

文章编号:0253-9985(2012)02-0265-12

海安凹陷曲塘、海北次凹戴南组—三垛组一段沉积特征及演化

魏祥峰¹, 张廷山¹, 梁兴², 姚秋昌², 汤兴友³

(1. 西南石油大学 资源与环境学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油 浙江油田公司, 浙江 杭州 310023;
3. 中国石油 川庆钻探工程公司 地球物理山地勘探二队, 四川 成都 610225)

摘要:通过对取心井岩心的精细观察和描述,在戴南组一段和三垛组一段共识别出11种岩相类型。根据电测曲线、录井以及岩相组合的特点,并结合区域沉积背景,研究认为戴南组一段属于辫状河三角洲沉积体系;三垛组一段属于河流沉积体系,其中下亚段为辫状河,上亚段为曲流河。戴南组一段沉积期,曲塘次凹北部断阶带以及曲塘次凹南—东斜坡带、海北次凹南—西斜坡带辫状河三角洲前缘亚相发育,水下分流河道砂体构成了辫状河三角洲前缘亚相的格架。三垛组一段下亚段沉积时期,研究区主要为辫状河河道和洪泛平原亚相沉积,河道内心滩砂体发育;上亚段沉积期演变为曲流河河道、堤岸和泛滥平原亚相沉积,河道凸岸一侧发育边滩微相。辫状河三角洲前缘水下分流河道以及辫状河心滩、曲流河边滩砂体物性较好,是研究区油气富集的有力相带。

关键词:辫状河;曲流河;辫状河三角洲;沉积特征;戴南组;三垛组;海安凹陷

中图分类号:TE112.1

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and evolution of the 1st member of Dainan Formation and the 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei Sub-sags, Hai'an Sag

Wei Xiangfeng¹, Zhang Tingshan¹, Liang Xing², Yao Qiuchang² and Tang Xingyou³

(1. Institute of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;
2. PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. No. 2 Geophysical Mountain Exploration Team, PetroChina Sichuan & Changqing Drilling Engineering Corporation, Chengdu, Sichuan 610225, China)

Abstract: Through fine core observation and description, eleven different lithofacies were recognized in the 1st member of Dainan Formation and the 1st member of Sanduo Formation. According to the characteristics of logging data and lithofacies associations, and in combination with the regional depositional environment, this paper documents that the 1st member of Dainan Formation is of braided delta sedimentary system and the 1st member of Sanduo Formation is of fluvial sedimentary system with braided-river in the lower part and meandering-river in the upper part. During the deposition of the 1st member of Dainan Formation, braided-river delta front were well developed in the northern fault terrace zone and the south-eastern slope zone of Qutang Sub-sag and the south-western slope zone of Haibei Sub-sag, and sandbodies of underwater distributary channels constitute the framework of the braided-river delta fronts at this time. During the deposition of the lower part of the 1st member of Sanduo Formation, the study area was dominated by the braided-river channel and flood plain deposits, and channel bars were well developed. During the deposition of the upper part of the 1st member of Sanduo Formation, the sedimentary subfacies changed to meandering river channel, bank and floodplain, with point bar deposits developed in the convex bank of channel. The sandbodies of underwater distributary channels, channel bar in

收稿日期:2011-09-20;修订日期:2011-12-20。

第一作者简介:魏祥峰(1984—),男,博士研究生,沉积学与储层地质学。

基金项目:四川省重点学科建设项目(SZD0414)。

braided river and point bar in meandering river have relatively good poroperm characteristics, and thus are favorable facies for hydrocarbon accumulation.

Key words: braided-river, meandering-river, braided delta, sedimentary characteristics, Dainan Formation, Sanduo Formation, Hai'an Sag

海安凹陷位于苏北盆地东台坳陷东南部,是一个晚白垩世发育起来的箕状断陷,北邻小海凸起,南接通扬隆起,西至梁垛低凸起、泰州低凸起,东与三仓低凸起相连,西北部与北西向的鼻状隆起与溱潼凹陷相隔,面积约3 200 km²^[1]。根据断裂和地层发育特征,可将海安凹陷进一步划分为孙家洼次凹、丰北次凹、富安次凹、新曹次凹、新街次凹、海北次凹、曲塘次凹和海中断隆带等8个次级构造单元^[2-3](图1a);根据构造、沉积特征,位于海安凹陷南部的曲塘次凹又可划分北部断阶带、中部深凹带、南部斜坡带、东部斜坡带等四个区带;海北次凹可划分北部斜坡带、中部深凹带、西部斜坡带、南部斜坡带以及东部斜坡带等5个区带(图1b)。海安凹陷沉积充填新生界碎屑岩,包括古近系古新统泰州组(E_1t),阜宁组(E_1f),始新统戴南组(E_2d 局部)和三垛组(E_2s),新近系盐城组(Ny),以及第四系东台组(Qd),缺失古近系渐新统(E_3)。

由于过去海安凹陷的油气勘探目的层多集中在古新统泰州组,因而研究重点也多放在该组^[4-10]。近年来,随着海安凹陷石油勘探开发与综合地质研究的深入,勘探层位由古新统泰州组逐渐拓展到始新统戴南组和三垛组。2008年,中石油浙江油田分公司在海安凹陷曲塘次凹以及海北次凹戴南组一段(E_2d^1)和三垛组一段(E_2s^1)中发

现了工业油流,展示了良好的勘探开发前景,揭开了海安凹陷油气勘探开发的新篇章。相对于泰州组,海安凹陷戴南组、三垛组的研究成果和文献资料较少,前人多把注意力集中在孢粉植物群及古生态环境^[11]、地质作用演化及油气响应^[12]、断裂形成与演化上^[3],对其沉积特征缺乏系统研究。而邻区高邮凹陷的戴南组和三垛组沉积特征研究却成果丰硕^[13-17],因此,作者在借鉴邻区研究成果的基础上,运用沉积学基本原理和方法^[18-20],针对海安凹陷曲塘次凹、海北次凹戴南组和三垛组一段的沉积微相及发育演化特征进行了深入研究,以为凹陷进一步的勘探部署和开发提供依据。

1 沉积地层

海安凹陷戴南组—三垛组一段发育于裂陷盆地成盆中期断陷阶段^[3,21]。阜宁组沉积后发生的吴堡构造运动使地壳抬升并发生大规模的水退作用,研究区在戴南组沉积期沉积了以碎屑岩与泥岩为主的河湖相沉积物,但由于戴南末期真武运动的影响,本区戴南组剥蚀严重,在曲塘、海北次凹内戴南组二段(E_2d^2)完全缺失,仅钻遇戴南组一段,厚度一般为0~100 m,岩性由下向上总体构成由粗到细的正旋回序列。下部为灰色、深灰色、

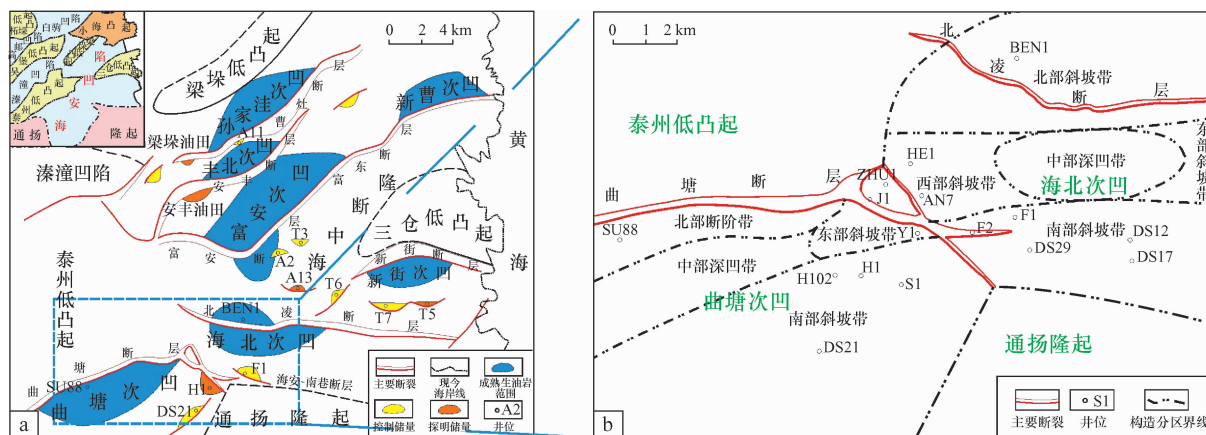


图1 海安凹陷曲塘、海北次凹位置及构造区划

Fig. 1 Location and structure division of Qutang and Haibei Sub-sags in Hai'an Sag

a. 海安凹陷; b. 曲塘、海北次凹

浅棕色含砾砂岩、粉-细砂岩、泥质粉砂岩,上部则为灰色、深灰色泥岩(图2),研究区戴南组以吴堡不整合面与下伏阜宁组不整合接触,较易划分。三垛组一段受三垛运动的影响相对较弱,地层发育基本完全,以真武不整合面与下伏戴南组不整合接触,与上覆三垛组二段(E_2s^2)呈整合接触;根据次级沉积旋回和泥岩隔层发育特征,并结合岩性、电性特征以及古生物资料,又可将三垛组一段自上而下细分为上亚段($E_2s^{1(1)}$)和下亚段($E_2s^{1(2)}$)(图2);下亚段岩性为灰色砂砾岩、含砾砂岩、粗-细砂岩、粉砂岩与棕色、棕红色泥岩互层,砂砾岩百分含量在40%以上;上亚段岩性为棕红色、绿色泥岩夹棕色、棕灰色含砾砂岩、细砂岩、

粉砂岩,砂砾岩百分含量一般小于 20%。由于研究区戴南组二段完全缺失,因此本文中戴南组一三垛组一段仅包括戴南组一段和三垛组一段。

2 沉积环境分析

2.1 岩相类型及特征

岩相是特定的水动力条件下或能量下形成的岩石单元^[22]。它以岩石结构、构造特征为主要依据来反映沉积成因单元砂体形成过程的水动力条件,是重塑沉积环境的基本研究内容。因此,岩相的识别是研究沉积相的一个重要的方法。本文通

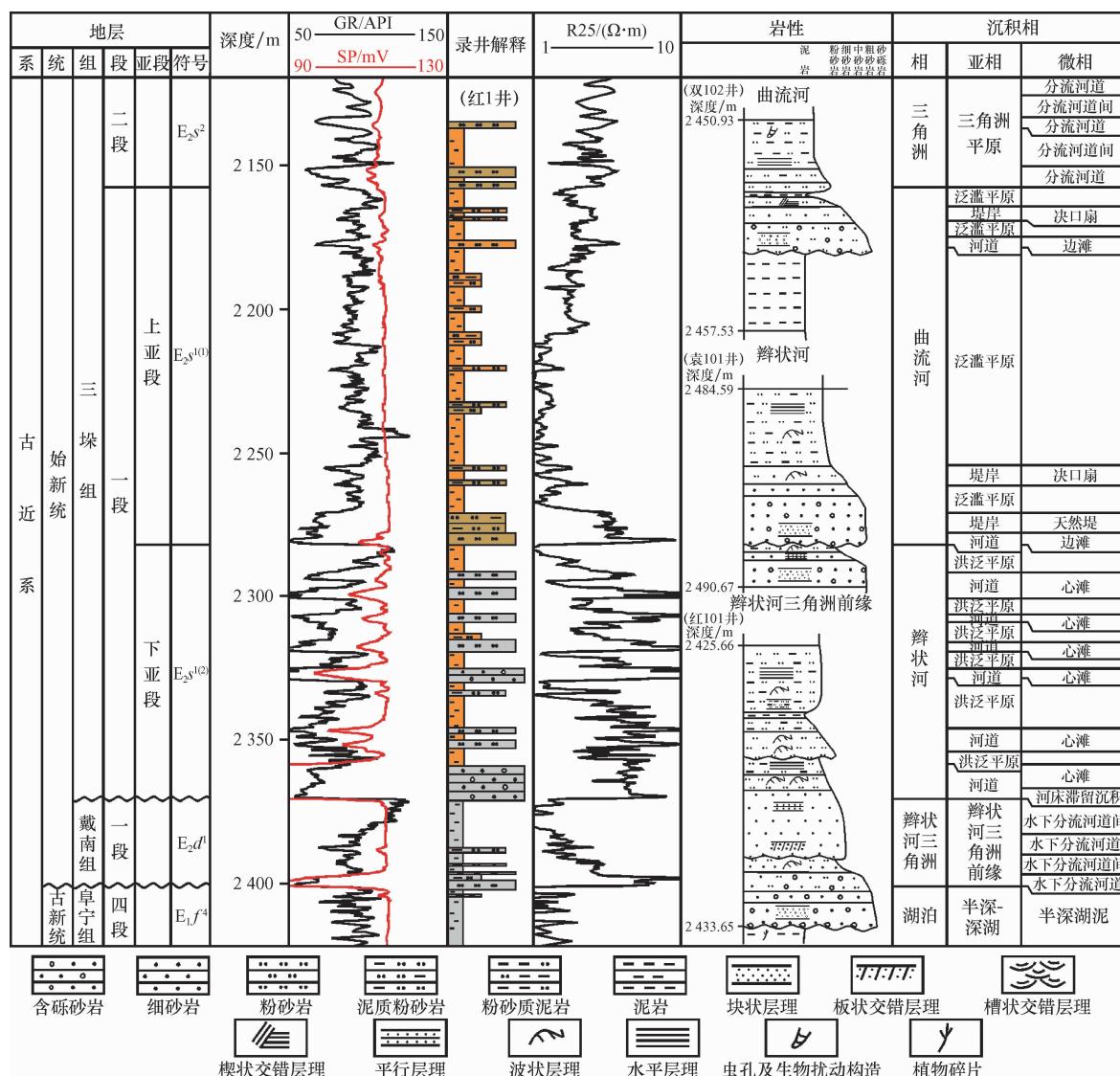


图2 曲塘、海北次凹戴南组—三垛组一段地层综合柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the 1st member of Dainan Formation and the 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei Sub-sags

通过对区内 6 口井岩心的观察与描述,采用 Miall 的结构要素分析法所建立的岩相类型及代码^[23-24],在戴南组—三垛组一段共划分出砾石类、砂岩类、粉砂岩类和泥岩类 4 大类、11 小类岩相类型(表 1)。

2.2 沉积相类型及特征

以岩心观察、录井和电测曲线为基础,结合研究区所处的地理位置和区域沉积背景等因素,根据沉积相识别标志以及曲塘、海北次凹戴南组—三垛组一段的岩相及岩相组合特点,在研究区戴南组—三垛组一段沉积体内共识别出辫状河、曲流河以及辫状河三角洲 3 种沉积相类型,并进一步划分出 8 种亚相、15 种微相,而每种微相都与反映它垂向沉积序列的岩相组合相对应,并在测井曲线上有一定的响应特征(表 2)。

2.2.1 辫状河

辫状河通常发育在坡度较陡、近物源、有充足物源供给环境下^[18-20]。曲塘、海北次凹辫状河相

主要发育于三垛组一段下亚段沉积期,此时物源供给充足,地形高差较大,水流能量大而堆积速率快、粒度粗,故发育辫状河。通过研究,本区辫状河相可进一步划分为河道和洪泛平原亚相(表 2)。

1) 河道亚相

河道沉积物以砂砾岩、含砾中—粗砂岩和中—粗砂岩为主,是河流相中粒径最粗的,层理发育,类型丰富,底部具有明显的冲刷面。可进一步划分为河床滞留沉积和心滩微相。①河床滞留沉积:一般发育于辫状河的最底部,与下伏沉积呈冲刷接触。岩性为灰色、浅灰色砾岩、砂砾岩或含砾中—粗砂岩,砾岩成分较复杂,多为石英砾,常具叠瓦状定向排列;其岩相类型为 Gm。在垂向剖面上向上一一般都逐渐过渡为心滩,界限不易区分。沉积构造以块状层理为主,当砂质含量增多时,可形成大型槽状交错层理和板状交错层理;GR 和 SP 曲线以箱形和钟形为主,底部常出现一个异常高值,指示冲刷面(图 2)。②心滩:为辫状河沉积最

表 1 曲塘、海北次凹戴南组—三垛组一段岩相类型及特征

Table 1 Lithofacies types and features of the 1st member of Dainan Formation and the 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei Sub-sags

分类	序号	岩相代码	岩相名称	主要岩性	沉积构造	成因解释
砾石类	1	Gm	块状层理砂砾岩相	砾岩、砂砾岩、含砾中—粗砂岩	块状层理	代表强水动力条件,常出现于河道、分流河道、水下分流河道底部滞留沉积
	2	Sm	块状层理砂岩相	细—粗砂岩	块状层理	物源供给充足,快速沉积
	3	Sp	板状交错层理砂岩相	细—粗砂岩	板状交错层理	边滩、心滩、分流河道、水下分流河道
砂岩类	4	St	槽状交错层理砂岩相	细—粗砂岩	槽状交错层理	边滩、心滩、分流河道、水下分流河道充填
	5	Sh	平行层理砂岩相	细—中砂岩	平行层理	高流态,水浅流急
	6	Sw	楔状交错层理砂岩相	细砂岩	楔状交错层理	代表较强水动力条件,常与平行层理砂岩相共生
粉砂岩类	7	Fr	波状层理粉砂岩相	粉砂岩或泥质粉砂岩	波状层理	单向水流迁移形成,水动力条件弱
	8	Fh	水平层理粉砂岩相	粉砂岩或泥质粉砂岩	水平层理	物源供给不足,主要由悬浮物质缓慢垂向加积形成
	9	Fm	块状层理粉砂岩相	粉砂岩	块状层理	代表弱—中水动力条件,快速沉积
泥岩类	10	M1	暗色泥岩相	深色泥岩	泥质较纯,具水平层理或块状层理	水下分流间或前辫状河三角洲泥
	11	M2	浅色泥岩相	浅色泥岩	无明显沉积构造,可见植物碎片、生物扰动构造	泛滥平原、洪泛平原或辫状河分流河道间

注:岩相代码的大写字母代表岩性或粒度;小写字母代表其所具有的沉积构造;数字代表颜色。

表 2 曲塘、海北次凹戴南组—三垛组一段沉积微相与岩相组合对应关系

Table 2 Correlation of sedimentary microfacies with lithofacies association for the 1st member of Dainan Formation and the 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei Sub-sags

沉积相	沉积亚相	沉积微相	岩相组合	主要沉积作用方式	垂向韵律特征	测井曲线特征	砂体几何形态	
							平面	垂向
辫状河	河道	河床滞留沉积	Gm	侧向加积	无明显韵律	高幅箱形或钟形,底突变	条带状	顶平底凹透镜状
		心滩	Gm-Sm-St, Sp-Sh-Sw	垂向加积 侧向加积	渐变正韵律或均质韵律	高幅箱形或钟形,底突变,顶渐变	条带或串珠状	顶平底凹透镜状
	洪泛平原		Fr-Fh-M2, M2	漫积	无明显韵律	低幅微齿状	藕节状	透镜状
曲流河	河道	河床滞留沉积	Gm	侧向加积	无明显韵律	高幅箱形或钟形,底突变	条带状	顶平底凹透镜状
		边滩	Gm-Sm-St, Sp-Sh-Sw-Fm	侧向加积	渐变正韵律或正韵律叠置	高-中幅钟形或箱形,底突变,顶渐变	短条带状或串珠状	顶平底凹透镜状
	堤岸	天然堤	Fr-Fh-M2	垂向加积	渐变正韵律	小-中幅钟形或指状	面状	透镜状
		决口扇	Fh-Fr-Sw-Sh, Fh-Fr-Fm	垂向加积	不明显的渐变反韵律	中幅指形或齿状	舌状或扇状	透镜状
	泛滥平原		Fr-Fh-M2, M2	漫积	无明显韵律	低幅微齿状	条带状	透镜状
辫状河三角洲	辫状河三角洲平原	分流河道	Gm-Sm-St, Sp-Sh-Sw	垂向加积 侧向加积	渐变正韵律或均质韵律	高幅箱形或钟形,底突变,顶渐变	条带状或指状	顶平底凹透镜状
		分流河道间	Fr-Fh-M2, M2	漫积	无明显韵律	低幅微齿状	藕节状	透镜状
	辫状河三角洲前缘	水下分流河道	Gm-Sm-St, Sp-Sh-Fr-Fh	垂向加积 侧向加积	渐变正韵律或正韵律叠置	高-中幅钟形或箱形,底突变,顶渐变	条带状或指状	顶平底凹透镜状
		水下分流河道间	Fr-Fh-M1	漫积	无明显韵律	低幅微齿状或指状	条带状或土豆状	透镜状
		河口砂坝	Fh-Fr-Sh-Sp	前积	渐变反韵律或反韵律叠置	漏斗状	顶凸底平的板状	土豆状或椭圆状
		席状砂	M2-Fh-Fr-Sh, M2-Fm	漫积加积	渐变反韵律或均质韵律	漏斗状或指状	席状或毯状	薄层状或带状
	前辫状河三角洲	前三角洲泥	M1-Fr, Fh-M1, M1	垂向加积	无明显韵律	低幅微齿状		

重要的组成部分,岩性由灰色、灰白色、棕色含砾中-粗砂岩(图 3a)、粗砂岩、中砂岩以及少量细砂岩和粉砂岩组成,其岩相组合类型为 Gm-Sm-St, Sp-Sh-Sw;心滩多位于河床滞留沉积之上,向上过渡或突变为洪泛平原泥质沉积。底部常见冲刷面构造,下部发育块状层理(图 3a)、大-中型槽状交错层理和板状交错层理,上部发育平行层理和楔状交错层理。心滩在平面上常呈弯曲的短条带状或串珠状分布,剖面上常呈多个透镜状体叠置。单砂体厚度一般为 1~3 m,连续叠置砂体厚度一般在数十米以上。GR 和 SP 曲线呈高幅箱形或齿化箱形(图 4a)。

2) 洪泛平原亚相

在洪水期间,河水漫出主河道易形成洪泛平原沉积,常出现在辫状河旋回的上部或顶部,沉积

物主要为棕色、棕红色和紫色的泥岩或粉砂质泥岩,局部夹粉砂岩和泥质粉砂岩(图 3b)薄层,其岩相组合类型主要为 Fr-Fh-M2 或 M2。普遍发育波状层理(图 3b)和水平层理,有时富含植物化石。与下伏心滩砂体呈岩性和岩相渐变关系而构成下粗上细的“二元结构”,但由于河道的冲刷侵蚀,保留下来的厚度一般不大,甚至全部被侵蚀带走,其分布范围和厚度远小于曲流河平原中的泛滥平原。GR 曲线为典型的低幅平直或微齿化平直形(图 4b)。

2.2.2 曲流河

曲塘、海北次凹曲流河相主要发育于三垛组一段上亚段沉积期。相对下亚段沉积期,上亚段沉积期的河流趋于稳定,河流的水动力及流量相

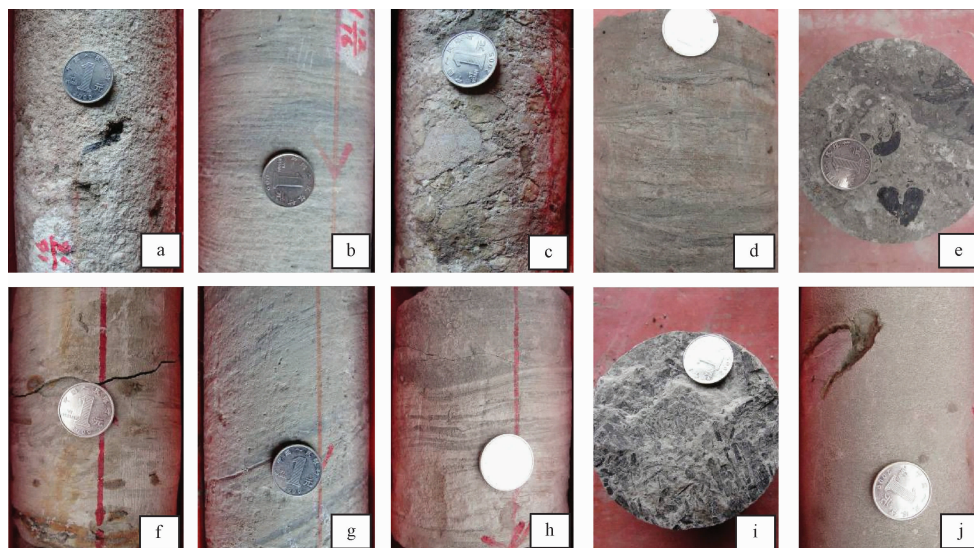


图3 曲塘、海北次戴南组一三垛组一段岩心沉积特征

Fig. 3 Core-derived sedimentary features of the 1st member of Dainan Formation and the 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei Sub-sags

- a. 辫状河河道灰白色含砾粗砂岩,块状层理,袁101井,垛一段,2 490.6 m; b. 辫状河洪泛平原浅灰色泥质粉砂岩,发育波状层理,袁101井,垛一段,2 489.4 m; c. 曲流河河道滞留沉积灰色砂砾岩,块状层理,双102井,垛一段,2 454.5 m; d. 曲流河决口扇灰色粉-细砂岩夹薄层泥质粉砂岩,发育小型楔状交错层理,波状层理,双102井,垛一段,2 453.5 m; e. 曲流河泛滥平原灰色粉砂质泥岩,发育虫孔及生物扰动构造,双102井,垛一段,2 451.3 m; f. 辫状河三角洲前缘浅灰色粉砂岩,底部为含砾不等粒砂岩,底部见冲刷面,中上部发育沙纹层理,红101井,戴一段,2 428.98 m; g. 辫状河三角洲前缘浅灰绿色粉砂岩,发育平行层理,红101井,戴一段,2 429.7 m; h. 辫状河三角洲前缘浅灰色粉砂岩,发育波状层理,红101井,戴一段,2 428.5 m; i. 辫状河三角洲前缘灰绿色泥质粉砂岩夹薄层泥岩,泥岩中富含植物碎片,袁101井,戴一段,2 544.3 m; j. 辫状河三角洲前缘灰色泥质粉砂岩,发育块状层理,红101井,戴一段,2 427.5 m

对减小,携带能力变差,沉积物渐渐地由砂质变为泥质,泛滥平原发育,最终由下亚段沉积期的辫状河衍变为上亚段沉积期的曲流河。通过研究,本区曲流河相可进一步划分为河道、堤岸以及泛滥平原亚相(表2)。

1) 河道亚相

河道亚相可划分为河床滞留沉积和边滩等沉积微相。①河床滞留沉积:其岩性主要为浅灰色、棕色的砂砾岩(图3c)和含砾中-粗砂岩,岩相类型为Gm,砾石成分主要为泥砾和石英砾,分选和磨圆差,局部砾石呈定向排列,底部发育冲刷面,沉积构造以块状层理为主(图3c)。常与下伏沉积呈突变接触,与上覆边滩微相沉积呈渐变接触。GR曲线常表现为高幅度齿化或微齿钟形,电阻率曲线也呈现高幅度的齿化钟形特征。②边滩:是河床侧向迁移作用的产物,为曲流河沉积中最重要的微相。岩石粒度从粗砂逐渐过渡到粉砂,以中砂岩和细砂岩为主,砂岩中常含泥砾,其岩相组合类型为Gm-Sm-St, Sp-Sh-Sw-Fm。沉积构造类型

多样,以槽状交错层理、板状交错层理和平行层理为主,有时见楔状交错层理和块状层理,自下向上具有层理规模变小、粒度有粗变细的正韵律。GR和SP曲线呈齿化箱形或钟形(图4c)。

2) 堤岸亚相

堤岸亚相进一步可划分出天然堤沉积微相和决口扇沉积微相。①天然堤:以棕色、棕红色粉砂岩、泥质粉砂岩与粉砂质泥岩组成的薄互层沉积为主,粒度较边滩沉积细,比泛滥平原沉积粗,其岩相组合类型为Fr-Fh-M2。发育小型波状层理或波状层理,常含有植物碎屑或茎叶碎片,还可见少量铁质及碳屑。GR和SP曲线常表现为小-中幅钟形或指状(图4d)。②决口扇:岩性主要由细砂岩和粉砂岩组成,并夹有少量泥质粉砂岩和粉砂质泥岩(图3d),其岩相组合类型主要为Fh-Fr-Sw-Sh或Fh-Fr-Fm;细砂岩中常发育平行层理和小型楔状交错层理(图3d),粉砂岩与泥质粉砂岩发育水平层理和缓波状层理(图3d)。GR曲线多呈指状或齿状(图2)。

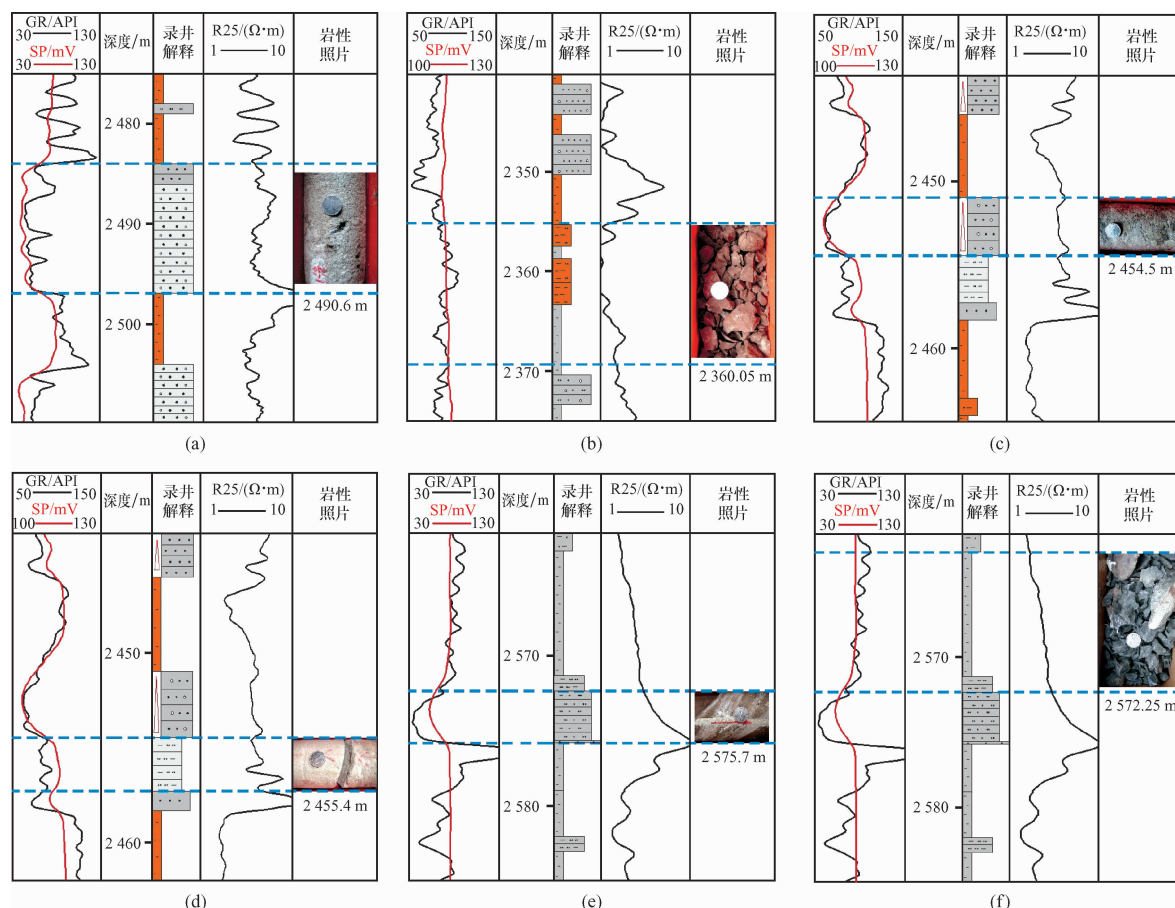


图4 曲塘、海北次凹戴南组—三垛组一段重点微相岩电关系模版

Fig. 4 Chart board showing lithology-electric property relation of the key microfacies in the 1st member of Dainan Formation and the 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei Sub-sags

a. 心滩, Y101 井; b. 洪泛平原, B101 井; c. 边滩, S102 井; d. 天然堤, S102 井; e. 水下分流河道, H1-2 井; f. 水下分流河道间, H1-21 井

3) 泛滥平原亚相

泛滥平原为洪水期漫溢出河床, 河水中携带的悬浮物质在河床两岸垂向加积的产物。主要由棕色、棕红色泥岩组成, 夹少量绿色泥岩和浅灰色粉砂质泥岩(图 3e), 其岩相组合类型主要为 Fr-Fh-M2 或 M2。发育水平层理、缓波状层理或块状层理, 富含植物根、碳屑及钙质结核, 生物扰动构造发育(图 3e)。GR 曲线呈平行于基线的低幅平直或微齿化状(图 2)。

2.2.3 辫状河三角洲

辫状河三角洲是由辫状河体系前积到停滞水体中形成的富含砂和砾石的三角洲。它是一种粗粒的三角洲, 通常形成在湖盆的短轴方向^[25], 当盆地长轴方向斜坡较窄、物源较近时也可发育。辫状河三角洲沉积特征介于正常三角洲与扇三角洲

之间, 既有正常三角洲的某些特征, 亦有扇三角洲的部分特征(如距物源近、沉积物粒度粗), 但更具有自身沉积作用的显著特点^[8, 10, 26-27]。戴南组一段沉积期曲塘次凹和海北次凹处于整体拉伸断陷阶段, 地形高差大, 辫状河三角洲发育。可识别出辫状河三角洲前缘亚相和前辫状河三角洲亚相, 三角洲平原亚相不发育(表 2)。

1) 辫状河三角洲平原亚相

辫状河三角洲平原亚相由分流河道和分流河道间等微相组成。①分流河道, 岩性以浅灰色砂砾岩、含砾砂岩、含砾中-粗砂岩和粗-细砂岩为主, 有时顶部可见粉砂岩。其岩相组合类型 Gm-Sm-St, Sp-Sh-Sw。砾石呈次棱角-次圆状, 并有一定规律的定向排列。沉积构造以块状层理、大型槽状交错层理和板状交错层理为主, 上部可见平行层理和楔状交错层理, 砂体底部具有冲刷面。

SP 曲线负异常明显,呈箱形或钟形;电阻率曲线表现为高值钟形或箱形底部具有明显的突变接触。

②分流河道间,沉积物主要为棕色、褐色的泥岩或粉砂质泥岩,局部夹粉砂岩和泥质粉砂岩薄层,其岩相组合类型主要为 Fr-Fh-M2 或 M2。发育水平层理、缓波状层理或块状层理,GR 曲线呈平行于基线的低幅平直或微齿化状。

2) 辫状河三角洲前缘亚相

辫状三角洲前缘亚相主要发育有水下分流河道、水下分流河道间和河口砂坝和席状砂等微相。

①水下分流河道:沉积物粒度相对较粗,底冲刷面上多见砾石层(图 3f),自下而上由灰色、灰白色含砾中-粗砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩等组成,显示下粗上细的变化特征。主体岩性为中、细粒砂岩,其岩相组合类型为 Gm-Sm-St, Sp-Sh-Fr-Fh。单层厚度为 3~8 m,常发育块状层理、大-中型板状交错层理、槽状交错层理和平行层理(图 3g),在粉砂岩中见沙纹层理(图 3f)、波状层理(图 3h)和水平层理。SP 曲线常呈明显负异常的箱形或钟形,底部具有明显的突变接触(图 4e)。②水下分流河道间:沉积物粒度较细,岩性主要为深灰色、灰色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩,砂泥岩呈薄互层出现,其岩相组合类型为 Fr-Fh-M1。沉积构造主要为小型波状层理和水平层理,沿层面分布较多的植物碎屑(图 3i)。GR 和 SP 曲线呈平行于基线的低幅平直或微齿化状(图 4f)。③河口砂坝:由下往上岩性由泥质粉砂岩-粉砂岩-细砂岩组成,其岩相组合类型为 Fh-Fr-Sh-Sp;由于波浪的淘洗作用,颗粒分选好,磨圆好到中等;底部的泥质粉砂岩发育平行层理,下部的粉砂岩和上部的细砂岩主要发育平行层理和低角度的小型板状交错层理。SP 曲线呈中-高幅度漏斗形。④席状砂:多以细砂岩、粉砂岩与泥岩的薄互层出现,其岩相组合类型主要为 M2-Fh-Fr-Sh 或 M2-Fm;常呈反韵律或均质韵律结构,横向延伸远,分布范围广,但厚度一般较薄,为 1~4 m;主要发育水平层理、小型波状层理和块状层理(图 3j)。

3) 前辫状三角洲亚相

前辫状三角洲位于辫状三角洲前缘末端前方,水体相对较深,主要为前三角洲泥微相沉积,岩性为深灰色泥岩和粉砂质泥岩,有时可夹有薄层泥质粉砂岩和粉砂岩,其岩相组合类型主要为 M1-Fr, Fh-M1 或 M1;具水平纹理、透镜状层理和

块状层理,生物扰动构造发育。

3 沉积相展布及演化规律

曲塘、海北次凹戴南组一三垛组一段的砂体沉积类型较为简单,从戴南组一段沉积期湖体中的辫状河三角洲逐步演化为三垛组一段下亚段沉积期辫状河和三垛组一段上亚段沉积期曲流河相,由水下的还原环境过渡为陆上的氧化环境,而不同阶段的沉积特征表现各异(图 5)。

3.1 戴南组一段沉积时期

戴南组一段沉积时期为苏北地区断陷湖盆强烈断陷时期,湖盆处于温热而湿润的亚热带气候,由于盆地处于整体拉伸断陷阶段,造成地形高差大,此时曲塘、海北次凹主要接收来自通扬隆起和泰州低凸起两侧物源的沉积物。这决定了研究区戴南一期总体表现为曲塘次凹北部断阶带辫状河三角洲—曲塘中部深凹带、海北次凹中部深凹带浅湖—曲塘次凹南—东斜坡带、海北次凹南—西斜坡带辫状河三角洲的沉积格局(图 5,图 6)。

该时期曲塘次凹北部断阶带物源主要来自曲塘断层上升盘的泰州低凸起。泰州低凸起物源区遭受风化剥蚀,在河流或季节性水流影响下,剥蚀物质被短距离搬运,在断层上升盘为辫状河沉积。进入断层下降盘区域后,辫状河开始分叉形成辫状河三角洲,并呈朵状自北西向南东方向插入湖区,辫状河三角洲平原亚相相对不发育,仅在 SU88 井一线以北、曲塘断层以南出现,相带展布范围较窄。而在 SU88 井一线以南辫状河三角洲前缘亚相纵向延伸长,伸入浅湖腹地;水下分流河道砂体构成了前缘亚相的格架,其砂岩百分含量相对较高,在 SU88 井可达到 41.35%(图 6)。

曲塘次凹南—东斜坡带和海北次凹南—西斜坡带物源主要来自研究区南部的通扬隆起。该时期由于苏北盆地处于整体拉伸断陷,研究区南部的斜坡坡度也相对较大,物源区距湖盆水体较近,来自通扬隆起碎屑物质被水流搬运距离较短而进入湖盆堆积下来。在曲塘次凹南—东斜坡带—海北次凹南—西斜坡带地区,主要沉积的是辫状河三角洲前缘亚相水下分流河道粗粒碎屑岩,沉积的粗砂及少量砾石的分选越好,磨圆度也越好。其中 DS21, H102, S101, Y1-22, Y1-14 和 Y102 等井的砂岩百

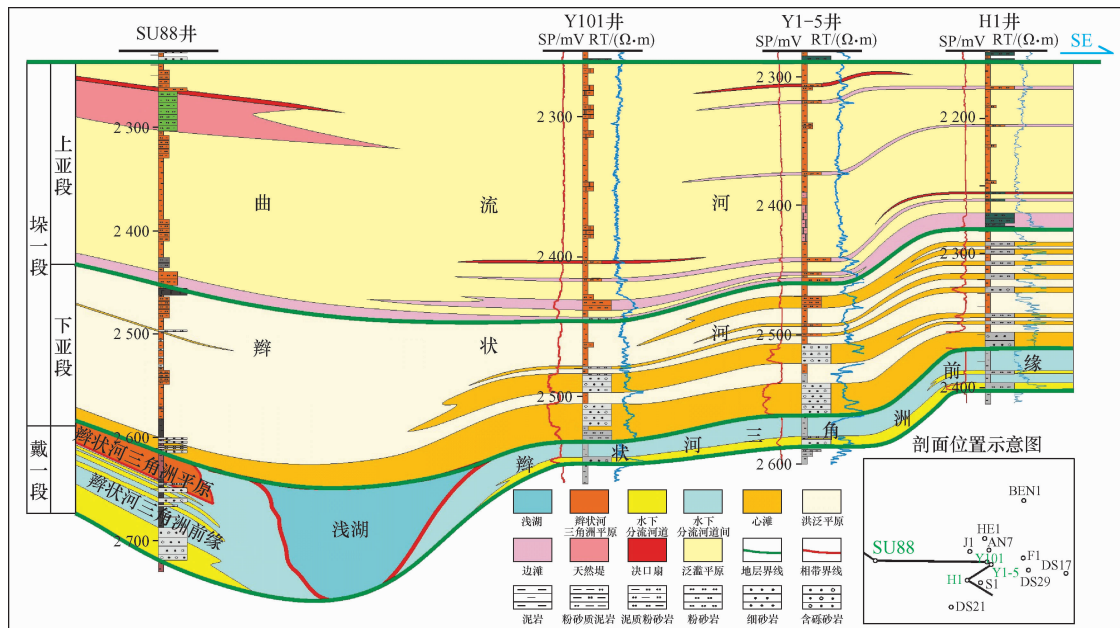


图5 曲塘、海北次凹戴南组一段沉积相剖面对比

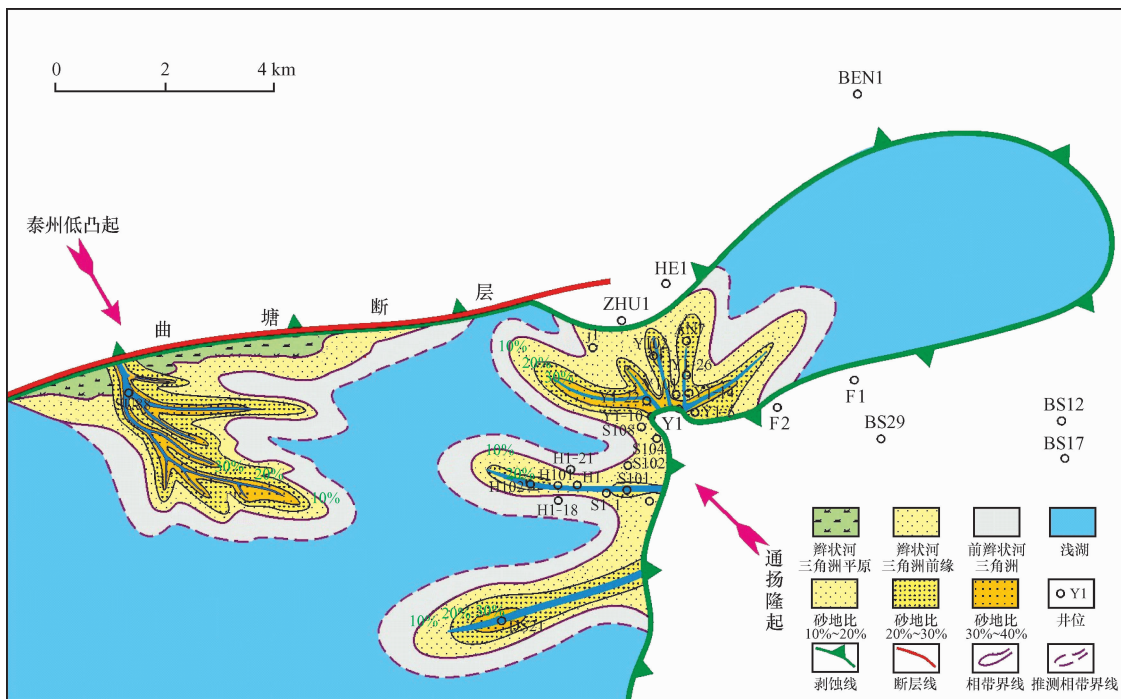
Fig. 5 Inter-well correlation of sedimentary facie for the 1st member of the Dainan Formation in Qutang and Haibei sub-sags

图6 曲塘、海北次凹戴南组一段沉积相

Fig. 6 Plane distribution of sedimentary facies of the 1st member of the Dainan Formation in Qutang and Haibei sub-sags

分含量相对较高,均超过25%,这说明这些井周围区域为水下分流主河道主要发育区(图6)。

3.2 三垛组一段沉积时期

3.2.1 三垛组一段下亚段沉积期

戴南组沉积后,戴南末期的真武运动使海安

凹陷整体抬升,并使戴南组遭受了严重剥蚀。而在三垛组一段下亚段沉积期,湖水退却,湖盆消失,海北次凹成为了此时的汇水洼地。同时由于边界断裂在真武运动期强烈活动,使得通扬隆起和泰州低凸起隆升强烈,并发生强烈的侵蚀剥削作用,这不仅造成了坡度较陡的古地形,而且为研

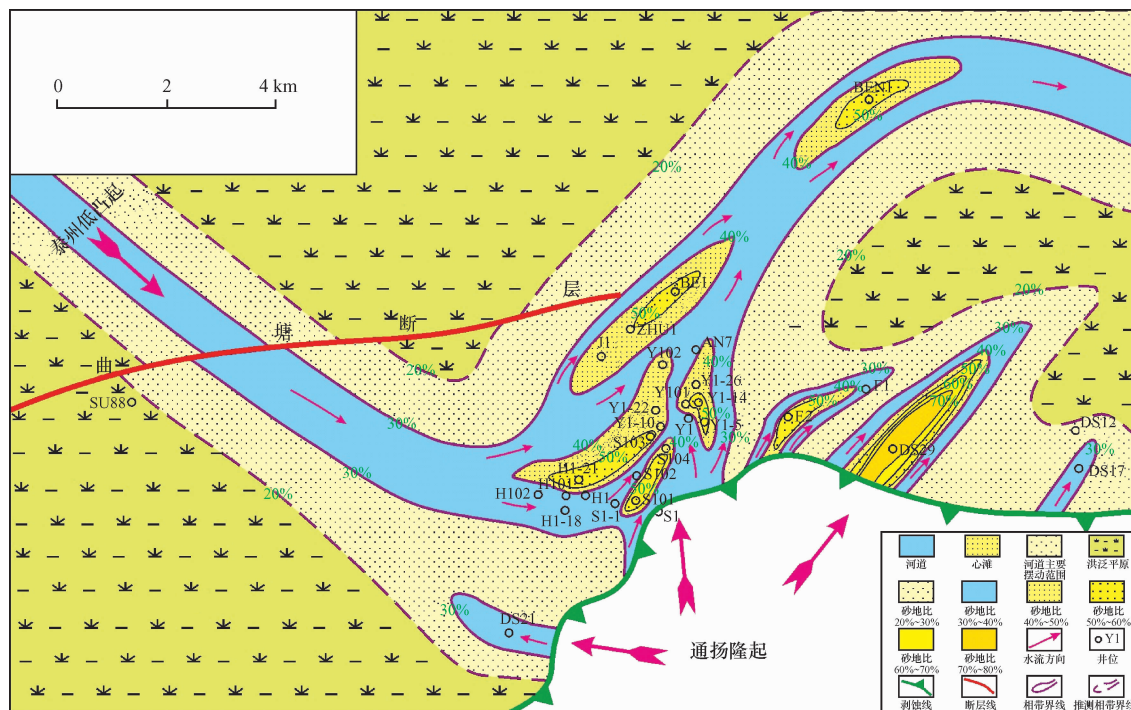


图7 曲塘、海北次凹三垛组一段下亚段沉积相

Fig.7 Plane distribution of sedimentary facies of the lower 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei sub-sags

究区提供了大量的陆源碎屑供给,因此在三垛组一段早期热沉降时形成辫状河沉积体系(图5)。辫状河河道宽且浅,平面上呈多条河道的频繁分叉汇合。来自泰州低凸起方向的主河道由西北向东南流经曲塘次凹并与来自通扬隆起的主河道汇合后,经 BEN1 井区呈近东西向流经海北次凹,其它较小的支流河道水流方向主要为西南-北东向。总体上,河道主流线附近的砂岩百分含量较高,向两侧逐渐减小。辫状河河道的砂岩百分含量均在30%以上,主河道附近 BEN1, HE1, Y1-5, Y1-14, S101, S103, H1-21, F2 和 DS29 等井的砂岩百分含量均超过50%,这些井周围发育大小不一的心滩沉积,多呈纺锤状。研究区 SU88 井以南以及 DS12 井以北的大片区域砂岩百分含量均低于20%,为洪泛平原沉积的主要发育区(图7)。

3.2.2 三垛组一段上亚段沉积期

三垛组一段上亚段沉积期,由于构造活动的减弱,盆地沉积范围向四周扩张,物源区不断后退,同时由于地形的填平补齐,坡度变缓,因此研究区广泛发育河流中下游地区典型的曲流河沉积体系(图5)。与下亚段沉积期相比,此时期的砂岩百分含量明显降低,大部分地区低于10%,垂向

上主要呈“泥包砂”序列,河漫及泛滥平原占较大比例。曲流河主河道与下亚段沉积期的辫状河主河道物源及水流方向基本一致,河道宽度小,曲率大,呈弯曲条带状展布,易发生截弯取直, SU88, S103, ZHU1, BEN1 和 DS12 等井周围均发育小型边滩沉积,多呈新月形,其砂岩百分含量均超过20%。堤岸亚相砂岩百分含量相对低,一般在5%~10%范围内,呈条带状分布于河道两侧。泛滥平原沉积发育区域与下亚段洪泛平原沉积基本一致,但其分布范围有所扩大,主要分布在研究区 SU88 井以南以及 DS29 井以北的大片区域(图8)。

4 结论

1) 在海安凹陷曲段、三垛组一段共识别出11种岩相类型。认为戴南组一段属于辫状河三角洲沉积体系;三垛组一段属于河流沉积体系,其中下亚段为辫状河,上亚段为曲流河。

2) 受西北部泰州低凸起和南部通扬隆起物源的控制,在曲塘次凹北部断阶带以及曲塘次凹南-东斜坡带、海北次凹南-西斜坡带辫状河三角洲前缘亚相发育,水下分流河道砂体构成了辫状河三角洲前缘亚相的格架。

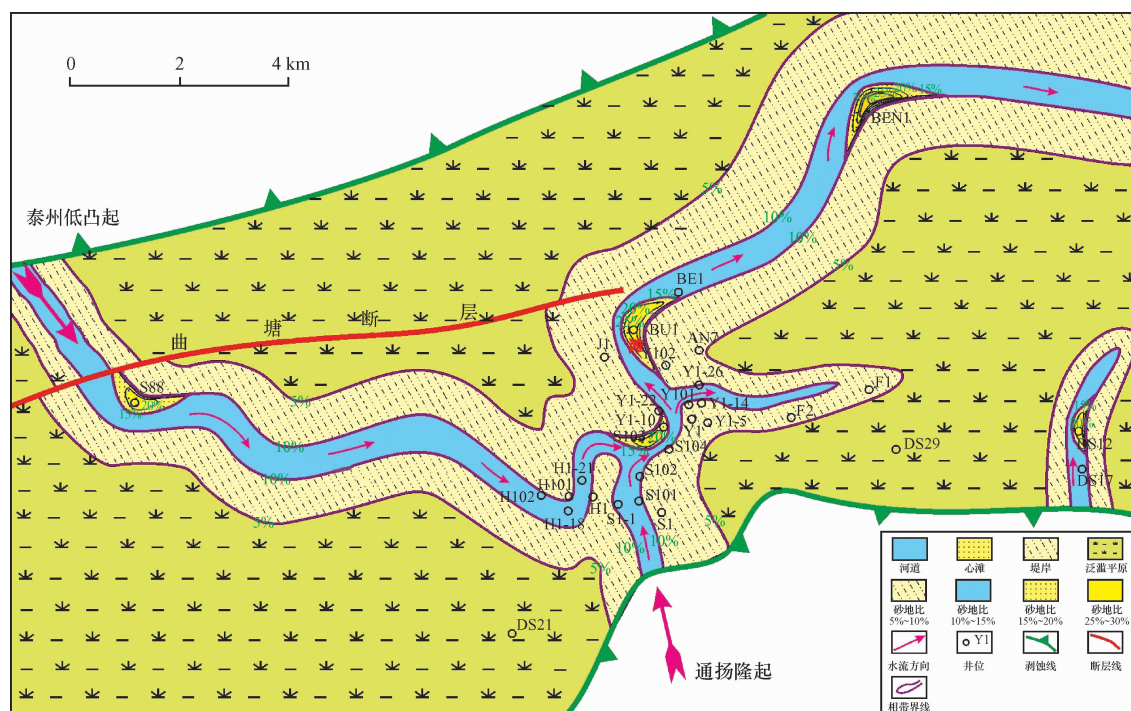


图8 曲塘、海北次凹三垛组一段上亚段沉积相

Fig. 8 Plane distribution of sedimentary facies of the upper 1st member of Sanduo Formation in Qutang and Haibei sub-sags

3) 研究区三垛组一段可划分出辫状河和曲流河两种沉积相类型。下亚段属于辫状河相,上亚段属于曲流河相。

4) 戴南组一段辫状河三角洲前缘水下分流河道以及三垛组一段心滩和边滩砂体可成为下一步岩性油气藏勘探的目标。

参考文献

- [1] 苏浙皖闽油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷8)——苏浙皖闽油气区[M]. 北京:石油工业出版社, 1992:136-138.
Redaction group for petroleum geology of oil and gas region in Jiangsu, Zhejiang, Anhui and Fujian Provinces. Petroleum geology of China (Vol 8)-oil and gas region in Jiangsu, Zhejiang, Anhui and Fujian Provinces[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992:136-138.
- [2] 成敏, 彭吴生, 赵菁, 等. 海安凹陷老井油气层复查研究[J]. 石油仪器, 2004, 18(2): 54-56.
Cheng Min, Peng Wusheng, Zhao Jing, et al. Reexamination and investigation on old oil well in Hai'an Depression region[J]. Petroleum Instruments, 2004, 18(2): 54-56.
- [3] 陈书平, 王小群, 王章青, 等. 海安凹陷上白垩统一新生界断裂形成及演化[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 760-766.
Chen Shuping, Wang Xiaoqun, Wang Zhangqing, et al. The fracture formation and its evolution from Upper Cretaceous to Cenozoic in Haian Depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 760-766.
- [4] 孙春友. 苏北盆地海安凹陷阜宁组泰州组方沸石透辉石角闪岩储层特征[J]. 石油勘探与开发, 1991, 18(2): 89-94.
Shun Chunyou. Analcime diopside hornstone reservoir characteristics, Taizhou Group and Funing Group in Hai'an Depression, Subei Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1991, 18(2): 89-94.
- [5] 黄善炳. 苏北海安凹陷泰州组角闪岩储集层特征及溶孔成因[J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(5): 94-100.
Huang Shanbing. Reservoir feature and the origin of dissolve pores in the hornfels in Taizhou Formation in Hai'an Sag, northern Jiangsu Province[J]. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(5): 94-100.
- [6] 邵先杰, 钟思瑛, 廖光明, 等. 海安凹陷安丰退积型辫状三角洲沉积模式及建筑结构分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(2): 5-7.
Shao Xianjie, Zhong Siying, Liao Guangming, et al. Sedimentary mode and formational structure analysis in Anfeng retrograding type braided delta of Hai'an Depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(2): 5-7.
- [7] 马俊芳, 廖顺舟, 廖光明, 等. 辫状三角洲沉积体系夹层分布特征研究——以海安凹陷安丰辫状三角洲为例[J]. 特种油气藏, 2006, 13(3): 22-25.
Ma Junfang, Liao Shunzhou, Liao Guangming, et al. Analysis of sedimentary system and intercalation characteristics of braided

- delta; a case study of Anfeng in Hai an Depression[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2006, 13(3): 22–25.
- [8] 徐田武, 王英民, 曾溅辉, 等. 苏北盆地高邮—海安地区晚白垩世泰州组沉积相及物源分析[J]. *地球学报*, 2007, 28(6): 627–634.
- Xu Tianwu, Wang Yingmin, Zeng Jianhui, et al. Sedimentary facies and provenance analysis of Late Cretaceous Taizhou Formation in Gaoyou-Haian Depression, north Jiangsu (Subei) Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(6): 627–634.
- [9] 徐田武, 王英民, 魏水建, 等. 苏北盆地海安凹陷下白垩统层序地层和沉积相研究[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(3): 351–355.
- Xu Tianwu, Wang Yingmin, Wei Shuijian, et al. Characteristics and evolution of Late Cretaceous sequence stratigraphy and sedimentary facies in Hai'an Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(3): 351–355.
- [10] 刘长利, 朱筱敏, 王兴明, 等. 苏北盆地海安凹陷泰州组层序地层及沉积特征[J]. *吉林大学学报*, 2010, 40(3): 519–526.
- Liu Changli, Zhu Xiaomin, Wang Xingming, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary characteristics of Taizhou Formation in Haian Depression of Subei Basin [J]. *Journal of Jilin University*, 2010, 40(3): 519–526.
- [11] 张一勇, 钱泽书. 江苏北部始新统戴南组、三垛组孢粉植物群及古生态环境[J]. *微体古生物学报*, 1992, 9(1): 1–24.
- Zhang Yi yong, Qian Zeshu. Eocene palynofloras from the Dainan and Sanduo Formations in north Jiangsu with special reference to eocene climatic changes in southeast China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1992, 9(1): 1–24.
- [12] 朱建辉, 江兴歌, 徐旭辉, 等. 苏北盆地海安凹陷曲塘—李堡地区新生代演化和油气响应评价[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(2): 138–143.
- Zhu Jianhui, Jiang Xingge, Xu Xuhui, et al. The cenozoic evolution and petroleum response estimation in the Qutang-Libao region of the Hai an Depression, the north Jiangsu Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(2): 138–143.
- [13] 薛良清, 徐怀大. 苏北盆地高邮凹陷戴南组沉积体系[J]. *石油与天然气地质*, 1988, 9(3): 297–395.
- Xue Liangqing, Xu Huaida. Sedimentary system of the Dainan Formation in Gaoyou Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 1988, 9(3): 297–395.
- [14] 袁义善, 朱履熹. 江苏高邮凹陷马家咀—黄汪地区下第三系渐新统戴南组和三垛组一段含油气砂体沉积相特征[J]. *华东师范大学学报*, 1989, (3): 65–77.
- Yuan Yishan, Zhu Luxi. The oil-gas sandbody types and sedimentary facies character of Eocene Oligocene Series Dainan Fm (Ed)-Sanduo Fm (Es) about Majiazui-Huangjue area in Gaoyou Depression Jiangsu Province [J]. *Journal of East China Normal University*, 1989, (3): 65–77.
- [15] 董荣鑫. 高邮凹陷戴南—三垛组古生物与沉积环境演变[J]. *同济大学学报*, 1999, 27(3): 366–370.
- Dong Rongxin. Evolution of paleontology and sedimentary environment in Dainan-Sanduo Formation of the Tertiary Gaoyou Depression [J]. *Journal of Tongji University*, 1999, 27(3): 366–370.
- [16] 张喜林, 朱筱敏, 钟大康, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及其对隐蔽油气藏的控制[J]. *古地理学报*, 2005, 7(2): 207–218.
- Zhang Xilin, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, et al. Sedimentary facies and its controlling on subtle oil and gas reservoirs of the Dainan Formation of Paleogene in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(2): 207–218.
- [17] 高丽坤, 林春明, 姚玉来, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及沉积演化[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 706–716.
- Gao Likun, Lin Chunming, Yao Yulai, et al. Sedimentary facies and evolution of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 706–716.
- [18] 冯增昭. 沉积岩石学(下册) [M]. 石油工业出版社, 1992: 74–285.
- Feng Zengzhao. *Sedimentary petrology (Vol 2)* [M]. Beijing: 1992: 74–285.
- [19] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 6–324.
- Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. *Sedimentary petrology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 6–324.
- [20] 姜在兴. 沉积学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 7–498.
- Jiang Zaixing. *Sedimentary* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 7–498.
- [21] 邱旭明, 刘玉瑞, 付强. 苏北盆地上白垩统—第三系层序地层与沉积演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 7–11.
- Qiu Xuming, Liu Yurui, Fu Qiang. *Stratigraphy and sedimentary evolution of upper Cretaceous-Tertiary sequence in Northern Jiangsu Basin* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 7–11.
- [22] 何镜宇, 孟祥化. 沉积岩和沉积相模式及建造 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 293–298.
- He Jingyu, Meng Xianghua. *Sedimentary rock and sedimentary facies and construction* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 293–298.
- [23] Miall A D. Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary [J]. *Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir*, 1978, 5: 597–604.
- [24] Miall A D. *Principles of sedimentary basin analysis* [M]. New York: Springer, 1984: 668.
- [25] 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, 65(4): 141–152.
- Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(4): 141–152.

- 艺,2005,(9):112-113.
- Jiang Li, Ma Hongwei, Shan Jing, et al. Polymer separate injection technology [J]. Drilling & Production Technology, 2005, (9):112-113.
- [7] 单晶, 马宏伟, 袁云, 等. 聚合物驱井下单管多层分注工艺 [J]. 石油钻采工艺, 2005, 27(3):35-37.
- Shan Jing, Ma Hongwei, Yuan Yun, et al. Study on downhole separate layer injection of polymer in multi-layer reservoirs [J]. Oil Drilling Production Technology, 2005, 27(3):35-37.
- [8] 李晶, 王耀东, 邱振伟, 等. 分层注聚管柱的研究与应用 [J]. 石油矿场机械, 2004, 33(增刊):100-102.
- Li Jing, Wang Yaodong, Qiu Zhenwei, et al. Research and application on the separated layer polymer 2 injection pipe string [J]. Oil Field Equipment, 2004, 33(supplement):100-102.
- [9] 陈章清, 李霖, 钱彧, 等. 聚合物分层注入相关问题探讨 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(3):100-103.
- Chen Zhangqing, Li Lin, Qian Yu, et al. A probe on related problems of layering polymer injection [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(3):100-103.
- [10] 王玲, 梁福民, 高瑞林, 等. 聚合物单管多层分质分压注入技术 [J]. 石油钻采工艺, 2007, 29(2):73-75.
- Wang Ling, Liang Fumin, Gao Runlin, et al. Polymer separate injection technology with separate mass and pressure [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2007, 29(2):73-75.
- [11] 裴晓含, 梁福民, 崔海清, 等. 聚合物驱偏心分质注入技术 [J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 26(5):65-66, 70.
- Pei Xiaohan, Liang Fumin, Cui Haiqing, et al. Polymer flooding eccentric quality sorting injection technology [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development In Daqing, 2006, 26(5):65-66, 70.
- [12] 陈晓红, 段宏. 聚合物单管多层分注技术原理及应用 [J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(4):53-55.
- Chen Xiaohong, Duan Hong. Principle and application of separate zone polymer flooding in multi zone reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development In Daqing, 2004, 23(4):53-55.
- [13] 赵健. 松辽盆地西斜坡泥岩地层压实规律 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4):486-492.
- Zhao Jian. Laws of mudstone compaction on the west slope of the Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4):486-492.
- [14] 陈伟, 李鹏, 彭承文, 等. 大庆油田肇35区块葡萄花油层储层特征及控制因素 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6):802-809.
- Chen Wei, Li Peng, Peng Chengwen, et al. Characteristics and controlling factors of pore features in the Putaohua oil reservoir in the B lock Zhao-35, Daqing oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):802-809.
- [15] 李军, 宋新民, 薛培华, 等. 扶余油田杨大城子组曲流河相油藏单砂体层序细分及成因 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1):119-125.
- Li Jun, Song Xinmin, Xue Peihua, et al. Hierarchical subdivision and origin of single sandbody in the reservoirs of meandering river facies in the Yangdachengzi Formation of Fuyu oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1):119-125.

(编辑 董立)

(上接第276页)

- [26] 顾家裕, 方辉, 贾进华. 塔里木盆地库车坳陷白垩系辫状河三角洲砂体成岩作用和储层特征 [J]. 沉积学报, 2001, 19(4):517-523.
- Gu Jiayu, Fang Hui, Jia Jinhua. Diagenesis and reservoir characteristics of Cretaceous braided delta sandbody in Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4):517-523.
- [27] 何幼斌, 高振中. 海南岛福山凹陷古近系流沙港组沉积相 [J]. 古地理学报, 2006, 17(3):366-368.
- He Youbin, Gao Zhengzhong. Sedimentary facies of the Liu shagang Formation of Paleogene in Fushan Sag of Hainan island [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 17(3):366-368.

(编辑 张亚雄)

(上接第295页)

- [12] Munz I A, Wangen M, Girard J P, et al. Pressure-temperature-time-composition (p-t-t-x) constraints of multiple petroleum-charges in the Hild field, Norwegian North Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21:1043-1060.
- [13] 高先志, 陈发景. 应用流体包裹体研究油气成藏期次——以柴达木盆地南八仙油田第三系储层为例 [J]. 地学前缘, 2000, 7(4):548-554.
- Gao Xianzhi, Chen Fajing. Application of fluid inclusions in oil and gas accumulation period—Nanbaxian Oilfield Qaidam Basin Tertiary reservoir for example [J]. Geoscience Frontiers, 2000, 7(4):548-554.
- [14] Kelly J, Parnell J, Chen H H. Application of fluid inclusions to studies of fractured sandstone reservoirs [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69-70:705-709.
- [15] Rossi C, Goldstein R H, Marfil R, et al. Diagenetic and oil migration history of the Kimmeridgian Ascla Formation, Maestrat Basin, Spain [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(3):287-306.

(编辑 董立)