

文章编号: 1000-0550(2013)05-0782-16

三角洲沉积的结构—成因分类与编图方法^①

于兴河 李胜利 李顺利

(中国地质大学(北京)能源学院 北京 100083)

摘要 地质学中各类沉积体系的分类方案历来受到广大学者重视,尤其是三角洲做为沉积学研究油气勘探开发的重点与热点,近年来人们越来越强调对其进行结构—成因分类。本文回顾了三角洲沉积体系研究的发展历程,指出了其存在的主要问题,进而系统论述了三角洲的结构—成因分类的具体含义与分类方案,阐明了这种分类方法的优点。同时,又提出了一套能够反映三角洲结构—成因特点的沉积相编图方法及编图中应注意的一些具体问题。这种编图方法从高分辨层序地层对比与沉积微相导向的小层对比出发,强调在恰当的编图单元约束下,注重岩相组合与沉积序列进行沉积类型识别,采用岩、电、震结合的方法进行多参数套合编图,使沉积相图能够更好地反映砂体的粒度粗细、分布特征及沉积成因,以便使储层的预测性得到充分体现。

关键词 三角洲类型 结构—成因分类 岩相组合 小层对比 多参数套合编图

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 P618.130.2⁺¹ TE121.3⁺² 文献标志码 A

0 引言

三角洲是沉积盆地中最主要的沉积充填产物之一,也是各种沉积作用最为发育或相互影响的区域。它的规模大小、剖面结构构型、平面形态,尤其是内部砂体的分布规律直接影响着沉积盆地中各种矿产资源的状况,油气富集与分布更是如此。三角洲可以说是沉积盆地中最主要的沉积体系与油气储层之一,对于大多数含油气盆地,特别是陆相含油气沉积盆地而言,三角洲的大小决定着油气的富集程度,其分布范围影响着含油气的区域或面积;摆在储层沉积学家面前的一个重要任务就是应用岩、电、震的方法从沉积学的原理来研究储层不同层次的非均质性特征并表征与预测储层(砂体)的空间分布,其成果是得到不同时期或层序格架下的沉积相图,尤其是砂体的平面分布图。众所周知,沉积相是沉积环境的物质表现,所以对油气勘探开发而言,最终需要的是平、剖面上砂体或储层的准确分布图。传统的沉积相研究只表征或画出沉积体系(三角洲)外观轮廓和亚相或优势相的宏观分布范围,已不能满足当前岩性地层圈闭勘探与高含水期油田开发对储层研究的要求。为此,地质学家开始着手对沉积体系,尤其是三角洲的分类与表征方法转变思路,以便使分类体系更好地体现砂体

的分布与表征,这就为三角洲的结构—成因分类方法的提出与推广提供了契机。

自上世纪80年代末以来,全球经济的快速发展,油气资源勘探与开发已难于或无法满足世界上能源消费大国的国民经济与社会发展的需求。这就迫使各国的地质学家对当前油气资源勘探开发实践中所面临的诸多科学问题产生了多层次的思考,当前缓解油气资源压力有两个基本途径^②:一是提高油气勘探成功率,二是提升油气田的采收率。但就油气储层沉积学而言,前者的核心重在理论水平的提高与勘探理念的转变,以便准确地预测勘探区内优质储层的空间展布;后者则侧重在油田或油藏范围应用与革新多种技术方法来识别与表征有效储层的分布。广义上讲,两者均是采用不同的方法技术应用沉积学原理来研究储层不同层次的非均质性特征,并表征与预测储层(砂体)的空间分布。尽管沉积学已有百年历史,但近些年来一个十分突出的现象就是各国地质学家或某些领域的沉积学家均从反映沉积动力学的机制(沉积作用或沉积过程)着手来对各沉积体系进行系统分类^[1~4]。就描述性科学而言,分类是其理论形成的基础,没有分类就难于称的上为理论,地球科学更是如此。这就使地学界许多领域早期出现的“概念性理论科学”走进了“鉴别性成因科学”,这不仅提高

^①国家自然科学基金(基金号:41072084、41272132)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金(优先发展领域,编号:20120022130002)、“十二五”国家科技重大专项(编号:2011ZX05023-001-009)联合资助

^②贾承造.全球能源发展趋势与我国能源战略[R].会议报告 2012
收稿日期:2013-07-31

了确定沉积物或砂体与其分布的可操作性,而且使其认识走向了成因动力学的范畴,并更适应从多层次或尺度来研究沉积储层的成因与非均质,呈现出理论的成熟与深化。

1 问题的提出

1.1 表里不一的现象

碎屑岩系的沉积体系类型繁多,即使相同沉积体系也有不同的种类,尤其是三角洲沉积体系。但当前沉积学界一个较为突出的现象就是沉积体系(相)的名称与砂体的分布关系不清?即同一名称有多个内涵的现象。不同学者对同一概念的理解差别甚大,甚至相悖。众所周知,三角洲的类型与名称很多,如按沉积物供给特征、负载形式及平面砂体的分布特征可分为:扇三角洲、辫状三角洲(辫状河三角洲、辫状平面三角洲)、正常河流三角洲等^[2,5~10]。就当前油气勘探与开发的要求而论,分类应表现出这些三角洲的平原形态特征,尤其是砂体的分布规律,否则就出现了“表里不一”的现象。又如按主控因素分为:河控型、浪控型及潮控型三角洲^[11~13],同样应表现出其主控因素的特征及其对砂体分布的控制。科学的创新与特色不是名词学的造词,核心在于内涵!

1.2 沉积序列的差异

如何从垂向沉积序列上识别三角洲沉积体系并认识其相应的砂体展布特征是储层沉积研究中的难点与重点,不同三角洲的垂向沉积序列有明显的差异,如珠江口盆地主要目的层珠海组与珠江组的三角洲沉积在单井上的特征以反粒序为主;而大庆油田主要目的层扶杨油层的垂向沉积序列则以正粒序为多,反粒序基本不发育^[14]。另外,大量的露头与现代沉积研究表明,同一三角洲不同部位的沉积序列也有较大的差异。三角洲沉积体系中水下分流河道与河口坝的成因?其形成条件与发育背景如何?分流河道间是砂?还是泥?如何判别?这些因素均与三角洲的分类密切相关,也是当前三角洲研究中的焦点与难点所在,只有更好地回答这些问题才能更好地满足油气勘探开发对储层沉积学提出的要求。

1.3 砂体分布的表征

储层表征的核心与作用就是识别不同储集体(各种砂体)自身的成因特征与分布规律并起到解决实际勘探与开发问题的作用。广义上讲,地质成因的研究就是科学地进行成因分类并将其砂体预测最大限度地逼近地下地质的真实。通常是从形成条件、粒

度粗细、沉积作用、几何形态、规模大小及平、剖面的一致性进行综合研究。只有这样才起到其应有的表征作用,即系统指导油气勘探与开发并进行科学预测^[15]。如何将岩、电(井)、震这三个层次的三种资料进行有机的结合来满足生产急需则是当前研究中的核心。为此,三角洲的结构—成因分类及相应的编图方法就显得更为重要。

2 分类的原则与层次

2.1 分类的原则

分类是指根据人们认识对象的不同和共同点,按照一定的属性标准把对象区分为不同的种类,并形成一定从属关系和层次系统的逻辑思维方法。由于地质学具有复杂的内容及庞大的系统,因而无论从事哪个方面的地质科研工作可以说都离不开分类,分类是进行地质科研的首要问题与前提。然而,任何一个分类都应依据一定的原则,除了考虑学科特点外,笔者认为还应遵循以下5点准则:1)体现研究目的;2)反映成因机制;3)表征基本属性(几何特性和物理特性)或现象;4)拥有可操作性;5)具备推广价值。前面3个准则一般很容易被人接受和使用,而后两个准则通常容易被人们所忽视,然而“可操作性”和“推广价值”对学科的发展和前景可能更具有现实意义,倘若一个科学分类不具备这两点,则只能是孤芳自赏^[16]。

2.2 分类的层次

就描述性学科而言,其研究的核心内容之一,就是分类。有了科学的分类,才能使客观对象更加条理化、系统化,才能分门别类地认识各种各样的复杂地质现象,因此分类也是有层次的,也有一个从现象分类到本质分类的过程。现象分类是根据事物的外部形态特征进行的分类,这种分类的缺点是容易把本质上相同的事物分为不同的类别,而把本质上不同的事物却分为同一类别;更高层次的分类则是本质分类,即根据事物的本来面目(即根本属性)分类,从它的形成的本质性特征与内部结构联系来进行分类。近年来,众多学者更为关注碎屑岩沉积体系的结构—成因类分类,尤其是河流、三角洲及深水重力流沉积。一方面这些沉积体系中的砂体多是油气勘探开发的甜点,另一方面它们又是储层沉积学研究的热点。对于所有沉积地层而言,其最终控制因素不外乎构造、气候、沉积物供给和海平面变化。但这些因素并不能直接在沉积物或岩石中直接观察到,多是应用相应的方法与手段进行鉴别与预测。因此,地质学家需要引

入直接影响沉积体系性质且可以方便测量、记录的参数。而对于所有参数而言,粒度的粗细不仅是最为简便而极易测量的数据,而且粒度特征(概率图与CM图)也能较好地反映沉积物的搬运方式,是最能将储层从沉积物(岩石)中区分出来的良好标志。此外,沉积物供源体系的性质与地形坡度是沉积体系形成的地质背景与条件,故也是区分沉积体系的重要参数。目前碎屑岩沉积体系的分类大多是采用先粒度后成因的分类方法,即先考虑粒度再考虑供源体系、坡降。

3 三角洲沉积的结构成因分类

三角洲是河流携带大量沉积物流入相对静止和稳定的汇水盆地或区域(如海洋、湖泊、半封闭海、湖等)所形成的、不连续岸线的、突出的似三角形沉积体^[17]。通常三角洲是由一个固定供水系统将沉积物供应给到岸线(海岸或湖岸),并在局部地区并入水体沉积所形成的具有突出几何形态的三角洲沉积体,它不断向海或湖前积推进。三角洲是在河流作用与湖海洋作用共同影响和相互作用下形成的沉积物堆积体系,这个体系可从陆上一直延续到水下,因此它属于大陆与海洋(或湖泊)之间的过渡沉积体。

3.1 三角洲的认识过程与分类方案

3.1.1 三角洲的概念与认识过程

三角洲概念的出现可追溯至公元前450年,古代航海家与历史学家希罗多德(Herodotus)发现尼罗河口的平面形态类似于古希腊字母“Δ”,将其命名为三角洲。1885年至1890年,Gilbert对美国邦维尔湖(Lake Bonneville)更新世湖相三角洲沉积体进行了研究,并首次识别并提出三角洲的三褶结构(Three Fold Structure,即顶积层、前积层及底积层)^[18]。随后,Barrell在Gilbert的研究基础上进一步划分出了顶积层(Topset)、前积层(Forget)及底积层(Bottomset)^[19],并分别描述了各层的岩性、层理及化石等特点。随着三角洲沉积中大量能源和矿产资源被相继发现,如全球多个大型油气田(科威特布尔干油田、委内瑞拉玻利瓦尔沿岸油田、墨西哥湾、尼日尔三角洲及我国大庆油田等)、赞比亚一扎伊尔铜矿带、南非维特瓦特斯兰德金铀矿等,人们对三角洲这种与河流相关的、陆源沉积物建造的湖、海滨岸突出沉积体^[13, 20~23](Holmes, 1965; Coleman和Wright, 1975; Elliott, 1978, 1986; Miall, 1984)的沉积作用、沉积环境及沉积相的研究给予极大重视,并取得了巨大成就。

我国对三角洲的研究主要从20世纪70年代开始,随着近海陆架油气田的勘探与开发,我国学者相继对陆相湖盆三角洲沉积体系进行了系统研究^[5, 8~10, 24~29]。

Friedman(1978)将三角洲定义为一个发育在稳定水体边缘的、由水流搬运沉积物至河流末端、部分水上与部分水下的朵叶状沉积体,该定义强调了河流作为三角洲发育的基本单元^[30]。Coleman(1983)认为三角洲的广泛定义应该是由河流搬运的、部分水上部分水下的滨岸(海、海湾及湖泊)沉积,会受到波浪、洋流及潮汐等作用改造^[31]。Nemec等(1990)将三角洲定义为以陆相(主要是冲积体系)为供源体系,进入稳定水体(湖、海)形成的沉积体,他指出三角洲主要受供源河流性质所控制,同时也受到盆地中各种作用改造,并且部分三角洲完全发育在水下,可不出现水上的三角洲平原部分,如河口坝型三角洲(G. Postma, 1990)^[32, 33]。由此可见,不同学者对三角洲的认识和定义不尽相同,从而导致分类也各异。

3.1.2 国内外三角洲的分类方案

上世纪80年代之前,国内外学者对三角洲的分类大多是从其控制因素、河口作用及平面形态特征对三角洲进行的分类,当时考虑地形坡降与粒度粗细相对较少。三角洲的形成、发育和形态特征主要与河流作用及其蓄水体能量的强弱有关。Holmes(1965)最早提出粗粒三角洲的概念,认为粗粒三角洲主要是冲积扇直接入湖形成的扇三角洲^[21]。而Colella等(1990)指出粗粒三角洲包括河流与冲积扇形成的粗砂至砾石级别三角洲,通常形成于坡度较陡的地区^[34]。Fisher(1969)根据三角洲与水体作用的强弱、沉积与改造分为建设性三角洲与破坏性三角洲,建设性三角洲多为朵叶或者长轴型,而破坏性三角洲多为鸟嘴状或鸟足状^[35]。

Galloway(1975)根据河流、波浪及潮汐三种作用的强弱提出了三元分类方案,每个端元具有其独特的砂体展布特征^[1](图1)。薛良清(1991)在Galloway分类的基础上,结合供源性质与水体改造程度,将三角洲体系划分为9种类型^[8]。裘亦楠(1982)提出以坡降大小与距物源远近为主要因素,将入湖三角洲分为扇三角洲和鸟足状三角洲^[5]。然而,Fisher与Galloway等学者的分类较强调单一的主导因素与三角洲整体平面特征的关系。后来,国内外学者在研究三角洲时,开始考虑依据不同的影响因素(如蓄水体性质、水动力条件、坡度陡缓及物源远近等)划分不同的类型(表1)。

表 1 三角洲分类方案一览表

Table 1 Scheme of classifications for deltas

主控因素与特征	分类方案	代表学者
蓄水体性质	湖相三角洲、海相三角洲	Bates ,1953 ^[36] ; Fisher ,1969 ^[35] ; Smith ,1991 ^[37]
形态特征	鸟足状三角洲、鸟嘴状三角洲、港湾状三角洲	Fisher ,1969 ^[35] ; 裘亦楠 ,1982 ^[5]
水体深浅	深水三角洲、浅水三角洲	Donaldson ,1974 ^[38] ; Postma ,1990 ^[33]
营力性质	河控三角洲、浪控三角洲、潮控三角洲	Galloway ,1975 ^[1]
水动力与砂体分布	六种三角洲类型	Coleman 和 Wright ,1975 ^[13] ; Orton ,1988 ^[2]
河口作用	摩擦为主三角洲、惯性为主三角洲、悬浮为主三角洲	Coleman ,1976 ^[39] ; Friedman & Sander ,1978 ^[30]
发育部位	陆坡型三角洲、陆架型三角洲、吉尔伯特型三角洲	Ethridge 和 Wescott ,1984 ^[40]
粒度粗细	粗粒三角洲、细粒三角洲	McPherson ,1987 ^[7] ; Colella 和 Prior ,1990 ^[34] Postma ,1990 ^[33] ;
供源体性质	扇三角洲、辫状三角洲、正常三角洲	Galloway 与薛良清 ,1991 ^[8] ; 于兴河 ,1994 2002 ^[10 17] Nemec 和 Steel ,1988 ^[6] ; 吴崇筠 ,1992 ^[9]

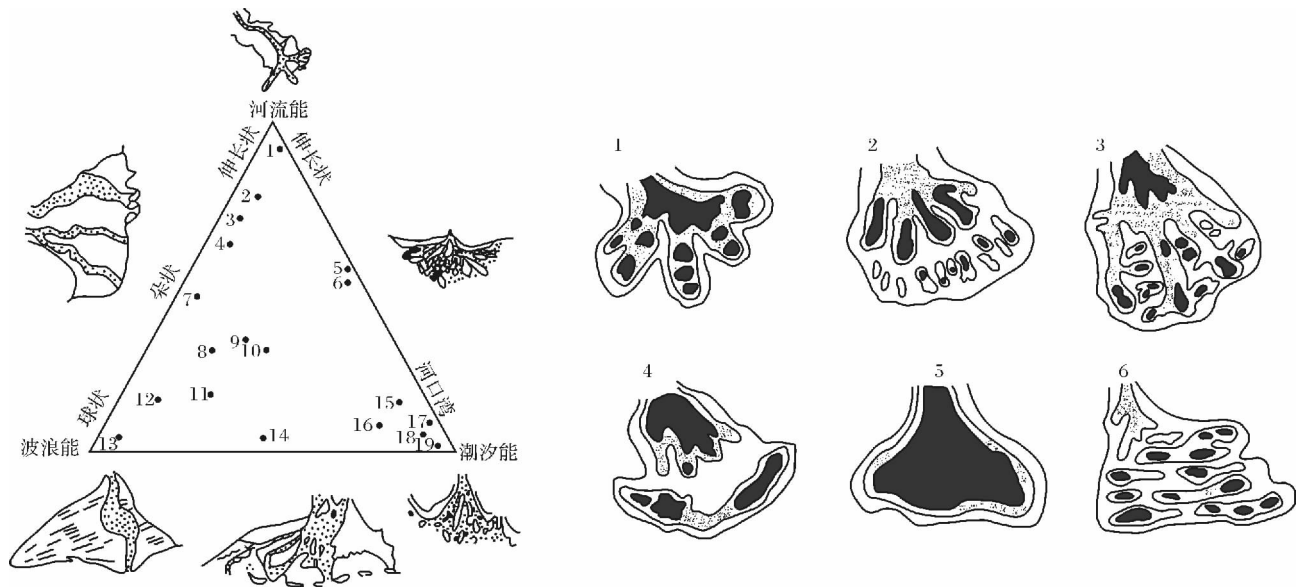


图 1 典型三角洲分类方案(A: Galloway ,1975^[1] ,B: Coleman 和 Wright ,1975^[13])

Fig.1 Typical classification of deltas (A: Galloway ,1975^[1] ,B: Coleman 和 Wright ,1975^[13])

Coleman 和 Wright(1975) 强调,影响三角洲形成、结构及砂体格架的诸多因素中,各种因素以不同强度相互作用,共同控制三角洲的形成与发展,并着重强调砂体的成因与其在三角洲平面上的分布特征,从而提出具有代表性的六大三角洲类型(河口坝型、指状沙坝型、十字沙坝型、大型复合沙坝型、席状沙坝型及平行沙坝型)^[13]。Orton(1988 ,1993) 在研究全球 34 个现代三角洲的基础上,依据三角洲的主控因素(粒度粗细、几何形态、地形坡度、供源性质及流域面积等) 与砂体的平面分布特征提出了一个详细的三角洲分类方案(图 2) 笔者称其为结构—成因分类法^[2 41]。

3.2 三角洲的结构—成因分类

3.2.1 结构—成因分类的由来

早期在上世纪初叶,人们对三角洲沉积,尤其是

现代沉积研究的不断深入,发现很多三角洲并非都是“三角形”,而且除了以单一河流作为供源的三角洲外,还有扇三角洲^[21]、辫状平原三角洲^[2]、陆坡裙三角洲^[42]及火山三角洲^[21]等多种类型。因此,现今三角洲的含义已不仅代表原始的形态结构,也代表一种成因类型。80 年代中后期,Orton(1988) 依据粒度的粗细(砾、砂砾、砂及粉砂泥质) 首先将三角洲划分为四大类^[2],随后再用 Coleman(1975) 与 Galloway(1975) 的三元元(河控、浪控及潮控) 进行划分析(图 2) ^[1 13]。Nemec 与 Steel(1988) 对在扇三角洲研究中,就依据物源供给、地形特征(坡度)、搬运距离及平面形态特征提出了一个扇三角洲的 12 类划分方案^[6]。随后 Nemec(1990) 先将三角洲分为冲积成因(河流、冲积扇为供源) 三角洲与非冲积(火山岩浆或喷发为供源) 成因三角洲两大类,冲积成因三角洲中

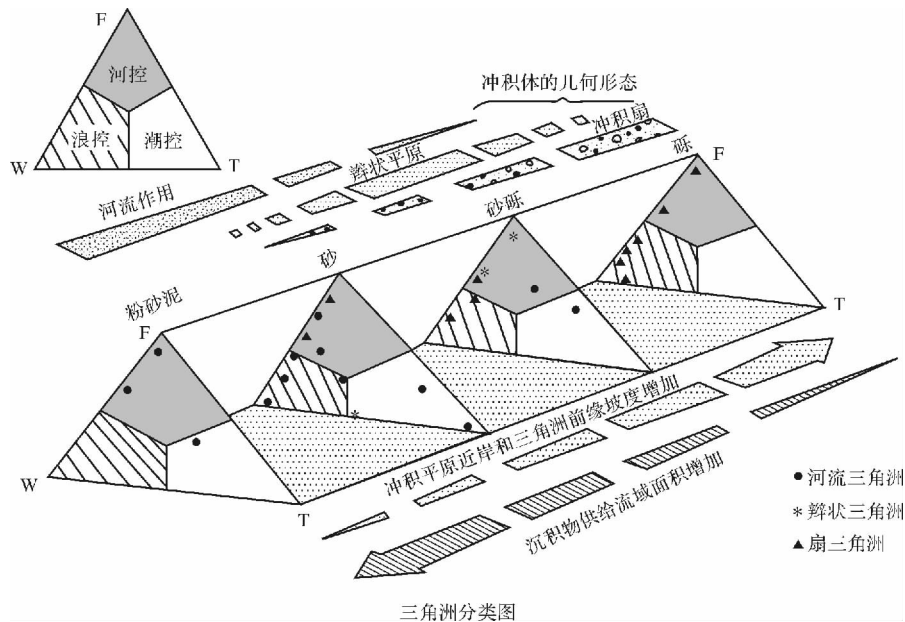


图2 三角洲结构—成因分类方案(Orton, 1988)

Fig. 2 Scheme of texture-genetic classification for deltas (Orton, 1988)

又按粒度粗细(泥、砂、砾的相对含量)与坡度大小对三角洲进行了新的分类,将三角洲分为陡坡型(吉尔伯特型)与缓坡型(又细分为河口坝交错层系发育型与河口坝交错层系不发育型两种)两大类^[32]。

同一年,Postma G. (1990)把河控型或低能盆地中的三角洲划分为浅水型与深水型两大类^[33]。由于陆相湖盆水体通常较浅,因此人们更容易研究浅水型湖泊三角洲,尤其在中国境内中新代的一些大型拗陷型湖盆,如松辽盆地、渤海湾盆地中此类三角洲十分发育,一些中国学者对此类三角洲的特征做了较为详细的研究^[27~29, 43, 46]。Postma (1990)结合惯性、摩擦及浮力因素,并考虑蓄水体深浅、地形坡度的陡缓、注入速度、潮汐能量大小等对河口作用类型又加以详细的分类和描述,使三角洲的分类更加系统化^[33]。其中浅水三角洲以摩擦作用为主,而深水三角洲常以惯性作用为主。但有一个问题就是:何为浅? Fisk (1954)提出了浅水三角洲概念,指发育在没有大坡折、坡度极缓的大斜坡之上^[45]。Postma (1990)认为,形成于水体深度在数十米范围内的为浅水三角洲,而大于数十米的范围则为深水三角洲^[33]。因此,笔者认为这里的浅水三角洲应为发育在浪基面以上的三角洲,其特点是水下分流河道发育,而河口坝不发育;粒度的粗细并不一定与水体的深浅有关,更主要与物源的远近与性质有关。即Nemec (1990)分类中缓坡型中的第二种;深水三角洲实质上是Postma (1990)

分类中的河口坝型三角洲,包括斜坡扇、深水扇等沉积体^[32, 33]。

3.2.2 结构—成因分类的特点

以上这些分类,可以说均是结构—成因分类思路的产物,即先从三角洲沉积物的粗细结构对其进行分类,随后再探讨不同的地质背景与条件下形成的三角洲所具有的特色与砂体分布规律。因而,结构—成因分类具有四大特点:1)用粒度粗细来说明物源远近;2)用主控因素(地质背景,尤其是坡降)来表征沉积成因;3)用平面形态来展示砂体分布;4)用立体三角来分析改造营力。依据这些原则并结合国内外学者在三角洲结构成因分类的研究成果,笔者(2002)提出了一套三角洲结构成因分类方案,从结构上把三角洲分为粗粒与细粒三角洲;同时考虑成因从海相、陆相、改造营力及河口作用等角度对三角洲类型进行了系统划分^[46]。

在陆相湖盆中,湖平面的变化过于频繁,与湖盆流域面积、湖水蒸发/降雨量的比值有关,对沉积体系的影响作用有限。而三角洲体系内的储层构型样式主要取决于沉积物供给速率与地形坡度的变化^[47]。通常,构造湖盆受主构造带的控制,其形态一般有长短轴之分,形成了纵向和横向不同的沉积体系。以上这些因素导致在湖盆不同部位三角洲的结构—成因类型存在差异。盆地的地形坡度控制三角洲的平面展布形态,在湖盆的短轴方向,坡度越陡,沉积物在横

向分布局限,受波浪作用改造较强,多呈扇形或鸟嘴状;坡度越缓,沉积物分布范围广,受波浪作用改造较弱,河流的作用较强,多呈朵叶形;而在湖盆的长轴方向,地形坡度中等,通常受河流与波浪作用的共同控制,三角洲多呈鸟(嘴)足状^[48]。故三角洲在湖盆中

的分布特征为:陡坡小而生多、缓坡大而生少,陡坡呈扇形、缓坡为朵叶、长轴方向为鸟(嘴)足;三角洲内部的前积结构同样受地形坡度的影响,坡度越陡,前积厚度越小,多呈反“S”型;而坡度越缓,前积厚度越大,多呈叠瓦型(图 3)。

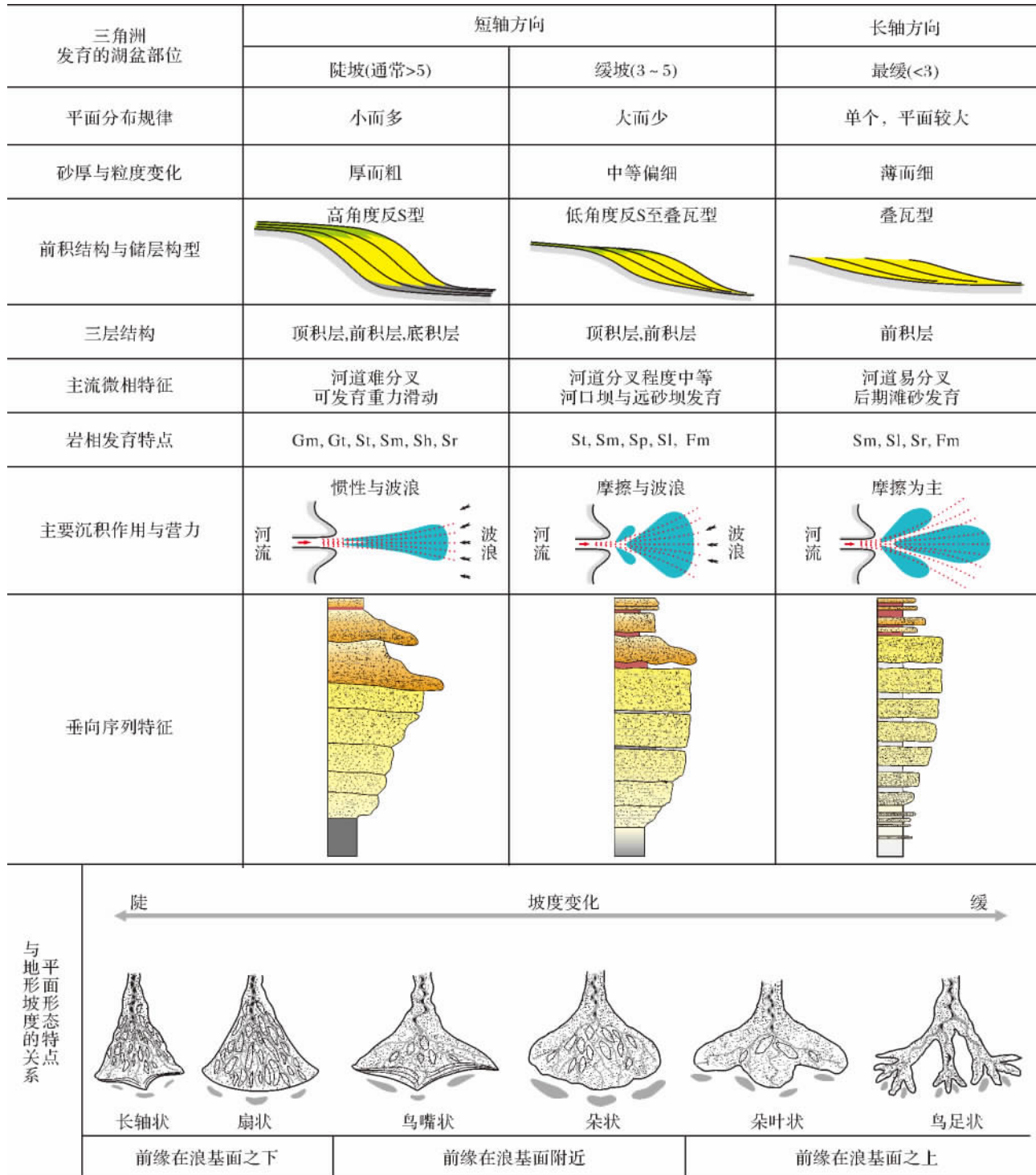


图 3 陆相湖盆三角洲结构—成因分类及其特征


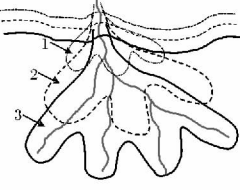

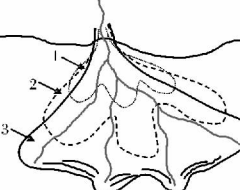
Fig. 3 Texture-genetic classification and characteristics of deltas in lacustrine basin

另外,不同层序时期(体系域)三角洲的沉积特征有所不同,如低位域时期由于湖盆水体相对较低,湖岸线多向盆地方向迁移,导致三角洲向盆进积明显,沉积物向湖搬运较远,河道的作用较强,三角洲通常呈朵叶状或鸟足状分布。而高位域时期,由于岸线变化较小,水位通常较高,三角洲总体以加积与进积为主,波浪与河流共同影响三角洲的形成与发育,三角洲外观形态通常多呈朵叶状或尖嘴状(表2)。因

此,不同类型的三角洲首先在外观形态上有所差异,也导致其沉积砂体的分布形式有所不同,其与影响三角洲结构一成因的坡度大小、物源远近、粗度粒细及河道发育程度有关(图3)。而基准面旋回的叠加样式则通常反映了三角洲的局部与总体进、退积过程(图4),需要明确单期粒序旋回(自旋回)与不同级别(整体与局部)的进退积关系,才能进一步明确三角洲的形成过程与宏观展布特征。

表2 不同体系域三角洲形成过程与特点

Table 2 Depositional processes and features of deltas in different system tracts

体系域	剖面结构	前积过程	主要特征
低位域(LST)			1) 岸线向盆地方向迁移; 2) 三角洲以进积为主; 3) 河控为主; 4) 三角洲呈朵叶状或鸟足状。
高位域(HST)			1) 岸线位置基本不变; 2) 三角洲以加积和进积为主; 3) 波浪与河流共同作用; 4) 三角洲呈朵叶状或尖嘴状。

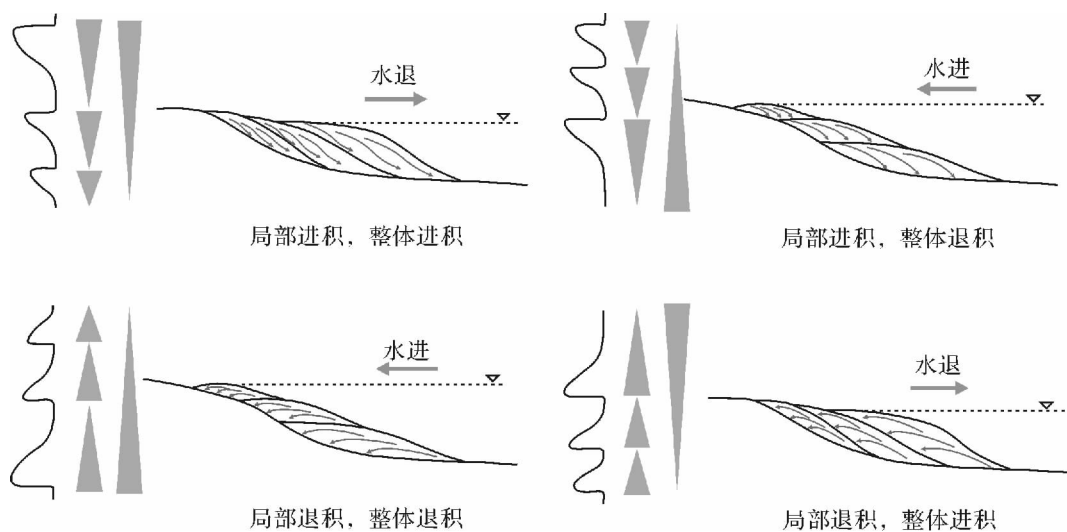


图4 基准面旋回的叠加样式与三角洲进退过程模式图

Fig. 4 Schematic diagram of stacking patterns for base-level cycle and delta transgression-regression processes

因此,不同三角洲类型的外部形态与内部砂体展布形式应有所不同(图1、图3),地质人员编制的沉积相图应能够反映这种外部形态与内砂体展布特征,而不仅仅只是一个概念性的相图。

4 结构—成因编图方法

储层沉积学研究中两种重要的研究成果就是编出可靠的储层(砂体)对比剖面与沉积相(砂体)平面分布图,这不仅是沉积学所关注的核心问题,而且也是油气勘探开发对沉积学研究提出的要求。随着(高分辨率)层序地层学与沉积学结合程度的加深,储层(小层)对比研究出现了新理念,尤其是三角洲沉积所具有的独特前积结构,在进行砂体对比时应能反映这一特征才能使其对比的结果反映三角洲的剖面结构成因。而沉积相平面分布图不应只是简单的地质概念模式图,同时它也应能够反映沉积体的结构与成因。若要编好沉积相图,首先是要确定编图单元或层次,不同的编图单元或层次所采用关键沉积参数应有所不同。一般来说,宏观层次(地厚 $\geq 30 \sim 50$ m),尤其是当地层厚度差异大于 $30 \sim 50\%$ (最小与最大厚度比值的百分数)时,主要用含砂率来编制沉积相图以反映沉积体系与亚相,而砂厚主要用来表征物源与水流方向。微观层次(平均厚度 ≤ 30 m),可直接用砂厚来刻画沉积微相的平面变化,但在确定不同砂厚的微相时,应充分考虑其沉积成因^[15]。

因此,针对垂向上不同规模的研究目的层段,应采用相应的沉积参数来反映沉积格局。确定编图单元之后,就需要对编图单元内硬数据(岩心或钻井资料)与软数据(地震资料与模式)进行合理使用。因此,从岩心确定岩相组合与沉积序列,到岩、电结合确定测井相模版,再到井震结合进行沉积参数统计与确定,最后结合特征参数进行沉积相平面图的编制,这样才能更好地分层次、具有针对性地实现其研究的目的,以更好的逼近地质的真实。

4.1 沉积微相导向的小层对比

小层通常由一个或几个单砂体(层)组成,为等时单元所形成的完整沉积成因单元;而单砂层是最小的储层单元,是沉积韵律中较粗的具有相似的岩性和属性的那部分单元,其内部在岩性上无明显的差异^[15]。随着油田开发的不断进行,尤其是进入高含水期后,开发井网控制的基本单元都是常规划分的小层^[49],且小层对比的最终目的还是要进行单砂层对比^[50]。但由于碎屑岩沉积砂体的侧向相变剧烈,经

常表现为频繁分叉合并,实际上很难绝对地按每个单砂体进行分层对比^[15]。小层与砂体对比已由原先的“砂对砂,泥对泥”转变为基于沉积成因的小层对比方法即以沉积相带为导向的对比方法,这一新理念应用较多的是曲流河沉积体系与三角洲沉积体系^[54]。

在(高分辨)层序地层格架内,采用沉积微相导向的小层对比方法能够更好的反映储层沉积的结构成因。而沉积微相导向的砂体对比首先应充分反映沉积微相(砂体粒序特征)的几何形态与沉积旋回所代表的地质意义。粒序特征主要反映的是储层微观层次的沉积作用(方式)和砂体的几何形态,即正粒序为顶平底凹的透镜体,主要为侧向或垂向加积;反之,为底平底凸的透镜体,则主要是前积成因。不同沉积类型砂体对比的策略应有所不同,即便在较小井距的情况,由于三角洲前缘的前积作用,砂体倾斜叠置也是存在的。因此,采用斜对比的策略往往更符合实际情况,典型如反映顺物源具前积特征的三角洲前缘砂体对比(图5),在传统小层对比时更多考虑标志层拉平相似对比(图5-A),这导致砂体连续性很好,井间砂体变化也小,但却与实际不符,即忽视前积倾角的岩性地层对比不可能预测死油区;在结合三角洲前积结构特点后,通过加密钻井可确定前积的倾角,采用前积式(斜对比的一种)对比后,不仅使砂体对应关系更明确,更能体现井间差异,并可预测含油层的分布状况(图5-B)^[51]。这种前积式对比实际上更能体现地下地质体的沉积成因与叠加规律,这样的对比结果对实际生产的指导作用更为明显。其核心问题是确定何种对比原则才能使所有人都能得出此种结果,笔者的观点有二:1)依据井上的粒序特征(若有岩心应考虑沉积构造的成因)确定其沉积作用;2)平面砂体的分布或定量地质知识库确定砂体的对比范围。如2009年Shepherd提出的新的单砂体对比理念(笔者将其称为沉积微相导向对比),这种对比则可更好地体现砂体的沉积成因^[50]。即在(高分辨率)层序地层的约束下,充分考虑砂体的粒序特征、微相变化,尤其是砂体的几何形态(如水道为正粒序呈顶平底凹的特点;河口砂坝为反粒序呈顶凸底平或顶凸底凹的特征),进行砂体的前积式或叠瓦式斜对比(图6)。当然这种对比方法需要明确三角洲主要的前积方向,而对比的结果也能反映这个方向与砂体的垂向与侧向变化。

要特别指出的是:地层学与沉积学是两个相互联系的独立学科门类,各自的侧重并不相同,层序地层

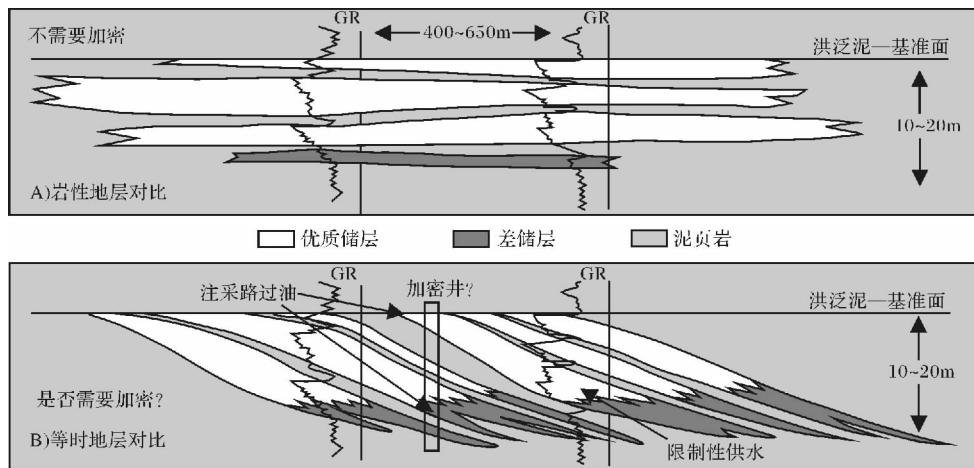


图5 两个相邻井之间岩石地层和年代地层的河口砂坝对比技术比较示意图^[49]

注: 薄层粉砂质泥岩可与厚成优质河口坝砂岩进行对比(B), 而不是以相似厚度与岩性为对比原则(A)

Fig. 5 Schematic two-dimensional illustration of lithostratigraphic vs. chronostratigraphic mouth-bar correlation techniques between two adjacent wells^[49]

注: Lithostratigraphic correlation—岩性地层对比; Chronostratigraphic correlation—等时地层对比; No Infill Required—无需加密井; Flooding shale—Datum—洪泛面(泥岩); Bypass oil—死油区; Infill Required—需要加密井; Infill location—加密井位; Restricted aquifer support—有限含水能量; Good reservoir quality—优质储层; Heterolithics—粉砂质泥岩; Shale—页岩

学与储层(应用)沉积学不是替代关系。前者具有区域性或等时性的特点,故只谈局部地区或某一点的层序或地层特征而不进行区域上的对比是无意义的,也就无法实现地层等时性的概念与作用;但应从点入手做出标准的可对比的垂向剖面,这是因为它属地层学的范畴,其重点在就于地层的对比。然而,沉积学就不同了,可进行点、线、面的研究,其重点在于成因解释与砂体分布的预测;前者是基础,后则是目的,即沉积学的研究应放在层序地层格架下进行。这就说明层序地层的四大控制因素并不完全等同于控制沉积体系发育与沉积作用的因素。这也是传统的层序地层学中较少讨论地形坡降、粒度大小及物源远近变化对其控制的原因所在。

4.2 岩电约束

沉积相图编制离不开岩心/露头(岩性方面)与测井资料(电性方面)的约束作用。首先是岩心或野外露头资料的信息,它们主要解决的是沉积类型与垂向沉积序列等问题。沉积相类型的确定或建立方法是具有丰富沉积学研究经验的地质人员进行描述,有关岩心与野外露头的岩性、沉积构造、各种界面特征是描述的重点,并最终建立能反映岩性、粒序的特征及沉积构造叠加形式的岩相及其组合特征(沉积序列)。因此,要加强基于岩心进行沉积序列研究的理念,或说是以认真的态度建立反映岩相变化与组合特

征的综合柱状图(Sedimentary logs)。国外学者对油田或地下地质研究时,更强调研究观察与研究沉积序列特征的作用,而我国则大多对岩心则只是简单的岩性分析与测井解释,这就制约了我们对相类型与砂体(储层)分布规律的认识,需要加强这方面的基础学习与实际研究工作,否则后续沉积相图的编制就成了无本之木、无源之水,沉积相图的可信度会大打折扣。

利用测井资料进行沉积研究最主要的方法就测井相的分析方法。常规测井相分析通常以测井曲线的幅度、形成特征、接触关系(突变或渐变)及组合类型来研究表征,其中倾角测井在反映沉积构造与古水流方向方面有独特的作用。测井相是进行沉积相编图的重要依据。随着测井技术的发展,将微电极测井与地层倾角测井、电阻率测井相结合形成三维虚拟岩心(地层电阻率成像测井,即FMI),垂向分辨率甚至小于8mm,沉积构造甚至纹层都可见。但测井数据优缺点明显,优点体现在可以提供数千米的连续数据,这对于研究沉积演化、相序变化都有重要的启示作用;然而测井数据精度永远替代不了野外露头与岩心的精细描述,同时测井信息仅反映已钻井位置的情况,对井间的预测还需结合地质模式、地震资料及地质统计学的方法,其井间预测能力有限。再者,测井沉积解释目前尚未取得突破的是如何量化识别沉积旋回与沉积微相,怎样合理确定沉积序列的垂向规

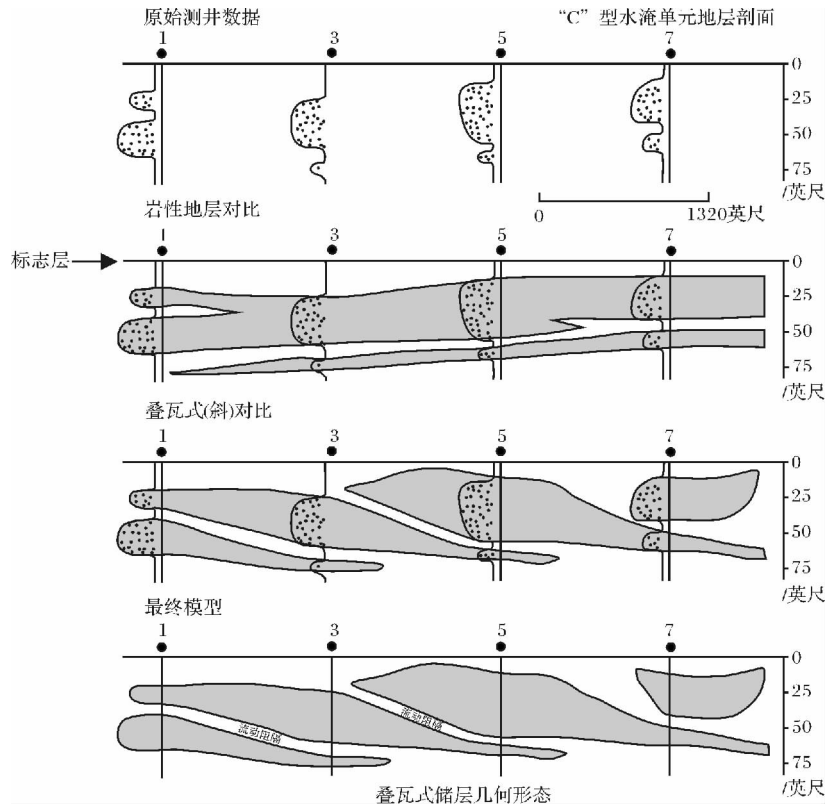


图 6 反映三角洲沉积环境中水道、砂坝转换及前积几何形态的叠瓦式(斜)对比剖面^[52]

注: Raw log data—原始测井曲线; Stratigraphic cross section “C” waterflood unit—水驱单元 C 的地层横剖面; marker—标志层; Layer-cake correlation—层状对比; Shingled correlation—叠瓦式(斜)对比; Final model—最终对比模式; Shingled Reservoir Geometry—叠瓦式储层几何形态; Flow barrier—流体隔层

Fig. 6 Shingled correlation profiles for sandbodies indicating geometry and progradation, transition of channels and bars in certain deltaic system^[52]

模,并采用合理的滤波方式反映沉积序列,进而实现测井资料自动划分沉积微相(或测井相)是现今的一个发展方向。

测井沉积解释的另一个主要方面是反映砂泥的门槛值是否准确的问题,它直接决定后续有关沉积参数统计是否合理与准确,进而影响最终沉积相图编制的结果。严格来讲,一个油田中,不同井或相同井的不同层位,其岩性解释的测井门槛值应是有所不同的。因此确定合理的测井解释门槛值是定量表征沉积与储层特征的前提,目前仍然需要进一步探索比较可靠的方法。

4.3 井震结合参数预测

地震属性是进行沉积特征研究的重要手段,但由于地震属性的多样性与多解性,往往单一属性难以有效刻画沉积体的分布。目前人们更趋向采用多种属性联合进行沉积参数预测,表征或再现砂体的分布(图 7)。需要注意的问题是这一方法需要对各种地

震属性进行合理优选,并减少相似信息的重复使用。

井震结合进行沉积参数预测与沉积参数的平面分布编图之后,就要确定沉积参数向沉积相图转换的合理门槛值,当然需要明确不同的门槛值(通常以色标表示)的地质含义。因此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,对研究区内每一口井相应层位各沉积微相的含砂率进行统计后才能准确确定^[16]。

4.4 多参数平面套合编图方法

4.4.1 沉积参数的确定与选择

储层沉积学中沉积相图编制是一项重要工作,应遵循工业化制图标准与流程,确定研究对象(油田还是盆地)、分层次对沉积相图进行编制。在编制过程中应以模式为指导,突出结构—成因控制,并将单因素制图与单指标制图相结合,最终确定相图。沉积相编图最重要的是要依据沉积参数,最常见的沉积参数是砂厚与含砂率(广义上讲,可称做砂岩百分比,

但含砂率是不含粉砂),它们的使用本身则是依据不同层次储层研究所提出的反映沉积格局的定量指标^[53]。严格意义上讲,在宏观层次上砂厚最大的地区只反映沉积中心、沉积物的主要走向或水流方向,而地层厚度则反映沉降中心或地形地貌的变化特征,两者在地质意义上通常含义是有差别的。沉积相与储层研究中比较常用的参数有:地层厚度、砂岩厚度、含砂率、砂地比、砂岩密度及净毛比等相关概念与定义已有论述^[16]。

特别是应建立优势砂岩的概念(图8A),一套20 m的地层中2层砂总砂厚8 m,含砂率40%,平均单砂层厚度4 m;而另一套60 m地层中有6层砂总砂厚也是8 m,含砂率13.3%,平均单砂层厚度4/3 m。显而易见20 m地层2层累计8 m砂厚更让地质人员感兴趣,这就是优势砂岩的概念,也是确定沉积相中主要沉积微相或亚相的依据之一。在理解了优势砂岩的基础上,应进一步明确总砂厚(砂岩与粉砂岩之和)、纯砂厚(不含粉砂)及骨架砂厚(不含不能反映

沉积格局的砂,即通常不含厚度小于0.5~1 m以下的砂)的统计方法,进而明确砂地比、含砂率及有效含砂率的不同(图8B),这样进行沉积相编图时,才能确定主要沉积体的最主要的成因砂体分布的位置,进而明确它们具体对沉积相编图起到的约束作用。

4.4.2 沉积(微)相的综合编图方法

沉积(微)相综合编图已进入成因统计与定量编图的发展阶段^[54],通常具体步骤如下:

1) 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。因而,成因分析的核心是沉积作用对砂体展布的控制机理。然而,控制沉积作用的核心是古地貌和水动力条件(各种营力)。

2) 模式指导。沉积相图的编制过程中应以地质规律为原则,因此需考虑结构—成因进行编图,正如前述不同类型三角洲平面展布的外观形态与内部砂体分布不同(图3),因此,在沉积参数编图时除合理利用钻、测井与地震信息外,还需结合不同类型三角

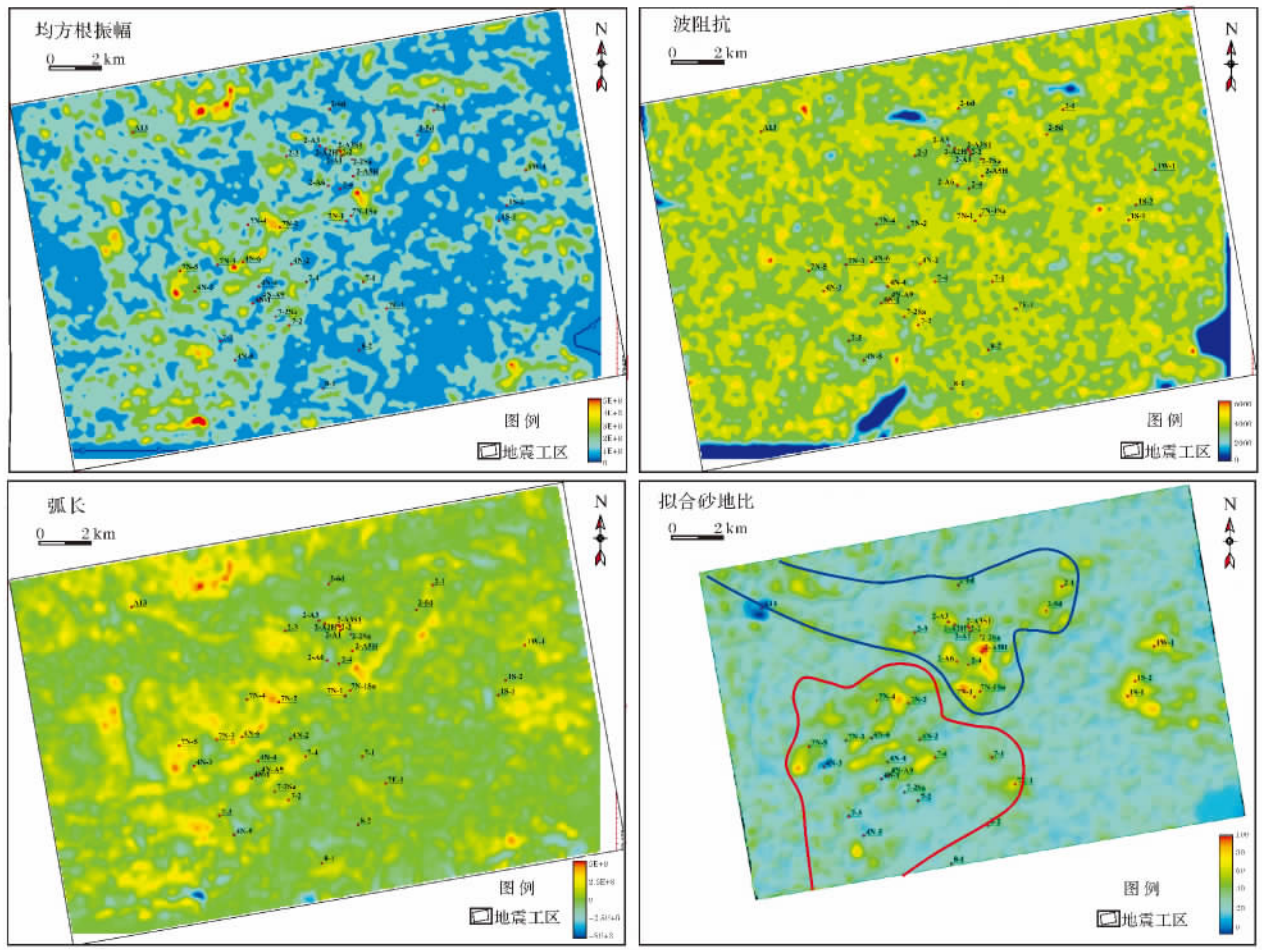


图7 地震多属性组合宏观沉积格局确定

Fig. 7 Identifying macroscopic depositional patterns by multiple seismic attributions

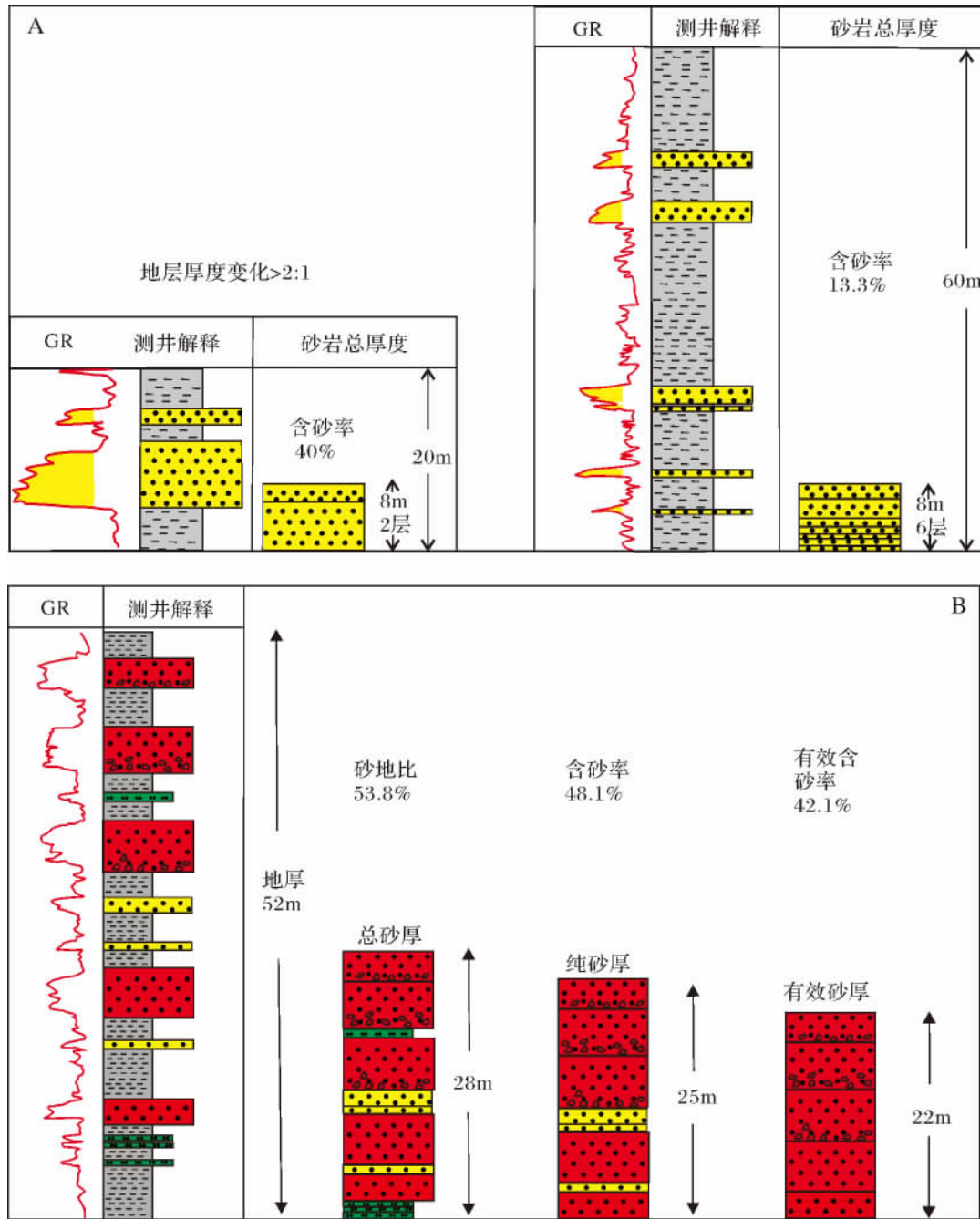


图 8 不同沉积参数的概念与计算方法

A. 优势砂岩的概念、作用与计算方法概念模式 B. 各种砂厚参数的计算方法

Fig. 8 Concepts and calculation methods for different sedimentary parameter

A. concepts ,function and calculation models for advantage sandstone; B. calculation for various parameters of sandbody thickness

洲的沉积模式进行编图,这样才能更好地发挥沉积相的预测功能。

3) 参数约束。确定合理表征门槛值 核心在于不同门槛值的地质意义,以辫状三角洲沉积相图编制为例(图 9),首先利用地层厚度确定宏观沉积范围、砂地比确定主要物源方向、然后用总砂厚定主要沉积体(三

角洲)范围、用有效砂厚定亚相、接下来用含砂率定微相类型、最后利用多参数约束沉积微相进行综合编图。

4) 平面套合。多物源方向与多种沉积体系并存的情况下,需要考虑不同方向沉积体的展布,这样需要采用套合编图的理念,也即把编图单元按物源方向与沉积体类型进行分区分块约束,然后再合并到一起

统一进行编图。这样的编图既考虑了局部的影响,又照顾了总体的沉积格局。

最后,需要指出的是在沉积相编图时不仅需要考虑不同沉积类型的宏观展布外形,而且还应考虑其内部的不同成因砂体的分布位置、相互关系与展布形态。就三角洲来讲,粗粒的扇三角洲通常以小范围、扇形与朵状分布为特征,沉积微相表现出明显的坝道

(辫状水道与辫流坝)转换特点,其中辫流坝规模相对较大(图10);中—粗粒的辫状三角洲常以相对大范围的朵状或朵叶状分布为特点,较宽的辫状分流河道更为发育,并伴随中—低弯度(曲流)河道与砂坝(图9);而正常三角洲多呈伸长状(或鸟足状)、较窄的中—高弯度(曲流)河道比较发育,且河道间细粒—泥质沉积更为发育(图11)。

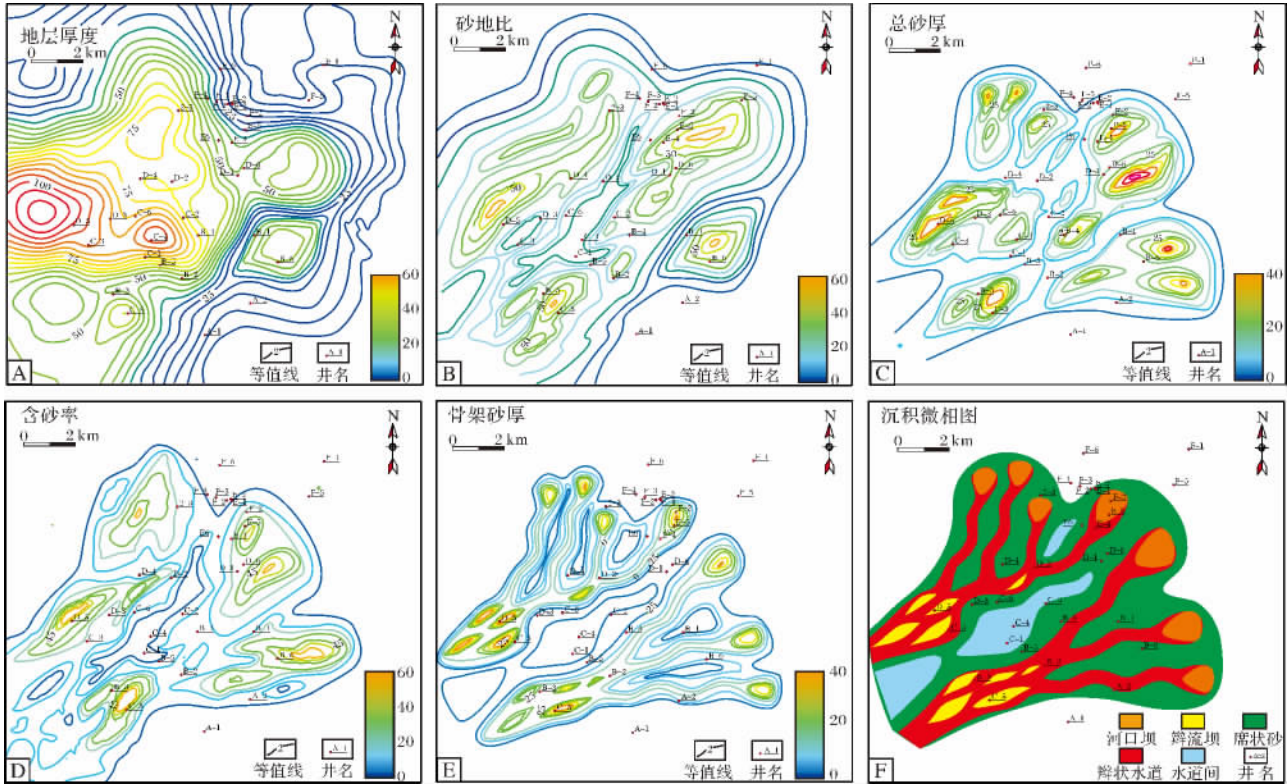


图9 典型辫状三角洲多参数约束沉积微相综合编图方法

Fig. 9 Typical integrated facies mapping with multi-parameter for braided delta

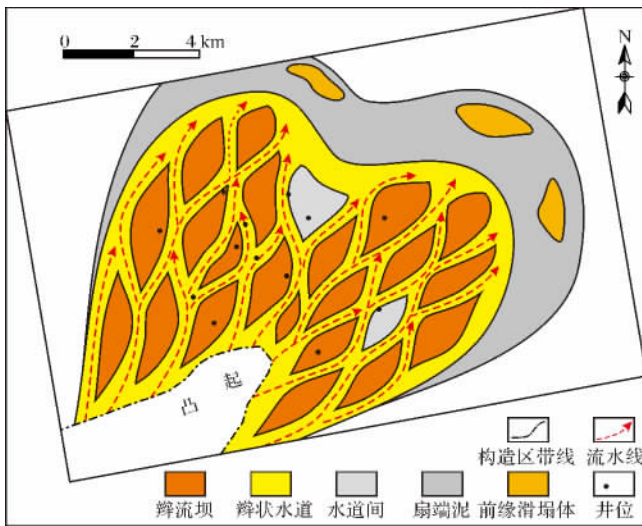


图10 典型扇三角洲沉积相分布图

Fig. 10 Typical depositional facies distribution of fan delta

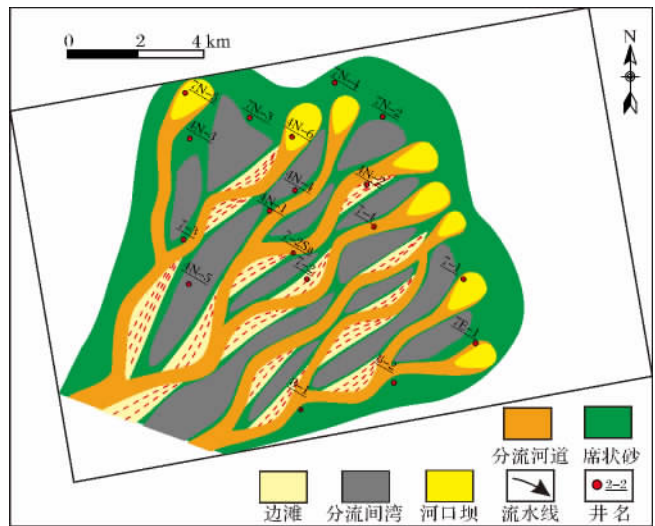


图11 典型正常三角洲沉积相分布图

Fig. 11 Typical depositional facies distribution of normal delta

5 结语

我们不仅应重视三角洲沉积体系结构—成因分类方案的作用,而且需要以此为约束,采用多种资料与多种方法联合进行沉积相编制。当前在储层沉积学的基础研究方面,国内外学者科学研究中注重综合构造背景与沉积作用的关系(尤其是地形坡度大小与变化对沉积作用的控制)、粒度在平面上的变化、海(湖)平面变化、气候影响以及沉积作用与各种营力对砂体分布的控制,定量分析,综合成因解释;而纯项目性的研究多注重单因素分析,定性描述,简单层序地层学分析,缺乏系统考虑。

在实验科学方面,国外研究以实际观察与测试数据为基础,量化实验影响因素,精确控制实验过程,并与地质实际结合对比,总结差异与联系;而国内的实验研究通常设计不够严谨,实验控制因素较为定性,注重结果形式,对其成因与各种营力对砂体分布的研究不足。

在理论升华方面,国外研究强调成因单元划分与沉积物的成因及分布,并不注重相带划分与分布;而国内研究结论通常缺乏十分充分的科学依据,结论与过程联系不紧。

当然我们也不能妄自菲薄,毕竟在国内这方面的研究更注重实际应用,导致有些理论与研究过程还不够精细。希冀本文能够为推动今后我国储层沉积学研究水平的大力提高提供绵薄之力,愿与各位同仁共勉!

致谢 中国地质大学研究生单新、胡勇、谭程鹏、曾小明、齐妹清在本文的撰写过程中帮助查找了大量的文献与协助编制了部分图件,在此一并表示感谢!

参考文献(References)

- Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [M]. In: Broussard M (Ed.), *Deltas: Models for Exploration*. Houston: Houston Geological society, 1975: 87-98
- Orton G. A spectrum of Middle Ordovician fan deltas and braidplain deltas, North Wales: a consequence of varying fluvial clastic input [M]. In: Nemecek W, Steel R (Ed.), *Fan-deltas: Sedimentology and tectonic settings*. London: Blackie and Son, 1988: 23-49
- 李思田. 沉积盆地的动力学分析——盆地研究领域的主要趋向 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3-4): 1-8 [Li Sitian. Geodynamics of sedimentary basins—the main trend of basin research [J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(3-4): 1-8]
- Muto T, Steel R J, Swenson J B. Autostratigraphy: a framework norm for genetic stratigraphy [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77: 2-12
- 袁亦楠, 肖敬修, 薛培华. 湖盆三角洲分类的探讨 [J]. 石油勘探与开发, 1982, (1): 1-11 [Qiu Yinan, Xiao Jingxiu, Xue Peihua. The classification of lacustrine delta [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1982, (1): 1-11]
- Nemecek W, Steel R J. *Fan Deltas: sedimentology and tectonic settings* [M]. Blackie, London, 1988: 1-444
- McPherson J G, Shanmugam G, Moiola R J. Fan-deltas and braid deltas: varieties of coarse-grained deltas [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 99(3): 331-340
- 薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类 [J]. 地质学报, 1991(2): 141-153 [Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991(2): 141-153]
- 吴崇筠. 湖盆砂体类型 [J]. 沉积学报, 1986, 4(4): 1-26 [Wu Chongyun. Sandbodies in lake basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1986, 4(4): 1-26]
- 于兴河, 王德发, 郑浚茂, 等. 辫状河三角洲砂体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 [Yu Xinghe, Wang Defa, Zheng Junmao et al. 3-D extension models of braided deltaic sandbody in terrestrial facies—an observation on deposition of modern deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia [J]. *Acta Petroli Sinica*, 1994, 15(1): 26-37]
- Scott A J, Fisher W L. *Delta Systems and Deltaic Deposition* [J]. *Delta systems in the exploration for oil and gas*. 1969: 493-503
- Galloway W E. Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems [M]. In: Broussard M (Ed.), *Deltas: Models for Exploration*. Houston Geological society, 1975: 87-98
- Coleman J, Wright L. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies [M]. In: Broussard M (Ed.) *Deltas: Models for Exploration*. Houston: Houston Geological Society, 1975: 99-149
- 李延平, 陈树民, 宋永忠, 等. 大庆长垣及以东泉三、四段扶杨油层浅水湖泊—三角洲体系沉积特征 [J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(5): 13-16 [Li Yanping, Chen Shumin, Song Yongzhong et al. Shallow lacustrine-delta system deposition characteristics of fuyang oil bed in Daqing placanticline and Quan3 and Quan4 member to its east [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2005, 24(5): 13-16]
- 于兴河. 油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积成因的地质表征方法 [J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 1-14 [Yu Xinghe. Existing problems and sedimentogenesis-based methods of reservoir characterization during the middle and later periods of oilfield development [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 1-14]
- 于兴河, 李胜利. 碎屑岩系油气储层沉积学的发展历程与热点问题思考 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 880-895 [Yu Xinghe, Li Shengli. The development and hotspot problems of clastic petroleum reservoir sedimentology [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 880-895]
- 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学(第二版) [M]. 北京: 石油工业

- 出版社, 2008: 339-341 [Yu Xinghe. Clastic reservoir sedimentology 2nd [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 339-341]
- 18 Gilbert Grove K. The Topographic Features of Lake Shores [R]. United States Geological Survey Annual Report 5. 1885: 69-123
- 19 Barrell J. Criteria for the Recognition of Ancient Delta Deposits [M]. Geological Society of America, 1912
- 20 Johnston W A. Sedimentation of the Fraser River Delta [M]. Geological Survey of Canada, 1921
- 21 Holmes A. Principles of Physical Geology [M]. London: Thomas Nelson, 1965
- 22 Elliott T. Deltas. In: Reading H G, ed. Sedimentary Environments and Facies [M]. Oxford: Blackwell, 1986: 113-154
- 23 Miall A. Principles of sedimentary basin analysis [M]. New York: Springer-Verlag, 1984
- 24 裘亦楠. 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 [Qiu Yanan. Developments in reservoir sedimentology of continental clastic rocks in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3): 16-24]
- 25 于兴河, 王德发. 陆相断陷盆地三角洲相构型要素及其储层地质模型 [J]. 地质论评, 1997, 43(3): 225-231 [Yu Xinghe, Wang De-fa. The architectural elements of the deltaic system in the terrestrial faulted basin and the significance of its reservoir geological model [J]. Geological Review, 1997, 43(3): 225-231]
- 26 武富礼, 李文厚, 李玉宏, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化 [J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 307-315 [Wu Fuli, Li Wenhou, Li Yuhong *et al.* Delta sediments and evolution of the Yan-chang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(3): 307-315]
- 27 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流拗陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布 [J]. 地质学报, 2008, 82(6): 813-825 [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, *et al.* Formation and distribution of shallow-water deltas and central sandbodies in large open depression lake basins [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 813-825]
- 28 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 浅水三角洲沉积模式 [J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 933-944 [Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, *et al.* Shallow-water deltas and models [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 933-944]
- 29 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型拗陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例 [J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 89-99 [Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing *et al.* Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake, example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 89-99]
- 30 Friedman G M, Sanders J E. Principles of sedimentology [M]. Wiley, 1978
- 31 Coleman J M. Dynamic changes and processes in the Mississippi River delta [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 999-1015
- 32 Nemecek W. Deltas: terminology and classification [M]. In: Colella A D (Ed.), Coarse-grained deltas. Wiley, 1990: 3-12
- 33 Postma G. An analysis of the variation in delta architecture [J]. Terra Nova, 1990, 2(2): 124-130
- 34 Colella A, Prior D. Coarse-grained deltas [M]. Wiley, 1990
- 35 Fisher W, McGowen J. Depositional systems in Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relation to occurrence of oil and gas [J]. AAPG Bulletin, 1969, 53(1): 30-54
- 36 Bates, Charles C. Rational Theory of Delta Formation [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(9): 19-62
- 37 Smith D G. Lacustrine deltas [J]. Canadian Geographer, 1991, 35(3): 311-316
- 38 Donaldson A. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians [J]. Geological Society of America Special Papers, 1974, 148: 47-78
- 39 Coleman J M. Deltas: processes of deposition and models for exploration [M]. Champaign Continuing Education Publ Comp Inc, 1976: 1-102
- 40 Ethridge F, Wescott W. Tectonic setting, recognition and hydrocarbon reservoir potential of fan-delta deposits [M]. In: Koster E, Steel R (Ed.), Sedimentary of Gravels and Conglomerates. Vol 10: Mem Can Soc Petrol Geol, 1984: 217-235
- 41 Orton G J, Reading H G. Variability of Deltaic Processes in Terms of Sediment Supply, with Particular Emphasis on Grain Size [J]. Sedimentology, 1993, 40(3): 475-512
- 42 Busby-Spera C. Development of fan-deltoid slope aprons in a convergent-margin tectonic setting: Mesozoic, Baja California, Mexico [M]. In: Nemecek, Steel R J (Ed.), Fan deltas: Sedimentology and tectonic settings. New York, Blackie. London: Blackie and Son, 1988: 419-429
- 43 姚光庆, 马正, 赵彦超, 等. 浅水三角洲分流河道砂体储层特征 [J]. 石油学报, 1995, 16(1): 24-31 [Yao Guangqing, Ma Zheng, Zhao Yanchao *et al.* Reservoir characteristics of distributary channel sand bodies of shallow water delta [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(1): 24-31]
- 44 吕晓光, 李长山, 蔡希源, 等. 松辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征及前缘相储层结构模型 [J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 75-80 [Lü Xiaoguang, Li Changshan, Cai Xiuyan *et al.* Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao shallow lacustrine delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4): 75-80]
- 45 Fisk H N, McFarlan E, Kolband C R, *et al.* Sedimentary framework of the modern Mississippi delta [J]. Journal of Sedimentary Research, 1954, 24(2): 76-99
- 46 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学(第一版) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002 [Yu Xinghe. Clastic petroleum reservoir sedimentology 1st [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002]
- 47 Yu Xinghe, Li Shunli, Tan Chengpeng *et al.* The response of deltaic systems to climatic and hydrological changes in Daihai Lake rift basin, Inner Mongolia, northern China [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 2(1): 41-55
- 48 Yu Xinghe, Li Shunli, Chen Bintao, *et al.* Interaction between Downslope and Alongslope Processes on the Margins of Daihai Lake, North China: Implication for Deltaic Sedimentation Models of Lacus-

- trine Rift Basin [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2012, 86(4): 932-948
- 49 宋新民. 当前开发形式下储层研究的发展趋势[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 16-21 [Song Xinmin. The development of study of reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 16-21]
- 50 裘亦楠, 张志松, 唐美芳, 等. 河流砂体储层的小层对比问题[J]. *石油勘探与开发*, 1987, 14(2): 46-52 [Qiu Yanan, Zhang Zhisong, Tang Meifang, *et al.* The detailed correlation of fluvial sandbody reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1987, 14(2): 46-52]
- 51 Ainsworth R B, Sanlung M, Duivenvoorden S T. Correlation techniques, perforation strategies, and recovery factors: an integrated 3-D reservoir modeling study Sirikit Field, Thailand [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(10): 1535-1551
- 52 Shepherd M. The reservoir framework in M. Shepherd, Oil field production geology [J]. *AAPG Memoir* 91, 2009: 81-92
- 53 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 [Yu Xinghe. A review of development course and prospect of petroleum reservoir characterization and stochastic modeling [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1): 1-15]
- 54 于兴河. 油田开发中后期储层面临的问题与基于沉积成因的地质表征方法[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 1-14 [Yu Xinghe. Existing Problems and sedimentogenesis-based methods of reservoir characterization during the middle and later periods of oil field development [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 1-14]

Texture-genetic Classifications and Mapping Methods for Deltaic Deposits

YU Xing-he LI Sheng-li LI Shun-li

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract: Classifications for various depositional systems have been the general attention of sedimentary geologists. In recent years, sedimentologists have emphasized increasingly on the texture-genetic classification of deltaic depositional system which are the focus and hot issue for sedimentology study and hydrocarbon exploration and development. This paper aims to review the development of the study for deltaic depositional system, points out the problems, demonstrates the specific meaning and scheme of texture-genetic classification for deltaic deposits systematically, and illustrates the advantages of this type of method. Simultaneously, a method of facies mapping which indicates the characteristics of texture-genetic classification for deltas is proposed with the related specific issues in this paper. Based on the principles of high resolution sequence stratigraphy and layer correlation proved by depositional facies, this mapping method emphasizes identifying depositional facies type by litho-facies assemblages and vertical successions. In order to reflect the grain size, distribution and sedimentary genesis of sand-body and represent the reservoir prediction adequately, multi-parameters from lithology, well logs and seismic are nested during mapping.

Key words: type of deltas; texture-genetic classification; litho-facies assemblages; layer correlation; multi-parameter nested mapping