

文章编号: 1000-0550(2009) 05-0880-16

碎屑岩系油气储层沉积学的发展历程与热点问题思考^①

于兴河 李胜利

(中国地质大学(北京)能源学院 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室 北京 100083)

摘 要 随着世界各大产油国(区)油气勘探与开发成熟度的日益增高,储层地质问题业已上升为制约石油工业油气勘探开发的主要瓶颈问题之一。为了提高油气田勘探成功率与开发采收率,进一步实现“增储上产”之目的,全面开展储层多参数的空间展布的准确预测和表征方法技术研究已成为当前油气地质工作必不可少的内容,尤为重要的是它们均离不开储层沉积学这一根本基础。储层沉积学兴起于 20 世纪 60 年代,至今已有 40 多年的发展历程;本文在总结阐述国内外研究进展的基础上,分阶段地从这一学科的形成背景、石油工业的需求、多学科相互渗透、专业化的形成与发展趋势等方面进行了阐述。同时,也对当前碎屑岩系储层沉积学所涉及的热点领域,如现代沉积与野外露头研究方法、地球物理方法的应用、多参数沉积相图的编制方法、层序地层学的应用、深水沉积储层的成因、地震沉积学的形成与应用、陆相盆地沉积充填模式以及储层成岩作用等方面进行了概述与讨论,并就我国如何深化这一学科研究提出了一些建议与应注意的问题。

关键词 碎屑岩系油气储层沉积学 地球物理方法、多参数沉积相编图 深水沉积储层 地震沉积学

第一作者简介 于兴河 男 1958 年出生 教授 油气储层沉积学与建模 E-mail: billyu@cugb.edu.cn

中图分类号 P588.21 **文献标识码** A

0 前言

储层沉积学是沉积学和油气储层地质学相结合形成的一个新兴重要分支学科,属于应用沉积学的范畴,其主要任务是应用沉积学理论和相分析方法与手段^[1],对油气储层外观形体的成因(古地理、沉积相、成岩作用、储层发育、空间展布及演化等)和储层内部属性(岩性、孔隙度、渗透率、饱和度和电性以及不同层次的非均质性)做出描述、表征、解释和预测,以提高油气田勘探与开发效果为目的的综合性学科^[2~5]。

20 世纪中期第二次世界大战结束后,油气开始作为全球工业发展最重要的能源而倍受各国的普遍重视。而随着石油勘探风险的增大,同时提高油气采收率的难度也越来越大,这就要求加强对油气储层的综合研究^[4]。所谓储层,广义上讲是指凡是能够储存并渗滤油气的岩层,它具有两个基本要素:孔隙度和渗透率,前者控制“储能”;后者决定“产能”。然而,占世界油气储量 90% 以上的油气储藏在沉积岩中,我国更是如此^[3],并以碎屑岩储层占 90% 以上为特色。因此,要寻找更多的油气资源或进一步提高油气采收率就必须从储层沉积成因来开展储层地质学

的研究,这便为储层沉积学的形成提供了条件与契机。

当前储层沉积学已形成较为完备的技术方法体系,随着油气勘探开发向高精度与高要求的方向发展,这一学科也面临着一些重大挑战和亟待解决的问题,本文在对该学科的发展历程和主要进展及热点问题研究进行综述的基础上,分析了当前所面临的挑战与问题,为该学科的发展提出一些建议。

1 发展历程

任何一门学科从诞生到成熟都要经历一个漫长的历史过程,而油气储层沉积学也不例外,它是在服务于石油勘探与开发中发展起来的,主要经历了萌芽、兴起及成熟三大阶段(图 1)。

1.1 萌芽与初步形成阶段(1960—1977)

随着 20 世纪 50—60 年代世界上一系列大油田的发现,石油勘探家与油藏工程师们则希望以较少的钻井资料,对油气储层的特征与分布做出较为准确地评价与预测。但是,无论是在勘探找寻有利圈闭与储层方面,还是在油气田开发研究储层的连通性与非均质性特征方面一直难以达到勘探家们所期望的成功率和油藏工程师们的预期效果。这就使人们日益

^①长江学者和创新团队发展计划(编号:RT0864)资助。

收稿日期:2009-06-22 收修改稿日期:2009-08-10

感到需要从储层形成的沉积成因与分布规律上对储层的特征进行更为细致地分析与研究,这便是储层沉积学的萌芽阶段。



图 1 储层沉积学发展历程图

Fig 1 The chart on development of reservoir sedimentology

我国油气勘探与开发开始重视储层的研究可追溯到 20 世纪 60 年代初期, 当时大庆油田投入开发, 在数百米的层段中出现了数百个薄层砂、泥岩频繁互层, 这一现象启示人们必须搞清每个砂岩体储层的特性才能开发好这样的大油田。为了更好地认识地下油层的特征, 地质学家通过小层对比对大庆多油层的储层进行剖析, 发现油层变化差异很大。如何才能提高注水波及体积? 如何才能较为成功地预测储层

的连通性? 如何才能比较正确地认识油层严重的非均质性? 如何才能正确地进行小层对比? 等等, 一系列问题日益迫切地提到油田开发地质工作的日程上。1964 年袁桂楠先生在国内明确提出了开展油砂体研究的“微观沉积学”, 开始认识到研究含油砂体内部性质变化的重要性^[4-5]。因为这些因素影响着注水方式与注采井网密度的确定, 严重制约着油田的采收率。20 世纪 60 年代后期, 在勘探开发过程中采用沉积学的理论和方法来对储层进行特征描述就应运而生。

20 世纪 70 年代, 随着国外沉积学的新进展, 如在三角洲、浊流沉积、测井曲线划相以及砂体几何形态等研究的新认识与方法对储层的研究启发很大^[6-9]。这一时期, 随着油气勘探与开发的不断深入, 地质学家、地球物理学家以及油藏工程师们均日益意识到加深储层或油气藏构成要素和成因的认识是预测储层分布的基础, 因而应用沉积学的理论和方法来描述、解释和预测储层的宏观到微观的各种特征日益受到重视^[10-12], 储层沉积学 (Reservoir Sedimentology) 也就随之而诞生, 并成为其后油气勘探与开发的核心内容之一。

1.2 广泛兴起与发展阶段 (1977—1989)

20 世纪 70 年代后期, 随着石油工业的迅速发展, 与各种测试手段的不断涌现, 储层沉积学在油气勘探和开发的实践中得到了许多广泛而成功的应用。1976 年秋, 在美国石油工程师协会上, 以“协同” (Synergy) 为题, 专门设两个小组来讨论沉积相、储层连续性及非均质性等储层沉积学问题。1977 年《石油工艺杂志》以专刊发表这些论文时, 大部分学者认为这是一个新的标志性“里程碑”^[4]。

进入 20 世纪 80 年代, 储层沉积学发展迅速, 涌现了一批代表性的事件 (图 1), 1982 年美国 AAPG 组织出版了《砂岩沉积环境》一书, 进一步强调解释微环境 (Micro-environments) 在二次、三次采油中的重要性, 并将微观储层问题列入沉积学教程中^[4]。1987 年 Tillman R W^[13]作为主编出版了第一本以“储层沉积学”为题的论文集。我国学者袁桂楠于 1982 年^[3]在一次学术交流会议上就以《储层沉积相研究现状》为题, 从多方面论述了储层沉积相研究的内容、国外发展状况以及国内的一些进展, 可以说这是我国早期进行储层沉积学系统论述的文章。1985 年袁桂楠在石油勘探与开发上发表了“沉积方式与碎屑岩储层的层内非均质性”一文^[14], 首次将碎屑岩的沉积方式

(作用)划分为八种形式,并提出了沉积方式与非均质性的响应关系。随后 1987 他在石油学会 2000 年展望学术会议上再次以“储层沉积展望”为题对这一学科的发展进行了论述^[15]。另外,这个时期也是成岩作用发展最快的时期,就次生孔隙形成的成因机理也有新的见解和模式^[16~19],同时,我国学者也出版或发表了相应的文章与论著^[20~21],并颁布了“碎屑成岩阶段划分规范”^[3]。这均标志着储层沉积学进入广泛的发展阶段。

1.3 基本成熟与发展阶段 (1990—)

1990 年国际沉积学家协会 (ISA) 正式将储层沉积学 (Reservoir Sedimentology) 作为一个学科名称提出,并在当年召开的第十三届国际沉积学大会将“储层沉积学和建立地质模型” (Reservoir Sedimentology and geological modeling) 列为第一个技术讨论主题 (A1), 该主题讨论会进行了三天半, 这标志着从此出现了一个新的热潮,就是把应用沉积学的发展提到一个更高的层次;而此次会议在应用领域中又把储层沉积学列为第一,直接讨论建立储层地质模型的技术问题。1991 年召开的第十三届世界石油大会也把储层沉积学列为一个专门主题进行讨论,其重点同样是如何建立定量的地质模型? 两个不同学术领域的世界级最高级学术会议都将这一问题列为技术讨论的重点主题,尤其是一向偏重于沉积学本身理论发展的沉积大会,也将储层沉积学提到了一个特殊的地位,足见当时开展油气储层沉积学与其建模技术的重要性。美国著名石油工程师 Richardson 把储层沉积学列为展望 2000 年提高石油采收率的五大技术之一,并指出储层沉积学的核心是运用沉积学理论来建立储层的概念模型或原型模型。1990 年袁烽楠先生发表了“储层沉积学研究工作流程”^[22] 文章,系统地介绍了储层沉积学研究内容、方法流程、我国陆相碎屑岩储层的特征、沉积学特色以及在油田开发中对应的问题等;1992 年他总结了这些成果,并在《沉积学报》上发表“中国陆相碎屑岩储层沉积学进展”一文^[23],可以说他是我国储层沉积学的创始人。这标志着中国的油气储层沉积学也开始走向成熟。

在 2002 年召开的第十六届国际沉积学大会中,国际著名的沉积学家加拿大的 Waker R G 做了一个题为:“应用沉积学——沉积环境、沉积岩相学、层序地层学和储层工程学之间的关系:以加拿大南阿尔伯达白垩系的配置类型和储层表征为例”的特别报告,其核心就是强调应用沉积学原理开展储层表征的研

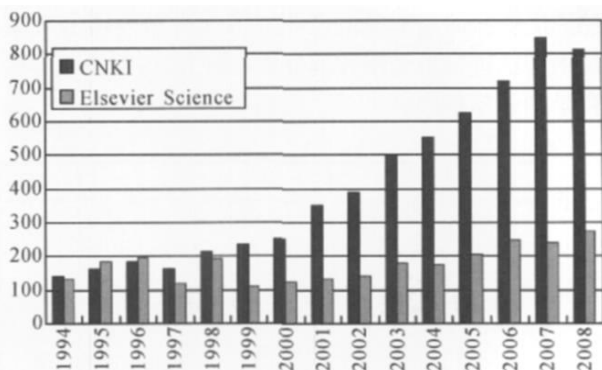


图 2 1994—2008 年期间国际/国内主要期刊公开发表与储层有关的论文数量统计图

Fig 2 Statistical diagram of published papers on reservoir in the whole world from 1994 to 2008

究已成为地学界的一个热点。2006 年第十七届国际沉积学大会和前三届中国沉积学大会,每次都涉及了许多储层沉积学方面的内容,由此说明,近 10 来年储层沉积学已成为一个热点题目与内容^[2,24~30]。从国内外已发表的相关学术论文就可证明这一点 (图 2)。在此期间我国学者也先后出版了碳酸盐岩储层沉积学^[31]与碎屑岩系油气储层沉积学^[3]两本专著或教科书,这给青年学者的学习铺下了坚实的基础。同时,由于层序地层学的广泛兴起,其研究方法 (界面的识别和等时地层格架的建立等) 也逐渐的引入至储层沉积学的研究过程之中^[32~35]。更重要的是,随着油气勘探开发与学科的发展要求储层沉积学向量化方向发展,应用地质统计学和计算机技术及三维地球物理技术相结合进行量化储层地质模型的研究是目前储层沉积学的热点,我国也有一些学者投入这方面的研究并取得了一定得成果^[36~45]。这都标志着我国储层沉积学已经逐渐地成长起来。

2 研究热点及问题思考

2.1 现代沉积和野外露头研究

“将今论古”的类比法是沉积学研究的核心思想,应用现代沉积调查建立起来的沉积模式,类比和预测古代同类环境沉积的储层特性,是目前储层沉积学研究最直接和有效的方法之一。而野外露头的研究则是采用写实的对比法,只有从野外的露头详细观测,才能更正确地认识客观的储集体,并进行定量的描述和预测^[22]。国外地质学领域的学者大都离不开对野外露头的研究^[46,47],翻阅国际最有权权威性的石油杂志——美国的 AAPG 不难发现,自其创刊至今,可

以说几乎每年都发表有关于野外露头研究或现代沉积调查方面的文章,石油地质方面的刊物为何如此热衷于这方面的报导?其原因是不言而喻的,即建立准确的地下储层地质模型总是需要有原型的地质模型作指导,而原型模型的建立就是进行野外露头与现代沉积的研究。露头研究的优点就在于摸得着看得见,便于建立2/3维定量地质知识库,而不利的是在用露头进行储层的非均质性研究时,由于岩石物性受到暴露表生作用的改造,如何去除、恢复则是一个难点。而现代沉积的研究在某种程度上就是大范围内的水槽实验,更有利于分析不同背景条件下储集体的形成机制;但由于沉积体未成岩,故其物性也难以准确得到。可以说这方面的研究是进行储层地质研究的前提与基本条件,“办公室搞地质,害人害己害企业”,其原因是没有见过张三,而画张三的做法是无法达到逼近地质真实的效果的^[29,45]。

查阅一下北美和欧洲的地质协会工作,便不难发现,他们每年都要组织多次现代沉积或野外露头的培训或考察,这也是国外地质学家更侧重于实践的充分表现。另外,通过统计 GSW、AAPG、CNKI 关于野外露头研究发表的论文数量(图3),就可看出国外期刊这方面的文章很多,就 AAPG 一个期刊就比中国期刊全文数据库(CNKI)所检录的相关论文要多数倍,可见,我国在野外露头方面的基础科学研究还是十分欠缺的。近10年来,笔者和国内一些学者在对我国各大油田进行讲学与学术交流中,对此进行了广泛的宣传与解说,使许多油田专家与决策者逐渐认识到现代沉积与露头考察研究的重要性,各油田纷纷开始邀请高校老师与老专家对其进行培训。同时,也强烈地推荐在高等地质和石油院校加强野外地质工作的训练,特别是在接触专业知识以后,通过对野外露头的观察可以让学生强化地质概念,建立地质思维模式,进一步有助于在岩心、测井及地震等方面做出更详细更准确的解释。因此,为了使我国石油勘探和开发有新的突破和认识,对野外露头 and 现代沉积的研究是必不可缺少的;同时,国家、企业和高校都应该投入一定的资金进行这方面的基础性研究。

2.2 地球物理方法的应用

随着油田的勘探、评价及开发的迅速发展,地质与地震结合的更加紧密,其核心基础是地层的精细划分与追层,其标准就是逼近地质的真实。在地震追层过程中,尽量避免出现穿层穿时现象,否则就会出现认识上的偏差!如采用开窗的方法确定层位,拉平

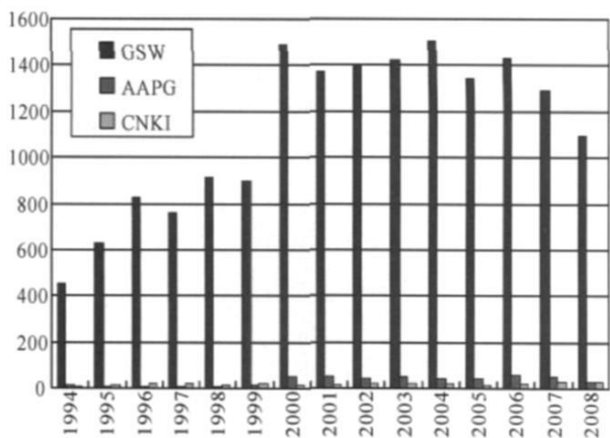


图3 1994—2008年期间国内外主要期刊公开发表与野外露头研究有关的论文数量统计图

Fig 3 Statistical diagram of published papers on outcrop research in the whole world from 1994 to 2008

后会出现穿层现象(图4);采用追踪法确定层位,拉平后不会出现穿层现象(图5)。只有在层位正确追踪的前提下,进行地层切片或沿层切片提取相应的地震属性,分析地震反射特征,并采用聚类分析和多元回归的方法进行多属性的选取和拟合,才能更好地预测和评价沉积体的展布与油气储层的几何形态。

在地震层位追踪的过程中,对构造演化期次的分析与恢复也是十分必要的,如印尼某盆地三角洲沉积体地震剖面,经过后期构造活动,三角洲的地震反射特征都难以识别,只有将构造恢复后才可以识别(图6),这一构造恢复的旋转解释技术已成为当前地震解释的热点。因此,在理论和技术的学习与应用中,应处理好两者之间的关系,即技术决定突破,理论决定出路,前者服务于后者;也应敢于挑战权威,重在科学证据,严谨决定成败,避免无意造假。总之,地球物理技术日益更新,层出不穷,其目的均是从不同的角度来提高对储层或含油气层的预测。

2.3 多参数沉积相图编制方法

在储层沉积学的研究中沉积相图的编制是不可缺少的一项重要工作,而对相图的编制不是盲目的。首先,应遵循工业化制图的基本要求与层次性,即局部与整体的关系,以油田还是盆地为目标?应以“层次为主、类型在先;域(预)字为重、分演并兼”为原则。其次,在相图编制过程中应将模式指导、成因控制以及单因素编图和单指标编图等方法结合起来,最终确定沉积相的平面分布图。具体来讲,在沉积相图的编制过程中,首先应分析其成因,即构造背景、物源

分析和古地貌, 分析构造对沉积的控制, 结合地质 (岩心或露头及相关区域地质认识)、测井和地震属性进行编图。模式指导编图应以符合地质规律为原则, 如曲流河 (含三角洲分流河道) 河道中心 (即水最深的部位或地形最低的部位) 并不是砂体最厚的部位, 而点坝的部位才是河道砂体最厚的部位 (图 7), 或者说地形坡度发生转换的部位才通常是砂体发育的部位, 就三角洲沉积而言归更是如此。另外, 在相控建模和微相量化的过程中确定沉积参数向沉积相图转换的合理门槛值, 其核心在于不同的门槛值标

的地质含义是什么? 门槛值过小, 河道过多, 不符合实际 (图 8a); 门槛值过大, 河道太少, 同样不符合实际 (图 8b); 不合适的门槛值导致无明确的地质含义, 人为因素过大, 不能使用。而相对合适的门槛值能充分体现其地质含义, 使沉积体 (河道) 的分布符合实际情况 (图 8c), 因此该图的门槛值如何确定则是沉积相合理与否的关键。其方法主要是从已知井出发, 对研究每一口井相应层位各沉积微相的含砂率进行统计, 研究区内共有近 50 口井三种微相, 其统计结果表明主河道的含砂率平均值为 31.8%, 为此选用

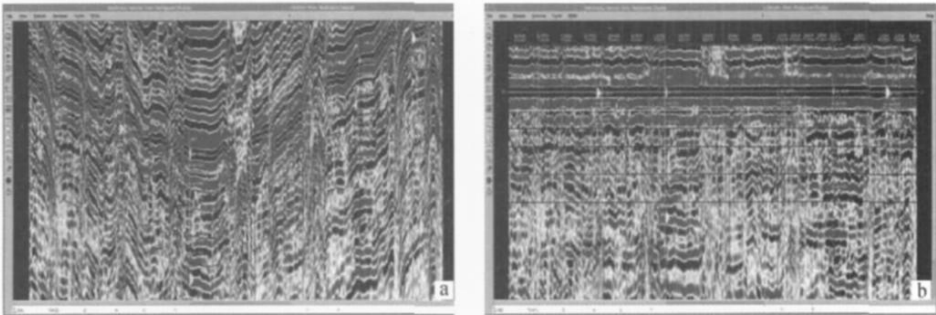


图 4 地震层位确定方法——开窗法;a 为未拉的原始状态,b 为拉平后

Fig. 4 The determining method of seismic horizon; slicing in time window; a. original state section, b. flattened section

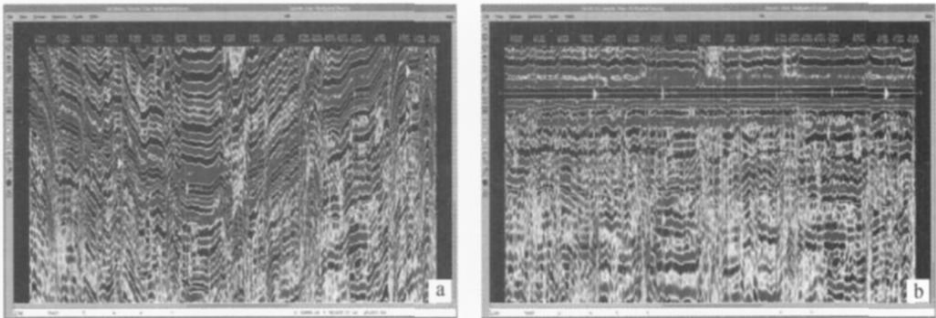


图 5 地震层位确定方法——追踪法;a 为未拉的原始状态,b 为拉平后

Fig. 5 The determining method of seismic horizon; tracing; a. original state section, b. flattened section

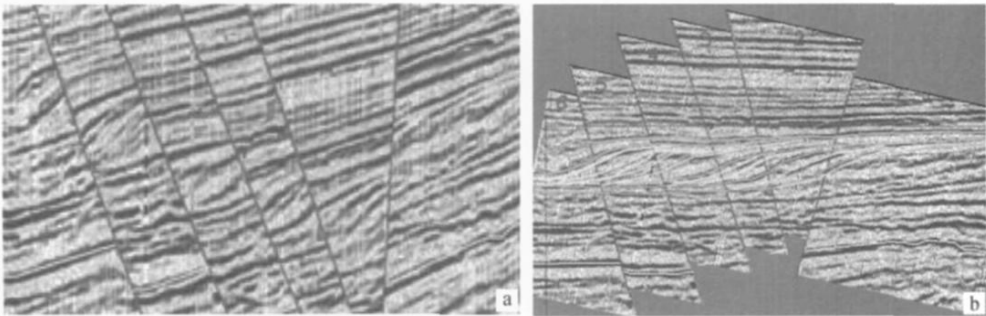


图 6 印尼某盆典型三角洲前积体地震剖面;a 为被断层复杂化后的现今地震剖面特征, b 为经过对断层恢复后的地震剖面特征 (据 Christian Chomat, 2009)

Fig. 6 The typical seismic section of deltaic progradation restored before faulting from a basin in Indonesia;

a. Section highly faulted deltaic progradation episode not easy to interpret; b. After restoration of the seismic section before faulting, deltaic progradation are evident

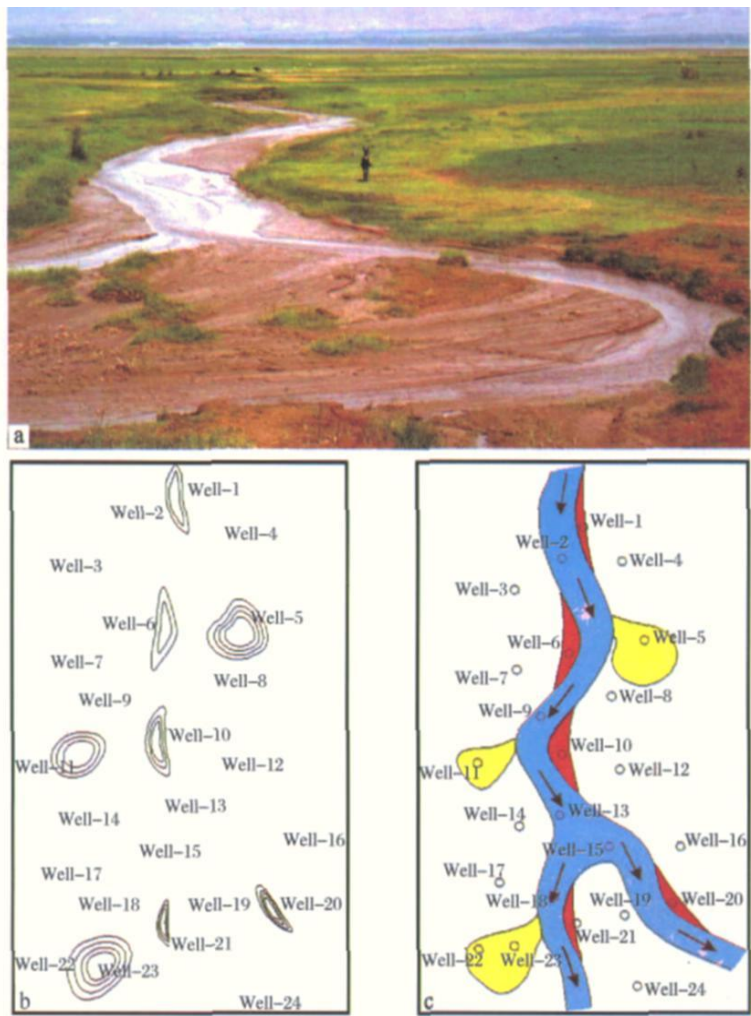


图 7 某油田某开发小层模式指导下的沉积微相图;

a 为内蒙古海现代三角洲平原分流河道照片; b 为大于 2 m 的砂岩等值线图; c 为模式指导下所编制的沉积微相分布图

Fig 7 Map of microfacies in an oilfield guided by depositional model

a Picture of distributary channel of modern deltaic plain in Dahai lake, Inner Mongolia

b Sand contour map more than 2 m; c Microfacies map guided by depositional model

32% 做为相边界约束的含砂率门槛值。

在实际工作中,为了进行有效的隐蔽油气藏勘探研究,从盆地规模来进行系统的沉积相分析日益突出,尤其是在层序地层格架的约束下开展井、震结合条件下的沉积相编图工作则成为当前研究的一个特点和方向,原因有二,一是早期大多只是针对油气田(藏)进行沉积相的编图,相互之间无法连接,矛盾重重,缺乏整体性;二是勘探者们更需要具有预测储集体分布作用的沉积(微)相图,而不是“以井画圈”或“以砂画相,吾跟勘探走”所得出的相图,其核心问题是如何将地震资料与井点处的数据相结合(即地质与地球物理相结合),来进行井间储集体或相的预测问题,真正做到“弃砂画河(相),吾跟勘探走;扬河

(相)找砂,指导勘探行”。这就要求研究人员对地质和地球物理研究方法均能全面掌握。同时,要求高校在培养大学生方面不应将学科限制的太窄,而应从发展的角度对教学计划进行调整与改革,以适应科学发展的需要^[50]。

2 4 层序地层学在储层沉积学中的应用

层序地层学理论源于石油地质和油气勘探,反过来它又成为当今油气勘探和预测的一个重要理论和方法^[48]。层序地层学在其发展过程中形成了不同的学派,但是近十多年来,由于学派与标准的不统一,或者说标准的针对性不明确,而造成了在应用中出现一些混乱,同一个地区或同一个剖面,甚至同一口井的相同层位,因人而异出现了多种层序的划分方法与方

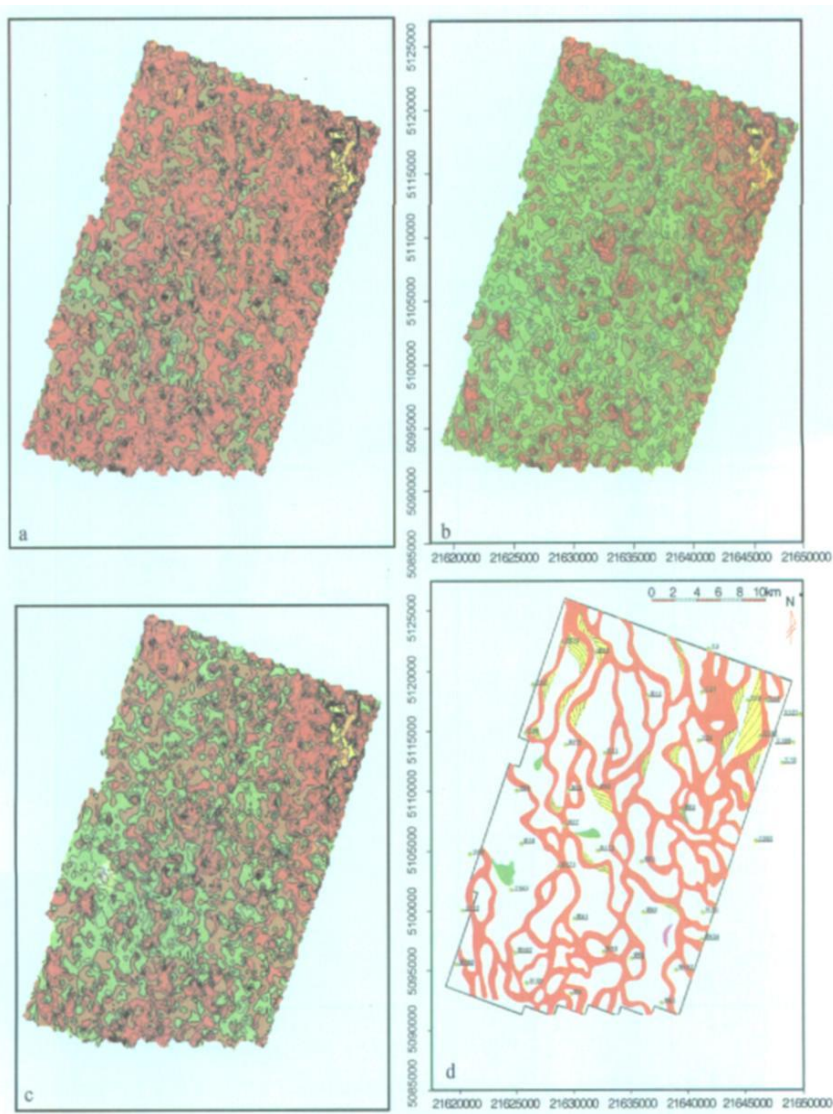


图 8 同一数据不同色标门槛下图件所展现的形式差异

Fig 8 Difference among maps under threshold with the same data and different color bar
a—c Map of sand net/gross with different thresholds d Map of depositional facies

案,在实际的应用中甚至出现了许多负面的作用,这是不可争辩的事实,这也是一个新兴学科发展到完善中不可逾越的过程。正因如此,国外有许多知名学者正应用各种方法的共同点试图提出一个公认的标准化解决方案,形成一套比较完整的研究体系, Catuneanu O^[35]提出当前层序地层学的研究存在着两种思路:即与模式无关(独立于模式)和依赖于模式(基于模式)的思维或方法,笔者认为“前者属于自主性思维,后者属于跟随性思维”。独立于模式的思维不受已有模式的束缚,较为灵活,因而,它通常是形成研究方法的核心平台,包括四个方面:①定义基本概念(如地层叠加样式、地层终止形式、可容纳空间、基准

面变化及滨岸轨迹);②确定成因单元(根据地层的叠加样式,对不同沉积的成因类型定义,如:强迫性海退、低位与高位的正常海退、海进等);③给定层序地层界面(对不同沉积的成因类型之间层序地层界面的定义);④建立工作流程。

然而,基于模式的方法在地层代码和指导界面确定过程中易于形成标准化的操作原则,它强调了层序地层界面重要性,解释人员可以依据沉积的不同成因类型选择任何一种模式, Catuneanu 将其归纳为三个方面:①体系域的命名法;②层序地层界面的命名法;③层序边界的选择。众多学者在这三个方面的不同都没有对层序地层学的方法造成太大的差异。这

就再次说明名词学的创造并不是创新,而只有方法的革新才是真正意义上的创新。在某种程度上讲,有关体系域和层序地层界面的术语都是来自于一定的模式,其核心问题是经典的层序地层学是基于被动大陆边缘盆地而提出的,确切而言,海相是只划(画)“坡”,而陆相需划(画)“盆”。即对于我国陆相断陷盆地而言,大多数情况下并不具备经典大陆边缘结构的“坡”,尤其是由盆缘深大断裂所构成的陆相盆地的陡坡,多数情况下也不存在明显的坡折,这种情况下也就很难进行各种体系域的划分。另外,经典层序地层学只是对大陆边缘的不同沉积体进行了地域命名,如斜坡扇、低位前积楔和盆底扇等,它们并非沉积学名词,在沉积学的研究中应注重其成因的分析。

紧随其后,又有学者提出了高精度和高分辨层序地层学的概念和理论,并且很快得到了广泛的讨论、推广及应用^[49~53],这不仅提高了层序地层的划分精度,而且也发展和完善了层序地层学的理论体系。这一技术手段在我国陆相盆地中已取得了较好的成果,对沉积学、油气等相关的地学领域的发展起到推动作用。当前,层序地层学的流派比较多,在不同的盆地以及同一盆地的不同位置,界面如何确定?在区域上能否用一套对比方案?没有一个理论或一种技术是放之四海而皆准,任何理论与技术都不可乱用或套用,核心在于适用条件与范围。笔者认为层序地层方法的原则有三:①是否有可操作性;②能反映其形成的成因机制;③具有同类盆地或地区的代表性。

2.5 深水沉积储层的成因与预测

20世纪90年代以来,随着墨西哥海岸、大西洋南部巴西和西非海岸深水油气田的发现,深水领域的油气勘探逐渐成为国际石油增采上储的主体和研究热点领域。据 Stow 和 Mayall 统计,全球在进入 21 世纪以来已发现深海含油气盆地多达 1300 个,在 1970—1998 年期间发现的 29 个大型深海盆地中获得 330 亿桶石油,2000 年到 2004 年期间,仅墨西哥湾深海石油净增 40 亿桶^[48]。深水油气勘探有两层含义:即现今处于深水区域或储层为深水沉积,这里主要是指后者。尽管深水沉积研究经历了 50 多年,也持续争论了 50 多年,就其深水沉积物的成因机制和深水体系及其深水扇模式均有了一定的进展^[54~61]。从国内外公开发表的文章可以看出(图 9),深水研究已成为储层沉积学的热点和焦点。其热点是对浊流沉积成因的讨论和加强对深水碎屑流的重视。Shamugan 等对鲍玛序列作为浊积岩序

及相关的成因机制和相模式普遍持否定态度^[57~60]。Shamugan^[57]认为:“在过去 50 年间,浊积岩模式创造了许多深水浊积岩的神话”。最近关于深水的这些观点试图改变前人 Bouma A H 和 Walk R G 的观点,并且也对浊积扇的概念提出了质疑,并建议以后使用“深水扇(Deep-water Fan)”这一概念,尽量少用“浊积扇(Turbidite Fan)”。因为深水扇通常不是由单一浊流形成的,而是由几种深水沉积作用共同的结果。目前,深水沉积理论的进展主要涉及领域为“鲍玛序列”、浊流、砂质碎屑流和深水层序地层四方面^[48]。

2.5.1 经典浊流与碎屑流的成因和异同

浊流和碎屑流都属于沉积物重力流,尽管对其研究历史已有 50 多年,但是其成因和机制到目前仍没有完全弄清楚^[64]。应从深水沉积作用角度去理解深水沉积岩的形成是非常重要的,往往在有效的密度差和重力相结合,在一定的坡度下引起的沉积作用过程主要有:岩崩、滑动、滑塌、碎屑流和浊流,并形成不同的沉积岩(Kruit 等, 1975)。因此,有学者认为应从流变学(Rheology)和沉积物支撑机制结合起来对其分类是比较科学的^[65~67]。浊流和碎屑流就其本质成因和流动学机制是不同的(表 1)。浊流是具有牛顿流变学和紊流状态,并且为向上的湍流支撑机制^[56 61 66 68~70],通常只发生悬浮搬运,沉积物往往呈正递变层理,只有浊流作用形成的岩石叫浊积岩(Turbidite)。而碎屑流是受重力分力(剪切力)和屈服应力的作用下的块体搬运,具有塑性流变和层流特征,以凝结的方式沉积,其流变学特征应是碎屑流鉴定的标准。并且碎屑流是由基质和杂基(混合了流体、泥以及固体颗粒)支撑,通常具有有限的粘附强度,这个粘附力是粗碎屑物质的主要支撑力,称为粘附性碎屑流;若粘附性很小,即基质等的混合物中含有很少的粘土物质时(小于块体重量的 27% 时),称为非粘附性碎屑流,Shamugan^[56]认为这种没有粘附性的碎屑流为砂质碎屑流,可以形成很好的储层,并认为鲍玛序列的 A 段应为砂质碎屑流沉积。他拓展了 Hampton 首次提出砂质碎屑流的内涵^[71],并提出其应具备 6 个特性:①塑性流变特征;②多种支撑机制(粘结强度、摩擦强度和浮力);③块体搬运方式;④砂和砾的含量最少为 25%~30%;⑤沉积物(砾、砂和泥)占体积的浓度为 25%~95%;⑥可变的粘土含量(重量至少为 0.5%)^[56]。

因此,碎屑流沉积物具有密度高、粘度大、剪切性

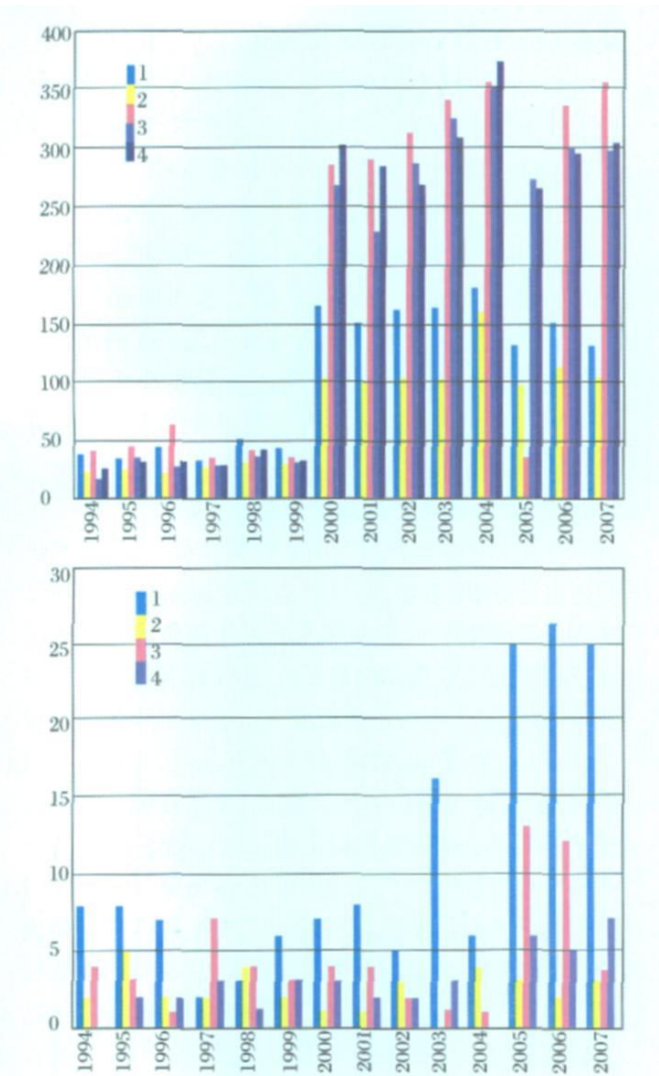


图 9 1994—2007 年期间国际、国内主要期刊公开发表深海沉积作用有关的论文数量统计图(据李祥辉修改)

A. 示 Elsevier Science 和美国 GSW 出版的杂志期刊论文数量分布情况。查询关键词是: 1. Turbidite; 2. Turbidity; 3. Contour + internal tide / waves; 4. Gravity flow; 5. Submarine fan + Deep sea fan. B. 国内全文数据库收录的杂志期刊论文数量分布情况。查询关键词是: 1. 浊积岩 + 浊流; 2. 等深流 + 内波 + 内潮汐; 3. 重力流; 4. 海底扇 + 深海扇

Fig. 9 Statistical diagram of paper publications on deep-sea sedimentation and rocks in both China and abroad from 1994 to 2007 (from Li Xianghui)

A. Paper distribution from Elsevier Science and American GSW database with key words searched 1. Turbidite; 2. Turbidity; 3. Contour + internal tide / waves; 4. Gravity flow; 5. Submarine fan + Deep sea fan. B. Paper distribution from Chinese CSCD database with keywords searched 1. Turbidite + turbidity; 2. Contour + internal tide + internal waves; 4. Gravity flow; 5. Submarine fan + Deep sea fan

强及混合度高的特点。在碎屑流沉积中, 没有特定的颗粒筛选或分选出现^[66-72]。然而, 在许多情况下大漂砾集中在前缘, 碎屑流沉积包含宽广的(颗)粒级分布, 从粘土到大的漂砾(可达几米宽), 通常递变性差, 可见反粒序(递变)层理, 无粒序和层内构造^[65-73-76]

表 1 浊流和碎屑流的区别

特征	浊流	碎屑流
流体性质	紊流	层流
流变学性质	粘性(牛顿流体)	塑性(非牛顿流体)
密度	低密度	高密度
搬运方式	悬浮搬运	块体搬运
沉积垂向序列	正递变	无粒序, 可见反、正递变
结构	层状	块状
平面形态	朵状/朵叶状	扇形
剖面形态	层状	蠕虫状
形成环境	地形平缓	地形相对较陡

2.5.2 深水弯曲水道与正常河流的异同

深水弯曲水道是构成“源—输—汇”沉积模式的重要要素, 位于峡谷(canyon)的下部, 主要的沉积微相为水道—天然堤复合体(channel+levee complex)。正常河流沉积微相为河道滞留沉积和边滩沉积, 其边滩沉积主要是由于河流凹岸侵蚀, 凸岸沉积, 导致河道迁移而形成的曲流河沉积, 这样就形成了顶平底凹的河道砂体。

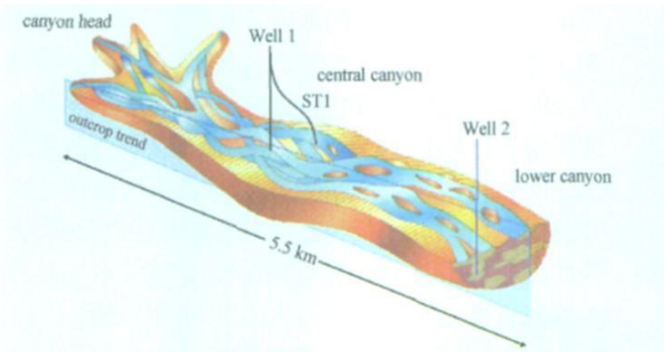


图 10 美国布莱克斯海滩始新世峡谷模型(Dartnell 等, 2007)^[77]

Fig. 10 Blacks beach Eocene canyon reconstruction (Dartnell et al. 2007)



图 11 多射线深海勘测(Dartnell 等, 2007)^[77]

Fig. 11 Multibeam bathymetry(Dartnell et al. 2007)

深水弯曲水道从外部形态上类似于正常河流,这也造成了在研究上很多学者将深水弯曲水道按正常河流模式进行解释。根据卫星及多射线深海勘测及高分辨地震数据,深水弯曲水道平面形态也为弯曲形状(图 10~11)。同样是由单一水道的侧向迁移和局部决口形成水道复合体。

砂泥比控制深水弯曲水道的形态。通常,富泥的浊积水道呈现深、窄的形态,其水道稳定,弯曲度大,其水道砂体不是很发育,孤立于水道泥岩中,非均质性强,在远源易形成薄层、席状的砂泥互层;在富砂的水道呈现浅、宽的形态,天然堤不很发育并且比较低,稳定性差,水道迁移频繁,水道砂体发育,非均质性较弱,在远源汇聚区易形成朵叶状砂体^[78]。

Peakall等 2000 年提出深水弯曲水道和正常河流的演化有着很大的不同^[86]。正常河流中的一些特征如向下游迁移、点坝和截弯取直等在深水弯曲水道中很少或没有;Shanmugam^[57]从成因机理、沉积构造等方面也提出深水弯曲水道和正常河流沉积的不同之处^[54];Kolla V 年从地震特征上解释了深水弯曲水道和河流的异同^[78]。主要表现在以下几个方面:

(1)成因机制:深水弯曲水道属于沉积物重力流成因,悬浮搬运为主,悬浮沉积物占很大比重。正常河流属于流体重力流成因的牵引流,负床载搬运,悬浮沉积物很少(仅占体积的 1%~5%)。正常流动上的离心力与科里奥利力效应、发生频率以及稳定的持续时间与灾变流动的沉积物搬运方式及海平面变化的效应似乎都可造成正常河流与深水河道在内部构型与侧向迁移加积上的重大差异^[78]。

(2)充填类型及沉积构造:深水弯曲水道内部主要充填重力流沉积(滑动滑塌、碎屑岩、浊积岩),局部出现潮汐沉积(底流牵引沉积),沉积特征是块状构造、递变粒序及潮汐层理(潮汐波纹、S 形交错、双泥层理等)为主。正常河流内部主要充填牵引流沉积,以沙丘底形或交错层理为特征。

(3)剖面形态及充填模式:深水弯曲水道的剖面形态主要有六种(图 12):标准河道形、双凸状、V 形、单边形、不规则形和碟片状;充填模式有四种(图 13):加积、填积、侧积和块状。而正常河流的剖面形态只有一种标准河道形或不对称形,其充填模式也有四种,但曲流河则主要为不对称的下凹形和侧向加积的迁移型充填模式(图 14)。深水弯曲河道在内部构型样式与垂向叠加方式上的差异,可为地震分辨率低、内部构型复杂的弯曲河道体系厚层砂体的勘探

(井下深水沉积储层)提供直观的理解。

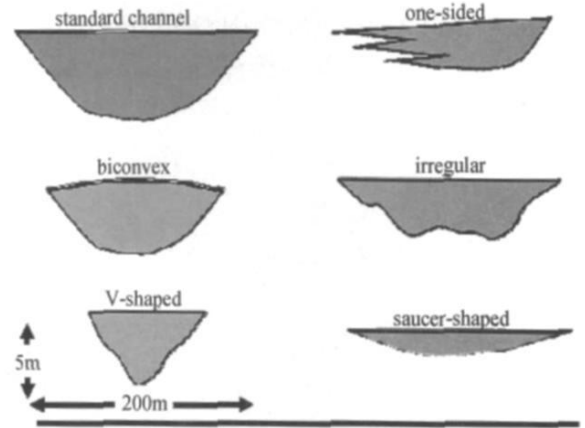


图 12 深水弯曲水道的剖面形态

(Mick Casey 和 Colin Walling, 2009, 据 Cook 等, 1994)

Fig. 12 Section shapes of deep-water sinuous channel

(Mick Casey and Colin Walling, 2009, modified from Cook et al. 1994)

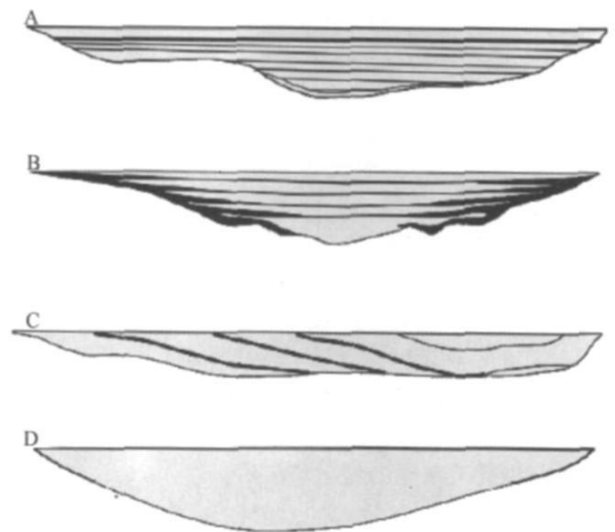


图 13 深水弯曲水道的充填样式

(Mick Casey 和 Colin Walling, 2009, 据 Cook 等, 1994)

Fig. 13 Filling model of deep-water sinuous channel

(Mick Casey and Colin Walling, 2009, modified from Cook, et al. 1994)

(4)地震特征:许多高分辨率三维地震资料的实例表明尽管正常河流与深水弯曲水道体系两者的平面形态极为相似,但在内部构型与演化模式两个方面却存在着一些明显的差异。正常河流体系中伴随着顺流作用,河道的迁移或移动在侧向上具有连续性,其结果是形成点坝沉积,地震上通常表现为单个地震相位厚,顶平底凹。而深水水道体系中,河道的移动

与迁移在侧向上可以是连续的,也可以是不连续的,从侧向迁移到垂向加积同样可以是连续与非连续的过程。地震上则表现为,不管有无伴随顺流加积作用均会出现单个到多个相位,大多数侧向迁移层序为正常的加积,并且在河道的弯曲部位的剖面变化呈现出上凸到下凹的现象。

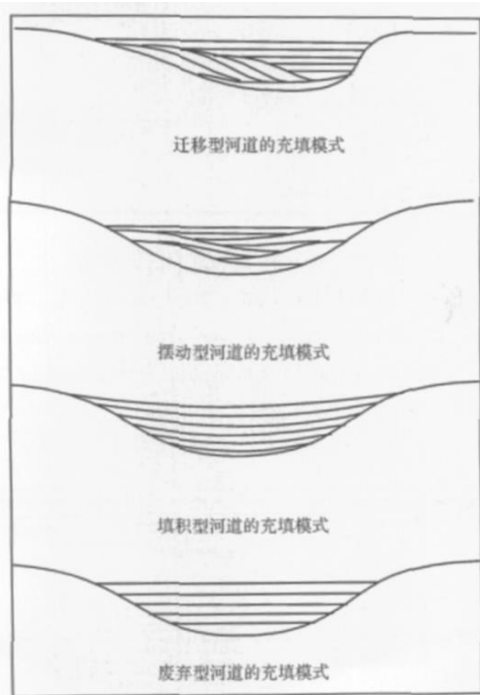


图 14 不同成因河道的充填模式

(据于兴河,等, 2004)^[80]

Fig. 14 The filling model of different genetic channels (Yu Xinghe, et al. 2004)

2.6 地震沉积学的提出与应用

随着地球物理技术的发展以及其在石油地质领域的广泛应用,地震沉积学 (Seismic Sedimentology) 是继地震地层学、层序地层学之后的,以沉积学理论为基础并与现代地震技术相结合出现的一门新兴边缘交叉学科。曾洪流等首次使用了“地震沉积学”一词^[81],并将其定义为:地震沉积学是利用地震资料来研究沉积岩及其形成过程的一门学科,地震岩石学和地震地貌学是地震沉积学的核心内容^[82, 83]。2005年 2月,地震沉积学国际会议在美国休斯顿召开,这标志着地震沉积学受到学者们的重视和认可^[84]。地震沉积学研究强调地震同相轴并不一定(都)是等时的,曾洪流在研究 Permian 盆地时曾发现地震反射同相轴并不总是倾斜的地质时间界面,地震资料的频率控制了地震反射同相轴的倾角和内部反

射结构^[85~87],在此强调低频地震资料中同相轴更倾向于岩性意义而不是时间意义,同时当岩性界面与等时沉积界面相交时会发生同相轴穿时现象,这个认识动摇了地震地层学的前提假设,是地震沉积学最大的理论突破。地震沉积学的核心技术有 90°相位转换技术、地层切片技术、分频解释等手段,这些技术可进行高频层序地层解释、地层岩性识别以及沉积单元几何形态、内部沉积结构的识别,总结地震相平面展布,最后得出沉积相平面展布和沉积发育史。因而,地震沉积学的应用可以定量刻画地震相,可以做到相控储层预测,使沉积相预测更为客观,减少其多解性。在油气勘探与开发中展示出了良好的应用前景,也是今后沉积储层研究的核心方法之一。

2.7 盆地沉积充填研究

我国盆地沉积充填研究经过了几代人的研究,形成了我国陆相湖盆碎屑岩储层沉积的特色。对其物源、充填特征和沉积体系的认识均有很大的提高,并形成了比较系统、成熟的陆相储层沉积学体系,总结了各种沉积体系中哪些微相具有良好的储集砂体,这些储集砂体的空间展布规律和内部属性,这不仅解决了石油勘探开发大量的生产实际问题,也为沉积学理论宝库做了一定的贡献^[5]。

我国陆相含油气盆地多属于构造成因的湖盆,不同的构造样式和沉降机制导致了不同的古地貌特征,另外,古气候和沉积物源的供给也控制着沉积体系的展布。通常,湖盆沉积物以外源碎屑岩供给为主,内源沉积物极少,构造湖盆受主构造带(应力场)控制,其形态一般有长短轴之分,分别形成了纵向和横向不同的沉积体系。横向上又分缓坡和陡坡,导致了丰富的充填样式,沉积体系分布具有明显的“陡坡小而多,缓坡大而少”的特征。多期幕式构造活动和周期性的气候变化,使盆地沉积充填成为一极其复杂的过程,在敞流湖盆和闭流湖盆,以及在盆地裂陷期、扩张期和衰亡期不同的构造期,在盆地的同一位置,所形成的沉积体系不同,沉积物性质也不同,因此,在垂向上出现多套和多种含油气生、储、盖组合。

2.8 成岩作用与成岩相研究

成岩作用是当今沉积学以及沉积盆地研究比较活跃的前沿研究领域之一^[88~91],特别是在油气勘探开发中对成岩作用时空分布和发育规律已经提出了越来越高的要求。曾允孚^[2]曾认为储层沉积学着重研究方面之一是成岩作用及其模拟在储层沉积中的应用,具体包括三方面:①储层定量模拟——储层孔

隙度和渗透率及其变化的模拟;②储层流体动力学研究——流体运移及物质平衡模拟;③化学热力学研究——化学反应及物理平衡模拟。2003年,根据我国陆相湖盆的特点,中国石油天然气总公司颁布了三种碎屑岩的成岩演化模式:淡水—半咸水湖盆碎屑岩储层成岩模式;盐湖碱性水介质碎屑岩储层成岩模式;酸性水介质煤系储层碎屑岩储层成岩模式。在2005年9月25~27日召开的“第三届全国沉积学大会”上,将“成岩作用与油气”被列为大会的一个主要议题^[9],这些都说明了含油气盆地中成岩作用的研究越来越受到了沉积学、石油地质学界和世界工程师的重视。一个重要的原因是由于含油气储层的演化和其非均质性与成岩作用有着密切的关系。特别是在我国东部松辽、渤海湾盆地的深层储层(埋深大于3 500 km)中的异常孔隙带的发育是人们公认的事实,但其孔隙成因、保存机理以及异常孔隙带的预测仍是油气勘探所面临的难题。这主要表现在对储层古流体的恢复以及盆地成岩定量的研究。当前的主要问题主要在于如何从盆地动力学背景研究储层流体分布和如何量化,应用成岩指标进行有利(次生)孔隙区带的定量空间预测。

3 发展方向

随着油气勘探与开发所面临的地质问题日趋复杂和突出,各学科技术在突飞猛进地发展,储层沉积学新技术、新方法日益增多;但该学科发展的基础核心在于现代沉积和野外露头调查的大量积累,建立了各类沉积体系或相的原型模型;其次是模拟实验为主的基础研究,加深认识各种沉积现象的形成机理。关于沉积学未来的发展方向已有多篇文章论述^[25 24~30],本文着重就储层沉积学发展的问题再谈几点想法。

3.1 加强基础研究

碎屑岩系储层沉积学发展迅速,越来越受到石油勘探家、油藏工程师及地质学家的重视,其理论方法体系均有革命性的变化。但是沉积学的基础研究仍不能松懈。首先,野外露头观察与写实性描述仍是沉积学研究的传统方法,也是沉积学研究的最直观和有效的方法,从宏观上认识沉积特征和现象是储层沉积学的基础,也是地质思维培养的关键途径,只有野外地质基础过硬,才能更准确地认识客观的各类沉积体,才能更好的进行定量的描述和预测。其次,室内实验研究,特别是薄片的观察与分析,它是储层的微

观研究和成岩作用的主要技术方法,当前这方面的人才正处于断缺状态。因此,在这提倡同行们应加强对沉积学基础的研究,同时也应向国外学习,加强学生对野外地质现象的观察与描述的培养,强化其地质实验技能。这样才能使他们充分认识到“见过是想到的基础,想到是做到的前提”,从而建立“实际为本,系统为纲,观察为步,类比为法”的思维方法,彻底摆脱“办公室搞地质,空想替代思考”的误区。

3.2 重视成因分析

在研究储层时,不仅应表征储层的“宏观形体和微观属性”,还应遵循“成因为内涵,特征为外延”的思路,特别应重视储层的沉积成因分析,对于不同类型的砂体,其沉积作用不同,在垂向上和横向上的相变规律不同,可形成不同的外观形体和内部属性,然而,控制沉积作用的核心是古地貌和水动力条件,但古地貌多是构造作用的结果,从构造控制古地貌,古地貌控制水动力条件,进而控制沉积砂体展布来研究,这样才能更好地分析沉积体系的分布特征与规律,以达到预测其展布的目的。

现代沉积考察与沉积过程物理模拟是储层沉积学成因分析的重要手段,现代沉积是天然的实验室,是宏观沉积过程的实际表现;而物理模拟(如水槽模拟实验)是微观沉积过程的再现。重视这两方面的研究不仅使研究与学习更加直观,更易理解复杂的沉积过程并建立正确的地质模式,而且更易体现“将今论古”的地质哲学思想,为地下地质体的形成过程与储层分布的研究提供借鉴。

3.3 强化定量评价

1)建立地质知识库,发展数值模拟:当前国外多是开展大量的露头与现代沉积研究,来分析沉积体的多维空间展布,并将其量化为实体地质模型,建立定量地质知识库,为地下油气储层建模提供指导,进而为数值模拟提供基础。随着计算机技术的发展,尤其是年青人数理基础较好,沉积过程的数值模拟发展较快,理论上可以比较完善地做任何尺度的定量模拟,但也受沉积过程复杂多变因素的影响和计算机能力的限制,难以反映地下沉积体的真实情况。而两者结合,尤其是使大量露头二维定量知识库转换到三维,并通过反复正演、拟合已知局部沉积现象,达到反演沉积体全貌的目的。

2)强调相控有利储层物性的预测:储层物性存在着明显的平面分区与垂向分带性,但是如何定量评价储层的物性特征与规律是当前的难点之一,现在这

方面的研究也逐渐增多,主要是在相控的前提下进行,因而相图的准确与否对储层物性的预测就至关重要。另外,目前对孔隙度的垂向分带性认识通常是通过成岩作用的研究得出的一些规律性结论,但是当在一个地区中出现几个不同的次生孔隙带时,就难以评价,如何应用孔隙度以外的指标进行定量研究和评价就成为一大问题。还有,低渗透带的预测也一直是储层沉积学中的一个难题,现在还没有十分有效的方法;深部储层的预测可以说是 21 世纪油气勘探的一个十分重要的方面。这些问题不仅与沉积相带有关,而且与储层的成岩作用更不可分,尽管成岩作用的研究理论和方法早已成熟,加上新的测试手段的不断出现,使人们认识储层成岩演化规律走向新台阶;但如何将沉积相与成岩相有机结合来预测这些特殊储层则是今后攻关的主要方向。

4 结语

总之,储层沉积学是油藏描述的研究核心内容,其发展前景十分广阔,尽管从事这方面研究的人与日俱增,但人才还是十分缺乏,尤其是数理基础好又懂地质、地球物理的人才。笔者在此文的撰写中深深感到该学科发展的迅速、学科相互渗透的作用、当前所面临的挑战以及未来的发展,为此提出以下几点建议与同仁共勉:

科学证据为基础,地质模式为指导;微观向宏观分析,宏观向微观思维;现象描述为外延,成因分析为内涵;露头岩心定类型,井震结合划层序;沉积模式定相带,相带建模方预测。

致谢 我的研究生程岳宏与刘玉梅在本文的撰写过程中帮助查找了大量的文献,在此一并表示感谢!

参考文献 (References)

- 1 裴悒楠. 石油开发地质方法论 [J]. 石油勘探与开发, 1996 23 (2): 43-47
- 2 曾允孚, 覃建雄. 沉积学发展现状与前瞻 [J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(1): 1-7
- 3 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008
- 4 裴悒楠. 油田地质研究的几个基本问题 [C]// 裴悒楠石油开发地质文集. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 5 中国矿物岩石地球化学学会沉积专业委员会, 中国地质学会沉积地质专业委员会. 中国沉积学若干领域的回顾与展望 [J]. 沉积学报, 2003 21(1): 1-7
- 6 Bouma A H, Bouwer A. In turbidites. Developments in sedimentology Amsterdam [J]. Elsevier 1964 3: 264
- 7 Allen JR L. Studies in fluvial sedimentology Six systems from the Lower Old Red Sandstone Angle-Welsh Basin [J]. Sedimentology 1964, 3: 163-198
- 8 Waker R G. The origin and significance of the internal sedimentary structures of turbidites [J]. Proceedings of the Yorkshire Geological Society, 1965, 35: 1-32
- 9 Fisher W L, McGowen JH. Depositional systems in the Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas [J]. AAPG Bulletin, 1969, 53: 30-54
- 10 Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and sandstone [M]. Berlin: Springer-Verlag 1973
- 11 Pettijohn F J. Sedimentary environments and facies [M]. [S. L.]: Blackwell Scientific Publication 1975
- 12 Taylor J C M, et al. Sandstone as reservoir rocks [J]. Developments in Petroleum Geology, 1977: 147-196
- 13 Tillman R W, Weber K J. Reservoir sedimentology [J]. SEPM Special Publication (Tulsa Oklahoma USA), 1987, 40: 19-26
- 14 裴悒楠, 许仕策, 肖敬修. 沉积方式与碎屑岩储层的层内非均质性 [J]. 石油学报, 1985(1): 41-49
- 15 裴悒楠. 我国碎屑岩储层沉积学现状 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1988(2): 101-102
- 16 Schmidt V, McDonald D A, Platt R L. Pore geometry and reservoir aspects of secondary porosity in sandstones [J]. Bulletin of Canada Petroleum Geology, 1977, 25: 271-290
- 17 Schmidt V, McDonald D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis [C]// Scholle P A, Schlager PR, eds. Aspects of Diagenesis. SEPM Special Publication 1979, 26: 175-207
- 18 Meshri I D. On the Reactivity of Carbonic and Organic Acids and Generation of Secondary Porosity [C]// Gautier D L, ed. Roles of Organic Matter in Mineral Diagenesis. SEPM Special Publication, 1986, 38: 123-128
- 19 Scherer M. Parameters influencing porosity in sandstones. A model for sandstone porosity prediction [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71: 5
- 20 郑浚茂, 庞明. 碎屑储集岩的成岩作用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989
- 21 朱国华. 沉积作用与砂岩(层)孔隙的演化 [J]. 沉积学报, 1982, (1): 45-49
- 22 裴悒楠. 储层沉积学研究工作流程 [J]. 石油勘探与开发, 1990 (1): 86-90
- 23 裴悒楠. 中国陆相碎屑岩储层沉积学的进展 [J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 16-24
- 24 刘宝珺. 中国沉积学的回顾和展望 [J]. 矿物岩石, 2001, 21 (3): 1-7
- 25 孙枢. 中国沉积学的今后发展: 若干思考与建议 [J]. 地质前缘, 2005, 12(2): 4-12
- 26 顾家裕, 张兴阳. 油气沉积学发展回顾和应用现状 [J]. 沉积学报, 2003 21(1): 101-102
- 27 于兴河, 郑秀娟. 沉积学的发展历程与未来展望 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 173-182

- 28 张昌民, 张尚锋, 等. 中国河流沉积研究 20年 [J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 183-192
- 29 王随继, 倪晋仁, 等. 河流沉积学研究进展及发展趋势 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(4): 362-369
- 30 刘宝珺, 韩作振, 等. 当代沉积学研究进展、前瞻与思考 [J]. 特种油气藏, 2006, 13(5): 1-5
- 31 马永生, 梅冥相, 陈小兵, 等. 碳酸盐岩储层沉积学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999
- 32 顾家裕, 邓宏文, 朱筱敏, 等. 层序地层学及其在油气勘探开发中的应用论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 33 Cross T A, *et al*. Application of high-resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis [C] // Eschard R, Doligez B, ed. Subsurface Reservoir Characterization from Outcrop Observation. Proceedings of the 7th IEP Exploration and Production Research Conference, Paris Technip, 1993, 11-33
- 34 邓宏文, 王洪亮. 沉积物体积分配原理高分辨率层序地层学的理论基础 [J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 305-313
- 35 Catuneanu O, Abreu V, *et al*. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews 92, 2009, 1-33
- 36 文健, 裴泽楠. 油藏早期评价阶段储层建模技术的发展方向 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(05): 88-93
- 37 于兴河, 王德发, 郑浚茂, 等. 辫状河三角洲砂体的特征及砂体展布模型—内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察 [J]. 石油学报, 1994, 15(1): 26-37
- 38 裴泽楠, 贾爱林. 储层地质模型 10年 [J]. 石油学报, 2000, 21(04): 101-104
- 39 吕晓光, 王德发, 姜洪福. 储层地质模型及随机建模技术 [J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(01): 10-16
- 40 Strebelle S, Journel A G. Reservoir modeling using multiple-point statistics SPE Annual Technical Conference and Exhibition [M]. New Orleans, Sept 30-Oct 3, 2001, SPE# 71324
- 41 陈恭洋. 碎屑岩储层随机建模的基本理论与实践 [J]. 江汉石油学院学报, 2001, 23(04): 1-5
- 42 Strebelle S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics [J]. Mathematical Geology, 2002, 34(1): 1-22
- 43 于兴河, 陈建阳, 张志杰, 等. 油气储层相控随机建模技术的约束方法 [J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 237-244
- 44 吴胜和, 岳大力, 等. 地下古河道储层构型的层次建模研究 [J]. 中国科学: D辑, 2008, 38(增刊): 111-121
- 45 于兴河. 油气储层表征与随机建模的发展历程及展望 [J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 1-15
- 46 Miall A D. Architectural element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth Science Reviews, 1985, (22): 261-308
- 47 Miall A D. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: A reality check [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(7): 989-1002
- 48 李祥辉, 王成善, 金玮, 等. 深海沉积理论发展及其在油气勘探中的意义 [J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 77-86
- 49 Jervey M T. Quantitative geological modeling of siliciclastic rock sequences and their seismic expression [C] // Wilgus C K. Sea Level Changes: An Integrated Approach. Soc Econ Paleontol Mineral Spec Pub, 1988, 42: 47-69
- 50 Posamentier H W, Weiner P. Siliciclastic sequence stratigraphy and petroleum geology: where to from here [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 731-742
- 51 Van Wagoner M, Mitchum J C, Campion R M, *et al*. Siliciclastic sequence stratigraphy in welllogs, cores and outcrops [J]. AAPG, Methods in Exploration, 1990, 755
- 52 Cross T A, Baler M R, Chapin M A, *et al*. Application of high resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis [M] // Eschard R, Doligez B. Subsurface Reservoir Characterization from Outcrop Observations. Paris Editions Technip, 1993, 11-33
- 53 邓宏文, 王红亮, 阎伟鹏, 等. 河流相层序地层构成模式探讨 [J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 373-380
- 54 Shanmugan G, Moiola R J. Submarine fans: characteristics, models, classification, and reservoir potential [J]. Earth-Science Reviews, 1988, 24: 383-428
- 55 Shanmugan G. Deep-water exploration: conceptual models and their uncertainties [J]. Nigerian Association of Petroleum Explorationists Bulletin, 1997, 12(01): 11-28
- 56 Shanmugan G. 50 Years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models: a critical perspective [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 285-342
- 57 Shanmugan G. Ten turbidite myths [J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58: 311-341
- 58 Shanmugan G. High density turbidity currents: Are they sandy debris flows [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66: 2-10
- 59 Shanmugan G. A Preliminary experimental study of turbidite fan deposits discussion [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(5): 838-841
- 60 Shanmugan G. Deep-water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs [M]. New York: Elsevier, 2006: 473
- 61 Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: new models for the 21st century [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 125-135
- 62 Stow D A V, Johansson M. Deep-water massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 145-174
- 63 Walker R G. Turbidites and submarine fans [C] // Walker R G, James N P, ed. Facies Models: Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, 1992: 239-263
- 64 Coussot P, Meunier M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows [J]. Earth-Science Reviews, 1996, 209-227
- 65 Lowe D R. Sediment gravity flows: their classification and some problems of application to natural flows and deposits [C] // Doyle L J & Pikey O H. Geology of Continental Slopes. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1979, 27: 75-82
- 66 Lowe D R. Sediment Gravity Flows II—depositional models with special

- reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52: 279-297
- 67 Prabir Dasgupta. Sediment gravity flow: the conceptual problems[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 265-281
- 68 Middleton G V. Experiments on density and turbidity currents. III. Deposition of sediment[J]. *Canada Journal of Earth Sciences*, 1967, 4, 475-505
- 69 Middleton G V. Experimental studies related to problems of flysch sedimentation[C]// Lajpik J. ed. *Flysch Sedimentology in North America*. Spec. Pap. Geol. Assoc. Can., 1979, (7): 253-272
- 70 Middleton G V. Sediment deposition from turbidity currents[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, (21): 89-114
- 71 Hampton M A. Competence of fine-grained debris flows[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, (45): 834-844
- 72 Costa J E. Physical geomorphology of debris flows[C]// Costa J E, Fleisher P J. Ed. *Developments and Applications of Geomorphology*. Berlin: Springer, 1984: 268-317
- 73 Johnson A M. *Physical Processes in Geology*[M]. San Francisco: Freeman, Cooper, 1970
- 74 Takahashi T. Debris flow[J]. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1981, (13): 57-77
- 75 Pierson T C. Flow behavior of channelized debris flow. Mount St. Helens, Washington[C]// Abrahams A D. ed. *Hillslope Processes*. Allen and Unwin, Boston, 1986, 269-296
- 76 Phillips C J, Davies T R H. Determining rheological parameters of debris flow material[J]. *Geomorphology*, 1991, 4: 101-110
- 77 Peter Dartnell William R, Nomark Neal W, *et al*. Multibeam bathymetry and selected perspective views offshore San Diego, California[M]. U. S. Geological Survey, 2007
- 78 Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels: Characteristics, similarities and dissimilarities and modes of formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, (24): 388-405
- 79 Peakall J, McCaffrey W D, Kneller B. *et al*. A process model for the evolution of fan submarine channels: Implications for sedimentary architecture[C]// Bouma A H, Stone C G, ed. *Fine-Grained Turbidite Systems*. AAPG Memoir, 2000, (72): 73-88
- 80 于兴河, 马兴祥, 穆龙新, 等编. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004
- 81 Hongliu Zeng, Stephen C H, John P R. Stratal slicing: part II. Real 3-D seismic data[J]. *Geophysics*, 1998, 63(2): 514-522
- 82 Hongliu Zeng, Ambrose William A. Seismic sedimentology and regional depositional systems in Miocene Norte Lake Maracaibo, Venezuela[J]. *The Leading Edge*, 2001, 20(11): 1260-1269
- 83 Zeng Hongliu, Hentz T F. High frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: Applied to Miocene Vermilion Block 50, Tenger Shoal area, off shore Louisiana[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(2): 153-174
- 84 董春梅, 张宪国, 林承焰. 地震沉积学的概念、方法和技术[J]. *沉积学报*, 2006, 24(5): 698-704
- 85 Hongliu Zeng, Charles Kerans. Seismic frequency control on carbonate seismic stratigraphy: A case study of the Kingdom Abo sequence, west Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(2): 273-293
- 86 Hongliu Zeng, Milo M Backus. Interpretive advantages of 90 phase wavelets: Part I-Modeling[J]. *Geophysics*, 2005, 70: 7-15
- 87 Hongliu Zeng, Milo M Backus. Interpretive advantages of 90 phase wavelets: Part II-Seismic applications[J]. *Geophysics*, 2005, 70: 17-24
- 88 Wolf K H, Chilingar G V. *Diagenesis IV*[M]. Amsterdam: Elsevier, 1994: 519
- 89 National Research Council. *The Dynamics of Sedimentary Basins*[J]. USGC, Washington D C. National Academy of Sciences, 1997: 43
- 90 Millike K L. Diagenesis[C]// Middleton G V, ed. *Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks*[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2003: 214-219
- 91 李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿[J]. *岩石学报*, 2006, 28(08): 2113-2122

The Development and Hotspot Problems of Clastic Petroleum Reservoir Sedimentology

YU Xing-he LI Sheng-li

(School of Energy Resources, Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract With the petroleum exploration and development of many oil-producing countries or areas in the world becoming increasingly mature, the problem of reservoir geology has become one of the main bottleneck problems of restricting petroleum exploration and development in petroleum industry. In order to improve exploration success ratio and development EOR and to further realize the purpose of “increasing reserves and production”, to carry out comprehensively the precise prediction for the spatial distribution of multi-parameter of a sedimentary reservoir and the research on characterization methods and technologies have become the indispensable content in the current work of pe-

trolem geology. The principally important is that they all can't depart from the kernel foundation of reservoir sedimentology. Started from 1960s, reservoir sedimentology has a development course of over 40 years. Based on the summary of the research progress both in China and abroad, this paper mainly has applied a view of historical materialism to expatiate the formation background of this subject, the demands of petroleum industry, the interpenetration of multidiscipline, the formation and development trend of this subject's specialization and research approaches. Meanwhile, current some research hot points of clastic reservoir sedimentology have been summarized and discussed, such as research methods of modern sedimentation and outcrop, application of geophysical method, the mapping method of sedimentary facies by multi-parameter, application of sequence stratigraphy, the genesis of sedimentary reservoir in deep water, the formation and application of seismic sedimentology, depositional filling models of nonmarine basin, and reservoir diagenesis, etc. And then, some suggestions have been put forward on important problems to deepen the research on this subject.

Key words clastic hydrocarbon reservoir sedimentology, geophysical method, multi-parameter compilation diagram on sedimentary facies, deep water deposition reservoir, seismic sedimentology, petroleum exploration and development