇三角洲和辫状(河)三角洲两种类型,并用结构-成因分类方法对三角洲沉积体系进行了科学的划分,使三角洲的研究向前迈进了一大步。

8. 层序地层学的兴起

1977年, Peter. R. Vail 在 AAPG 上发表了地震地层学的论文,并提出了两大观点:一是层序是由一套互相整合的、成因上有关联的地层所组成,其顶、底界为不整合面以及与之对应的整合面;二是层序的成因基本上或完全受全球性海平面升降变化所控制。1988年, C. K. Wilgas 在 SEPM 上主编了《海平面变化综合研究方法——层序地层学》特刊; P. R. Vail 及 J. B. Sagree 主编了《层序地层学工作手册》和《层序地层学基础》,而地层层序是由于构造运动、全球海平面升降、沉积作用及气候变化等地质因素相互作用而产生的。这几部著作的问世则宣告一门新的学科——层序地层学诞生。

正是由于以上特色,这个时期,不少国际著名学者对自己前期所著出的专著和教科书开始进行修订,推出第二或三版(表3)。如: H. G. Reading 主编的《相和沉积环境》(1986年第二版); R. G. Walker 的《相模式》(1986年第二版); H. E. Reineck 等编《陆源碎屑沉积环境》(1980年第二版); R. C. Selley 著《沉积学导论》(1982年第二版)和《古代沉积环境》(1978年第二版, 1985年第三版); G. D. Klein《砂岩沉积模式》(1978年第二版, 1985年第三版); F. J. Pettijohn 的《砂和砂岩》(1987年第二版); H. Blatt 的《沉积岩成因》(1980年第二版)等。再版所增加部分大多是加入了盆地分析、层序地层学原理与沉积体系研究的内容,并且使其更为系统化和理论化。

此时,我国的地学研究整体上则处在“跟随性思维,临摹性研究”的状态,主要是向欧美发达国家学习,这使我国的沉积学研究起点高,并能立刻抓住主要矛盾。因而,出现了许多可喜的成果,主要是应用国外的先进理论对我国的地质特征进行系统的总结与上升。如吴崇筠等(1986)对我国中-新生代湖盆砂体进行了系统研究,认为湖盆砂体的分布和特征受湖盆的构造活动、地形、物源和气候条件的控制,同时主张将砂体类型的判别与湖盆沉积相带的划分联系起来,将湖盆砂体分为5类:浊积砂体、三角洲砂体、扇三角洲砂体、水下冲积扇砂体和滩坝砂体,并分别对其分布、形成及特点进行了系统总结。这一时期出版了许多代表性的专著和教材(表4):刘宝珺主编的《沉积岩石学》(1980);王鸿祯主编的《中国古地理图集》(1985);刘宝珺、曾允孚主编的《岩相古地理基础和工作方法》(1986);曾允孚、夏文杰主编的《沉积岩石学》(1986);孙永传、李惠生主编的《碎屑岩沉积相和沉积环境》(1986);余素玉、何镜宇主编的《沉积岩石学》(1987)等。

(四) 学科渗透阶段(20世纪90年代)

新技术、新方法的引进,拓展了沉积学研究的深度与广度。地震技术、测井综合解释技术的飞速发展,为沉积学研究开辟了新途径和更广阔的领域。以往的研究中多侧重于一维或二维剖面的分析,新方法的应用则必将引出三维空间的新概念,而三维地震资料的应用,尤其是20世纪80年代末与90年代初图形工作站的快速发展,使沉积体系的研究走向了真三维的空间。

新技术与新方法还体现在新仪器设备与工具方面,如同位素测定、阴极发光技术、X光衍射、电镜扫描、电子探针、古磁学、顺磁共振、全自动图像仪以及遥感技术等,对今后的深入发展必将起到重要的作用。

中国的陆相储层沉积学研究始于20世纪70年代初期,80年代后期,裴泽楠主持的原