

# 应用遥感信息图像研究现代水下分流河道河流类型

马世忠<sup>1</sup>, 张永清<sup>2</sup>

1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318
2. 中国石油吉林油田分公司 油藏评价处, 吉林 松原 138000

Ma Shizhong<sup>1</sup>, Zhang Yongqing<sup>2</sup>

1. Geoscience College, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China
2. Reservoir Evaluation Department, Jilin Oilfield, PetroChina, Songyuan 138000, China

Ma Shizhong, Zhang Yongqing. Research on the channel pattern of present subaqueous distributary channel by remote sensing image. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 024-031

**Abstract:** Subaqueous distributary channel is one of the most important microfacies types and high-quality reservoirs in delta-front subfacies, but little research of subaqueous distributary channel pattern has been carried out. Whether there is meandering or braided pattern or any other subaqueous channels and whether there is high angle turning is not clear, which directly affect the research of fine characterization, architecture, three-dimensional heterogeneous model of subaqueous channel monosandbody in high water-cut stage and tertiary phase. Therefore, it is of great theoretic significance and badly needed to ravel the subaqueous channel pattern. Focused on this problem, our study used the remote sensing method (satellite image) which can integrally and finely reveal the plane configuration and the character of subaqueous channel to thoroughly dissect 41 present subaqueous channels and determine subaqueous channel patterns, to classify subaqueous channel region into 4 zones, 3 types and 8 subtypes of channel pattern and discuss their characteristics and formation condition. Based on the statistics of the channel pattern of 41 present subaqueous channels, it is concluded that straight channel pattern is common, while low-sinuosity, high-sinuosity, braided and anastomosed channel patterns are rare and are normally developed in the nearshore subaqueous environment in different geological settings.

**Key words:** subaqueous distributary channel; channel pattern; present river; channel monosandbody; formation mechanism

**摘要:**水下分流河道是三角洲前缘亚相最重要的微相类型及油气优质储层之一,但目前对水下分流河道河型研究较少,其是否存在曲流河型、辫状河型?有无其他河型?是否存在高角度转弯现象等问题尚不十分清楚,并直接影响高含水期及三次采油阶段水下分流河道单砂体精细刻画、内部构型或建筑结构、三维非均质性模式等研究,为此,弄清水下分流河道河型成为既急需又具有理论意义的关键问题。针对这一关键问题,以现代沉积为重要钥匙,采用能整体、细致揭示河道平面形态及特征的遥感信息法(卫星图像)对41条现代水下分流河道进行深入剖析,确定水下河型;将水下分流河道分为4带、划分3类8亚类河型,并论述了其特征及形成条件;通过41条现代水下分流河道的河型统计得出:顺直型水下分流河道是最常见河型,低弯度型、高弯度型、辫状型、网状型等河型少见且皆发育于不同地质背景的近岸水下环境。

**关键词:**水下分流河道;河型;现代河流;河道单砂体;形成机制

中图分类号:TE121.14 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2012)02-0024-08

收稿日期:2011-12-30;修回日期:2012-02-20

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05010001-008);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20092322110001);黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11521010)

作者简介:马世忠(1963—),男,博士,教授,博士生导师,矿物学、岩石学、矿床学专业,主要从事沉积学、油气田开发地质学教学、研究工作。  
E-mail: szm6503@sina.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2012,19(2)

水下分流河道是三角洲前缘亚相最重要的微相类型之一,因其具有相对较高的水体能量,更成为该亚相中最重要的油气优质储层<sup>[1-2]</sup>,具有可观的油气储量和较好的油气开发效果,而越来越受到重视。

由于水下分流河道沉积属于三角洲相中的微相级类型,在油气勘探、开发中,研究到水下分流河道微相已属于精细研究阶段,因此,研究重点多侧重于水下分流河道微相的识别、单砂体的预测、储集性质及含油气性评价等<sup>[2-8]</sup>,加之河流类型识别的困难性,从而对水下分流河道河流类型(以下简称水下河型)研究较少。

随着油气勘探、开发的不断深入,一方面,发现了一些需要理论上解决的问题,如油田开发密井网单砂体精细解剖发现水下分流河道:(1)存在高角度转弯现象(图1);(2)有的具有曲流河、辫状河特征;(3)水下分流河道窄而多等。这些现象或类型是客观存在?还是高分辨率层序对比、相类型确定、微相组合等错误所致?若是前者又该如何进行理论解释?蓄水盆地水下具有形成这些现象或类型的地质条件吗?这些地质条件是什么?其形成机理如何?

另一方面,随着高含水期及三次采油阶段对储层认识程度要求的提高,极大地推进了水下分流河道单砂体精细刻画、内部构型或建筑结构(architecture)、三维非均质性及其建模等研究的不断发展与深入。但上述方面特别是单砂体内部构型受控于水下分流河道河型<sup>[9-14]</sup>,为此,水下分流河道河型成为水下分流河道砂体及其内部精细地质研究的重要前提或瓶颈。那么,如何揭示已客观存在、可观察、可证实(而不是推测)的水下分流河道河型成为亟须且具有理论意义的关键问题。

## 1 水下河型研究方法

由于水下分流河道被蓄水盆地(海或湖)水体淹没这一环境的特殊性,尤其是在目前水下河型研究较少的背景下,使水下河型研究需考虑到确定河型的信息来源。

### 1.1 水下河型研究的难点

关于水下河型研究,水下分流河道比陆上河道存在较大难度,这是因为:

首先,作为确定河型重要依据的河道形态,对水下分流河道而言更难获得。表现为:(1)现代水下分

流河道形态。从野外或遥感图像可很好地观察到现代陆上河道的形态,而水下分流河道则与之截然不同,因被一定深度水体淹没且相对肉眼观察视野其范围较大,现代水下分流河道形态很难从海面或湖面上直接观察<sup>[15-20]</sup>,即便是遥感图像也受到一定限制。(2)古代露头水下分流河道形态。古代露头因多以地层剖面而极少顺层面出露、及受出露范围的限制<sup>[1]</sup>,很难揭示水下分流河道的平面形态。(3)油田地下水分流河道形态。由于水下分流河道砂体宽度一般较窄,油田开发井网对其控制程度较差,致使水下分流河道特别是其内部的平面变化规律通过开发井网也难于精细刻画。

其次,在水下河型研究较少,河型尚不清楚且缺少水下河型与其沉积特征对应关系的前提下,无论从现代沉积、古代露头还是从油田钻井信息的沉积特征上,识别水下河型皆存在困难。况且因被水体淹没,很难获得连续的水下分流河道现代沉积剖面,至多是很少量的水下钻孔取心资料。这也是造成水下河型研究较少的主要原因。

### 1.2 水下河型研究方法

水下河型研究方法与河型划分依据有着密切关系,可包括如下研究方法:(1)河道地貌形态法,即通过河道平面几何形态、地形及坡降、地理位置等信息对河型进行研究。其又可分为野外观测法、遥感信息法等。(2)河道沉积特征法,即通过河流沉积体的沉积学特征<sup>[15-20]</sup>对河型进行研究。其又可分为现代沉积分析法、古代露头分析法、钻井信息(岩心、岩屑、测井等)分析法等。(3)河道沉积模拟法,即通过河流沉积模拟<sup>[21]</sup>对河型进行研究。其又可分为水槽物理模拟法、数值模拟法等。(4)河道及河型三维地震识别法,即通过三维地震沿层切片及特征属性的平面特性<sup>[5-7]</sup>,识别河道单砂体,并据此推测河型。目前,该技术在河道单砂体识别方面仍处于探索阶段,对河型确定尚存在困难。

鉴于目前尚缺少水下河型与沉积特征的对应模式,加之沉积特征推断水下河型的间接性;模拟法确定水下河型的微缩试验的多因素影响不确定性;目前水下河型研究较少背景下所需的认知性;信息可获取性及方法可操作性,本文以现代沉积为重要钥匙,采用能整体、细致揭示河道平面形态及特征的遥感信息法(卫星图像)对大量现代水下分流河道进行深入解剖、分析,确定现代水下分流河道已存在、可观察的河型,进而建立水下分流河道河型。

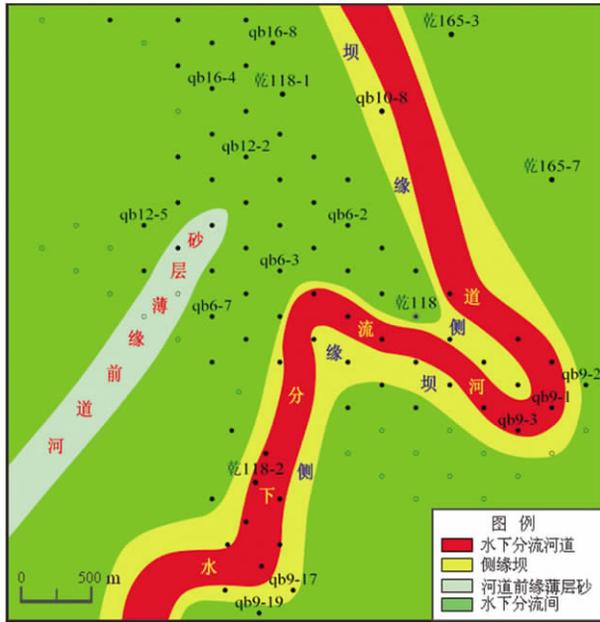


图1 水下分流河道高角度转弯现象  
Fig.1 High angle turning of subaqueous distributary channel  
吉林油田乾118区块 q<sub>3</sub> II 3 小层。

1.3 水下分流河道分带

由于河流从陆上注入蓄水盆地并向前延伸, 经历不同的沉积环境, 其地貌、水动力等特征差异较大, 为此, 按蓄水盆地水深、水动力、河流能量等条件, 将水下分流河道细分为4带(图2):

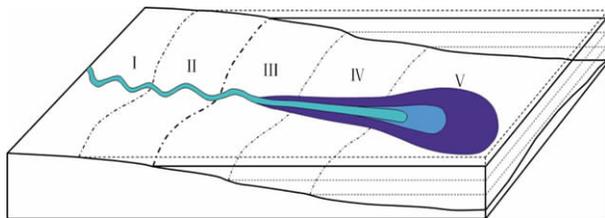


图2 水下分流河道分带  
Fig.2 Plane zones of subaqueous channel region  
I—陆上带; II—高低水位间过渡带; III—近岸浅水带; IV—中岸中等水深带; V—远岸深水带。

(1)高低水位间过渡带, 即位于平均高水位线(或平均高潮线)与平均低水位线(或平均低潮线)之间地带的分流河道。其在高水位期处于水下, 低水位期处于水上, 是陆上分流河道与水下分流河道的过渡带。

(2)近岸浅水带, 即位于平均低水位线(或平均低潮线)以下的近岸浅水带, 具有明显水下切蚀能力的限定-半限定性水下分流河道段。近岸、浅水、河流能量为主、限定性-半限定性河道及明显水下切

蚀能力、河道沉积特征明显是近岸浅水带水下分流河道的主要特点。

(3)中岸中等水深带, 即位于近岸浅水带向盆一侧的中等水深带, 逐渐失去水下切蚀能力和限定性的水下分流河道段。中岸、中等水深、河能减弱、蓄水体能量增强、河道沉积特征减弱是该带主要特点。

(4)远岸深水带, 即位于中岸中等水深带向盆一侧的远岸深水带, 河流能量大大减弱, 河流定向水流呈长扇形扩散, 完全失去水下切蚀能力和限定性的水下分流河道末端段。远岸、深水、河能大大减弱、甚至以蓄水体能量为主、河道沉积特征很不明显是该带主要特点。

2 现代水下河型、特征及形成机制

依据河道的不同特征(如河道几何形态、横截面特征、坡降、流量、沉积负载、地理位置、发育阶段等), 有多种河型划分方案。本文结合水下分流河道现代沉积研究方法的特点与优势, 采用目前普遍接受的地貌形态分类方案, 尤其强调的是: 依据遥感信息(卫星图像)确认已客观存在、可观察、可证实(而不是推测)的水下分流河道类型, 并证实了水下分流河道不只存在顺直型一种, 还存在多种类型, 并将其分为3类8亚类河型。

2.1 单河道型(I)

2.1.1 顺直型水下分流河道(I 1)

河流注入蓄水盆地后, 水下分流河道呈顺直型(弯曲度  $S < 1.1$ )单河道向前延伸。其又可细分为:

(1)典型增宽顺直型(I 1a)。河流注入蓄水盆地后, 水下分流河道呈顺直型但向盆明显逐渐加宽。八双线河口(江苏射阳临海镇东)为典型实例(图4a)。

该水下分流河道模式为: ①典型垂岸直线型。②河道宽度与垂岸距离向海呈明显分段加速变宽规律(图3), 可分为4段, 即陆上河道带近等宽段, 342.9 m长河段保持约34.3 m河宽, 增宽率为0 m/100 m; 高低水位间过渡带极缓增宽段, 794.2 m长河段宽度由34.3 m增加至48.6 m, 增宽率为1.8 m/100 m; 近岸浅水带较快增宽段, 297.1 m长河段宽度由48.6 m增加至69.6 m, 增宽率为6.7 m/100 m; 中岸中等水深带快速增宽段, 702.8 m长河段宽度由69.6 m增加至160.0 m, 增宽率为13.0 m/100 m。③水下分流河道延伸长度 > 1 000 m。④远岸河道

能弱、粒细、砂薄。上述河道宽度及延伸长度据大比例尺卫星图像(图 4a)测取获得。

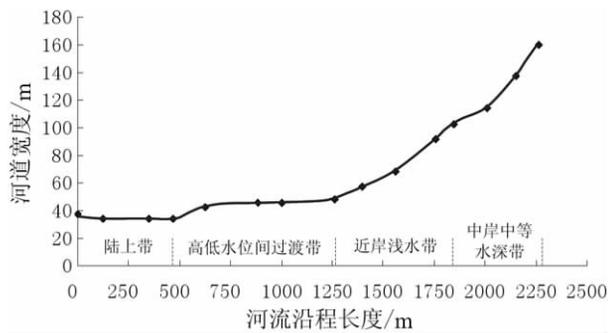


图 3 增宽顺直型水下分流河道沿程长度与河道宽度关系图  
Fig. 3 The relationship between the length and width of subaqueous channel about increasing-width towards basin and straight river  
江苏 射阳 临海镇东 八双线河口。

影响因素:①河口位置、相对(地貌倾向、海浪方向)注入方向、射流方式;②水下分流河道瞬时长度与相对河能(河能、浪能、河道限定性变化、河水惯性、海水阻力及顶托)成正比,与海底坡度及水深成反比;③水下分流河道瞬时宽度与距岸距离成正比(图 3),与海底坡度及水深成正比。

形成机理:①闸控垂岸直线射流(闸距岸 1 814 m 处)。②直线射流能量为上游及六级垂岸递减台阶地貌入海的势能、河水惯性。③河道限定性变化(陆上的限定性→近岸水下的半限定性→中岸水下的非限定性河道)、河水惯性、海水阻力及顶托、海底渐深是河宽向海呈明显分段加速变宽的主要控因。④据流量平衡原理:岸线 a、距岸 b 处水下分流河道流量相等,即:

$$Q_a = Q_b$$

$$\therefore Q_a = W_a \cdot H_a \cdot V_a; Q_b = W_b \cdot H_b \cdot V_b$$

$$\therefore V_b = \frac{W_a \cdot H_a}{W_b \cdot H_b} V_a$$

$$\text{又} \therefore W_a \cdot H_a < W_b \cdot H_b$$

$$\therefore V_b < V_a$$

式中: $Q_a$ 、 $Q_b$ 为岸线 a、距岸 b 处水下分流河道流量( $m^3/s$ ); $W_a$ 、 $W_b$ 为 a、b 处水下分流河道宽度(m); $H_a$ 、 $H_b$ 为 a、b 处水下分流河道深度(m); $V_a$ 、 $V_b$ 为 a、b 处水下河流流速(m/s)。

由于远岸水下河流流速减低,致使沉积粒细、砂薄。

意义:可揭示不同位置河道宽度、河宽与砂体宽度、距岸不同位置夹层宽度的规律。

(2)近等宽顺直型(I 1b)。河流注入蓄水盆地

后,水下分流河道呈近等宽顺直型。其形成机制有 3 类:①缓浅强流型,即当海底坡缓、水浅,且河能强、切蚀水底时,河宽增速减缓,近于等宽。高尚堡河口(河北 唐海 高尚堡西南)为典型实例,该河流近垂直注入渤海湾,向海延伸达 6.9 km,宽度保持约 90 m(80~100 m)(图 4b)。②堤控型,即发育水下天然堤,使水下分流河道保持近于等宽。以密西西比河三角洲西南支水下分流河道为典型实例,有堤河长:29 028 m,无堤河长:2 950 m,河宽 616~705 m,平均河宽约 660 m,天然堤宽 128~2 142 m,平均堤宽 912 m(图 4c)。③陡坡水下重力流型,即存在顺直型陡坡侵蚀谷。

### 2.1.2 低弯度型水下分流河道(I 2)

河流注入蓄水盆地后,水下分流河道呈低弯度(弯曲度 S 为 1.1~1.5)单河道向前延伸。该类型见于高低水位间过渡带及近岸浅水带,形成机制与陆上低弯度河类似,为相对低能河流注入浅水、缓坡的近岸部位形成。

新河河口(江苏 赣榆 赣马 新河村东)为典型实例(图 4d):该河流在陆上为顺直河,注入近岸极浅水后开始弯曲,且弯曲波幅加大(100 m→140 m)、河道加宽(40 m→50 m→70 m),该弯曲段延续 1 070 m 后随水体加深又变为顺直河道,该段弯曲度为 1.14。

### 2.1.3 高弯度型水下分流河道(I 3)

河流注入蓄水盆地后,水下分流河道呈高弯度(弯曲度  $S > 1.5$ )单河道向前延伸。该类型见于高低水位间过渡带及近岸浅水带,形成机制与陆上高弯度河类似,为相对低能河流注入极浅水、极缓坡的近岸部位形成。

维河河口(山东 昌邑 下营北)为典型实例(图 4e):该河流在陆上为低弯度河,轴线呈直线垂岸注入近岸极浅水后开始弯曲,且弯曲曲度、波幅(340 m→620 m→540 m→430 m)加大再减小、河道宽度变化较大(180 m→310 m→360 m→200 m→610 m→250 m→380 m),该弯曲段延续 7 010 m 后随水体加深又变为顺直河道(1 990 m 长、380 m 宽),该段弯曲度为 1.51,其中前段弯曲度为 1.57,最大弯曲度为 1.7。

### 2.1.4 转弯型水下分流河道(I 4)

河流注入蓄水盆地后,水下分流河道以单河道形式在蓄水盆地某位置发生较大角度的明显转弯。其形成机制有 4 类:(1)挡弯型(I 4a),即水下分流河道因前方有障碍物阻挡而转弯。如涨蒙河口(山

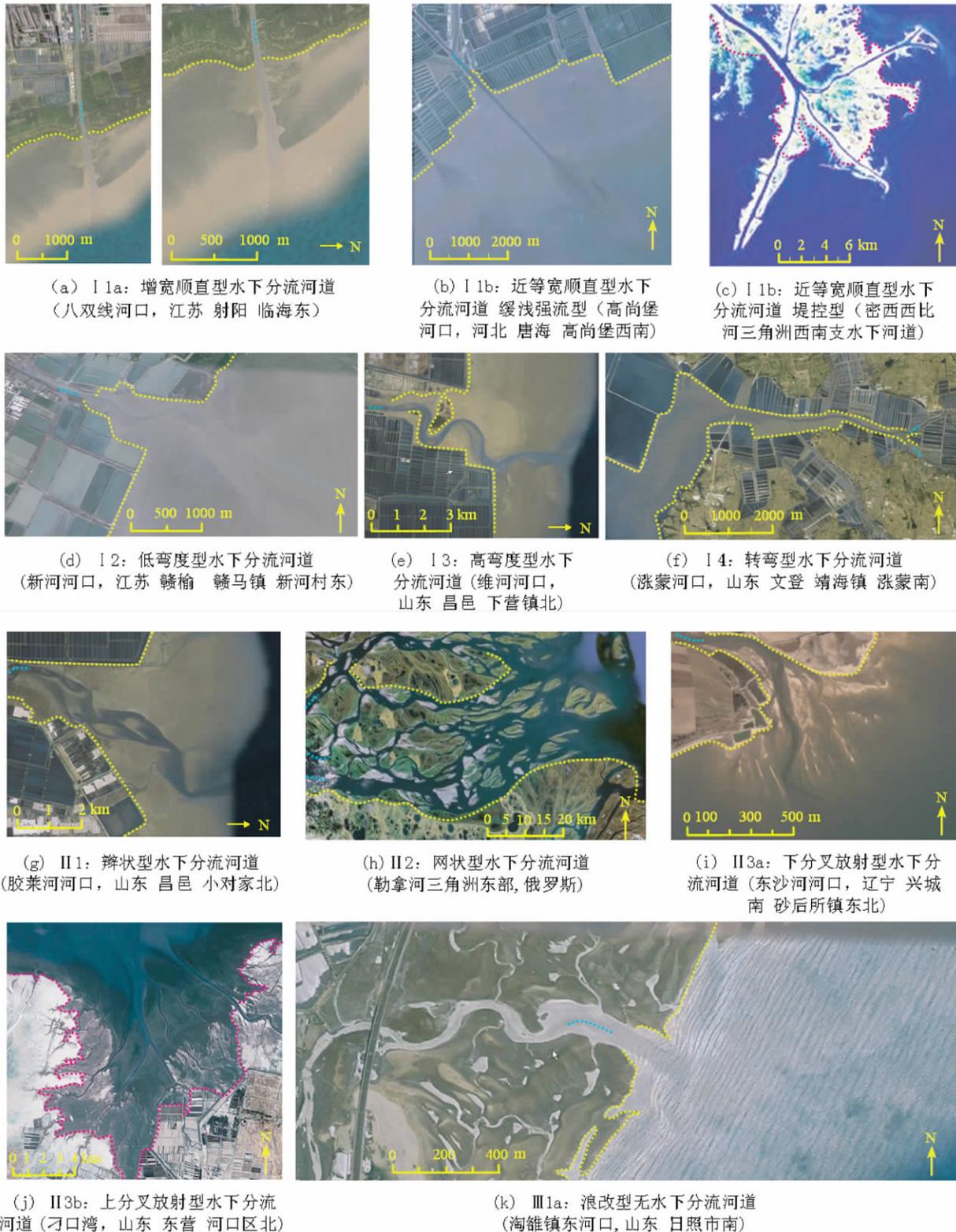


图 4 现代水下分流河道河流类型及划分

Fig. 4 Channel pattern and classification of present subaqueous channel

东文登 靖海 涨蒙南)为典型实例,其由 6 支流汇集 ( I 4b),即当波浪斜交岸线、且能量高时,水下分流河道在离岸一定距离后随浪发生转弯。如印度卡纳塔克邦无迪比河流呈南西向垂直海岸流向印度洋,近 90°转弯,水下河宽约 80 m(图 4f)。(2)浪弯型

至海岸处因强烈海浪作用,使其近 $90^\circ$ 角急转弯转向西北向,平行海岸流经8.2 km。(3)坡弯型(I 4c),即水下分流河道因前方水底斜坡倾向或坡度变化而随坡转弯。(4)湾弯型(I 4d),即在窄长且转弯的海/湖湾内发育的水下分流河道随海/湖湾发生转弯。如图4f中人工养殖池为自然海岸时,则构成自然弯曲海湾,即可形成湾弯型水下分流河道。

## 2.2 多河道型(II)

### 2.2.1 辫状型水下分流河道(II 1)

河流注入蓄水盆地后,水下分流河道呈辫状河型(河道分岔参数 $>1$ ,弯曲度 $S<1.5$ )向前延伸。该类型见于高低水位间过渡带及近岸浅水带,形成机制与陆上辫状河类似,为相对较高能河流注入浅水、中等坡度的近岸部位形成。

胶莱河口(山东昌邑小对家北)为典型实例(图4g):该河流在陆上为低辫状河,且轴线呈大弯度注入渤海莱州湾,在近岸浅水处形成辫状型水下分流河道段,该段长4 480 m,河宽变化较大(630 m $\rightarrow$ 1 150 m $\rightarrow$ 860 m),其内形成了3个心滩,其规模为(180~480)m $\times$ 2 080 m,270 m $\times$ 1 420 m,320 m $\times$ 1 560 m。

### 2.2.2 网状型水下分流河道(II 2)

河流注入蓄水盆地后,水下分流河道呈网状河型(河道分岔参数 $>1$ ,弯曲度 $S>1.5$ )向前延伸。该类型见于高低水位间过渡带及近岸浅水带,形成机制与陆上网状河类似,为相对低能河流注入浅水、缓坡度的近岸部位形成。

俄罗斯勒拿河三角洲东部近岸水下分流河道为网状型(图4h):众多河道整体交织呈网状,单河道呈弯曲状,河道宽度为180~1 090 m,以300~600 m为主,冲击岛570 m $\times$ 1 280 m~5 480 m $\times$ 5 490 m,多1 500 m $\times$ 4 000 m左右。该三角洲为特大型,沿程长达126.4 km,宽达265.4 km,沿程坡度0.13‰。水下网状河道发育的东部沿程长达97.3 km,沿程坡度0.17‰,水下网状河道发育区沿程坡度0.068‰,而其上游坡度为0.288‰。特大型三角洲充沛的水流量、缓坡度、泄流面积大是该网状型水下分流河道发育的关键因素。

### 2.2.3 分叉放射型水下分流河道(II 3)

水下分流河道分叉呈放射型,其可分为2种类型。

(1)下分叉型(II 3a)。水下分流河道向蓄水盆地方向分叉呈放射状、水下分流河道渐多、单河道变窄。

河流注入蓄水盆地后,因河道失去两侧限制,水流散开,加之蓄水盆地水体的阻力等作用,造成的水下分流河道同时分叉或改道而成。

东沙河河口(辽宁兴城南砂后所北)为典型实例(图4i):一支陆上低弯度河注入辽东湾,分成5支一级、15支二级呈下分叉放射型的水下分流河道,形成沿程680 m、宽960 m的扇形三角洲,其中水下分流河道宽70~30 m。

(2)上分叉型(II 3b)。水下分流河道向陆方向分叉呈放射状、水下分流河道渐多、单河道变窄、变浅。缺乏相应规模的陆上河流。向蓄水盆地方向河道汇流、水下分流河道渐少、单河道明显增宽。

其形成机理为潮汐回流聚水作用,为潮汐水道。

刁口湾(山东东营河口区北)为典型实例(图4j),无陆源河流的近岸水下河流系统,其长19.6 km,宽18.9 km,为五级上分叉放射型,向陆水下分流河道渐多、单河道变窄、变浅。由下部1支1 170 m宽的水下分流河道,向上五级分叉逐渐变为宽仅40 m的11支小河道。最下部为1支宽约1 170 m的河道,向上变为宽790 m、190 m的2支;前者向上变为宽520 m、200 m的2支;前者再向上变为宽210 m、210 m的2支;前者再向上变为宽70 m的2支;向上变为40 m宽,逐渐向上消失。

## 2.3 无河道型(III)

陆上分流河道向蓄水盆地方向不能延续,而无水下分流河道。按形成机制可分为2类。

(1)浪改型(III 1a),即因蓄水盆地波浪等能量较强,而将原水下分流河道重新改造,使其无法或难于识别。

淘锥镇东河口(山东日照市南)为典型实例(图4k):陆上河流入海形成水下分流河道,因波浪作用较强,被改造成席状砂。

陆上由两支21 m、23 m宽的小型河流合流为26~35 m宽、流经1 270 m后加宽为88 m,再流经435 m后入海,入海后形成水下分流河道,因波浪作用较强,被改造成席状砂。

(2)低能型(III 1b),即因陆上分流河道能量相对很低,致使其注入蓄水盆地后,没能形成或形成极短的水下分流河道。

## 3 现代水下河型频次及主次关系

前面用现代沉积方法揭示了现代水下分流河道

已客观存在的类型,但是其类型众多,哪些是较发育的主要类型?哪些是少见的次要类型?尽管其主次类型受控于形成环境,本文仍将通过现代水下分流河道类型的频次对主次类型进行探讨。

本文共对 41 个现代水下分流河道进行了研究,并按上述类型进行了分类,其结果见表 1。

表 1 现代水下分流河道河型、个数统计表  
Table 1 Statistics about channel pattern and quantity of present subaqueous channel

水下分流河道类型	现代河 流个数	河流数量 比例/%
I 1a:典型增宽顺直型	6	14.7
I 1b:近等宽顺直型	15	36.6
I 2:低弯度型	6	14.7
I 3:高弯度型	3	7.3
I 4:转弯型	1	2.4
II 1:辫状型	4	9.8
II 2:网状型	1	2.4
II 3a:下分叉放射型	3	7.3
II 3b:上分叉放射型	1	2.4
III 1:无水下分流河道型	1	2.4
合计	41	100

由此看出,顺直型水下分流河道为最常见河型,占 51.3%;其他类型较少见,依次为低弯度型(14.6%)、辫状型(9.8%)、高弯度型(7.3%)、下分叉放射型(7.3%);转弯型、网状型、上分叉放射型、无水下分流河道型最少,皆为 2.4%。且低弯度型、高弯度型、辫状型、网状型等皆发育于不同地质背景的近岸水下环境,即高低水位间过渡带及近岸浅水带。

## 4 结论

(1)目前,随着陆上河流类型及形成机制研究的深入,而对被水体淹没致使地表难于观测、现代沉积探槽难于挖掘的水下分流河道的类型研究较少,在此背景下,通过可整体且细致观察、可证实的遥感信息(卫星图像)等手段揭示已客观存在的现代水下分流河道的河型,是研究、认识水下分流河道河型的有效方法。

(2)依据遥感信息(卫星图像)确认已客观存在、

可观察、可证实(而不是推测)的水下分流河道不只存在顺直型一种,还存在多种类型,并将水下分流河道河型分为如下 3 类 8 亚类,即单河道型、多河道型、无河道型 3 类,顺直型、低弯度型、高弯度型、转弯型、辫状型、网状型、分叉放射型、无河道型 8 亚类。

(3)按蓄水盆地水深、水动力、河流能量等条件,将水下分流河道细分为四带,即高低水位间过渡带、近岸浅水带、中岸中等水深带、远岸深水带。论述了 8 亚类水下河型的特征及形成条件。

(4)通过 41 条现代水下分流河道的河型研究与统计,得出顺直型水下分流河道是最常见河型,其他类型较少见,且低弯度型、高弯度型、辫状型、网状型等皆发育于不同地质背景的近岸水下环境,即高低水位间过渡带及近岸浅水带。

(5)通过对单一无分叉水下分流河道解剖得出,随着分流河道入海/湖及离岸水深增加,由于河流能量减弱及河流限定性逐渐变差,水下分流河道呈增宽趋势,下切深度逐渐减少至消失,水下分流河道特征逐渐不明显,最终变为末端坝或席状砂。

(6)现代水下分流河道河型研究为油田地下水下分流河道类型识别提供了坚实的现代沉积依据,并将有力推动油田地下水下分流河道单砂体精细刻画、内部构型、三维非均质性及建模等研究的不断深入。

文章修改过程中,中国地质大学(北京)于兴河教授与李胜利副教授提出了宝贵的修改意见,在此表示感谢!

## 参考文献

- [1] 张兴阳,罗平,顾家裕,等.三级基准面旋回内三角洲砂体骨架模型的建立:以陕北安塞三角洲露头为例[J].沉积学报,2006,24(4):82-90.
- [2] 李秋实,李学森,张卫刚.一个典型的水下分流河道砂体展布与油气富集规律[J].西北地质,2003,36(4):68-73.
- [3] 赵长勋,姜岩,赵峰华,等.葡南油田薄层河道砂岩体分布规律及预测[J].油气地质与采收率,2009,16(3):4-10.
- [4] 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(5):880-895.
- [5] 岳延波,马洪,李慧勇.辽河滩海仙鹤地区东三段水下分流河道沉积体的地震多参数识别[J].大庆石油地质与开发,2006,25(3):97-100.
- [6] 范军侠,梁锋,田永.海南地区东三段水下分流河道砂体的识别与预测[J].地球物理学进展,2007,22(5):1527-1532.
- [7] 于兴河,李胜利,赵舒,等.河流相油气储层的井震结合相

- 控随机建模约束方法[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 33-41.
- [8] van den Bergh G D, van Weering T C E, Boels J F, et al. Acoustical facies analysis at the Ba Lat delta front (Red River Delta, North Vietnam)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29: 532-544.
- [9] 马世忠, 王一博, 崔义, 等. 油气区水下分流河道内部建筑结构模式的建立[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(5): 1-3.
- [10] 马世忠, 孙雨, 范广娟, 等. 地下曲流河道单砂体内部薄夹层建筑结构研究方法[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 632-639.
- [11] Cornel O, Janok P B. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76: 212-233.
- [12] Nichols G J, Fisher J A. Processes, facies and architecture of fluvial distributary system deposits [J]. Sedimentary Geology, 2007, 195: 75-90.
- [13] 阎海龙, 孙卫. 水下分流河道砂体中夹层的识别及定量分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2006, 36(1): 133-136.
- [14] 夏文臣, 雷建喜, 王超勇. 鄂尔多斯盆地南部延安组水下分流河道型湖泊三角洲体系的沉积构成[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1991, 16(2): 219-228.
- [15] 王靖泰, 郭蓄民, 徐世远, 等. 全新世长江三角洲的发育[J]. 地质学报, 1981, 61(1): 67-81.
- [16] 汪永进, 王建, 刘金陵, 等. 东太湖全新世水下河道沉积特征及环境演变[J]. 古生物学报, 1996, 35(2): 224-233.
- [17] Vincent S, Jean L L, Jens G, et al. Morphology and recent history of the Rhone River Delta in Lake Geneva (Switzerland)[J]. Swiss Journal of Geosciences, 2010, 103(1): 33-42.
- [18] Zong Y, Huang G, Switzer A D, et al. An evolutionary model for the Holocene formation of the Pearl River delta, China [J]. The Holocene, 2009, 19: 129-142.
- [19] Mai C V, Stive J F, van Gelder P H A J M. Coastal Protection Strategies for the Red River Delta [J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25: 105-116.
- [20] Coleman J M, Roberts H H, Stone G W. Mississippi river delta: An overview[J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14: 698-716.
- [21] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 三角洲分流河道及河口坝形成过程的物理模拟[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 168-176.

## 2012年《地学前缘》征订启事

中国地质大学(北京)与北京大学出版的《地学前缘》(联订代号:5198)由天津全国非邮发报刊联合征订服务部总发行;请我刊原订户和需要订购的客户直接与天津联合征订服务部联系订购事宜。2012年订价为300元/年(全年6期,50元/期)。

联系地址:天津市大寺泉集北里别墅17号

邮政编码:300385

电 话:022-23962479,022-23973378

传 真:022-23973378

网 址:www.LHZD.com

E-mail:LHZD@public.tpt.tj.cn