

莺歌海盆地东方1-1气田中新统黄流组浅海多级海底扇形成机理及储层分布

李 华¹, 杨朝强², 周 伟², 何幼斌¹, 王 玉², 彭 旋², 李亚茹¹, 吕欣博¹

[1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中海石油(中国)有限公司 海南分公司, 海南 海口 570312]

摘要: 深海海底扇是沉积学领域及油气勘探的重要研究对象之一, 而浅水海底扇研究相对较少。利用岩心、钻测井、地震及分析测试等资料, 对莺歌海盆地东方1-1气田中新统黄流组浅海多级海底扇的形成机理及储层分布规律进行了研究。研究表明: ① 多级海底扇发育水道、席状砂及扇缘砂。其中, 水道岩性为中-细砂岩, 呈透镜状强反射地震特征, 波阻抗较低。席状砂岩性以细砂岩及粉砂岩为主, 平行层理发育, 多为强反射地震特征, 波阻抗低。扇缘砂以粉砂岩及泥岩最为常见, 弱反射地震特征, 波阻抗高。② 水道在研究区西北、中部及东南部发育, 整体呈NW-SE向展布, 可进一步分为3级, 构成了多级海底扇的主体。席状砂发育在水道两翼及末端。扇缘砂多发育在海底扇边缘。③ 水道及席状砂沉积为有利储层微相, 且席状砂储集性能略高于水道沉积。水道与席状砂沉积常断开不连通, 席状砂与席状砂之间多不连通或弱连通, 易形成岩性及地层圈闭。④ 多级海底扇的形成经历了早期的超临界流-临界流转换及晚期的充填-漫溢两个阶段。黄流组沉积早期, 重力流能量高, 超临界流-临界流转换可形成多级水道; 随着重力流能量降低, 流体转换作用减弱, 重力流以充填-漫溢为主。

关键词: 重力流; 超临界流; 沉积微相; 有利储层; 海底扇; 黄流组; 新近系; 莺歌海盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Genetic mechanism and reservoir distribution of shallow-marine multi-stepped submarine fans in the Miocene Huangliu Formation of Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai Basin

LI Hua¹, YANG Zhaoqiang², ZHOU Wei², HE Youbin¹, WANG Yu², PENG Xuan², LI Yaru¹, LYU Xinbo¹

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Hainan Branch, CNOOC, Haikou, Hainan 570312, China)

Abstract: Deep sea submarine fan is one of the key sedimentological subjects for oil and gas exploration, while shallow sea submarine fan is comparatively less documented. To fill up the gap, the shallow sea multi-stepped submarine fans in the Miocene Huangliu Formation of the Dongfang 1-1 gas field in the Yinggehai Basin are thoroughly investigated to determine their genetic mechanisms and distribution pattern of reservoirs by using core, drilling, seismic, lab test data, etc. The following results are obtained. ① The multi-stepped submarine fans host channels, sheet sands and distal silts, of which the channels are medium- to fine-grained sandstone with lenticular-shaped high-amplitude seismic reflections and low seismic impedance values, the sheet sands are dominantly fine-grained sandstone and siltstone with parallel beddings, showing high-amplitude seismic reflections and lower seismic impedance values (compared to channel deposits), and the distal silts are commonly mudstone and siltstone, showing low-amplitude seismic reflections and high impedance. ② The channels, forming the main parts of the fans in the northwest, middle, and southeast of the study area, are NW-SE oriented and can be divided into three steps. The sheet sands are developed at flanks and terminals of the channels. The distal silts are generally formed at the margin of the fan. ③ Both the channels and sheet sands are considered potential reservoirs with the latter being slightly higher in reservoir quality than the former. They

收稿日期: 2022-07-10; 修订日期: 2022-12-08。

第一作者简介: 李华(1984—), 男, 副教授、硕士生导师, 深水沉积及储层沉积学。E-mail: 501026@yangtzeu.edu.cn。

通讯作者简介: 何幼斌(1964—), 男, 教授、博士生导师, 沉积学及储层地质学。E-mail: 100709@yangtzeu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272113, 42272115); 湖北省自然科学基金项目(2020CFB745)。

are usually disconnected, quite ideal for the formation of lithological and stratigraphic traps. ④ The fans are suggested to have experienced an early supercritical to subcritical flow transform stage and a late filling-overbanking stage. During the early deposition of the Huangliu Formation, high-energy gravity flow led to the formation of multi-stepped channels via transformation from supercritical to subcritical flow; and during the late deposition of the Huangliu Formation, flow transformation was replaced by filling-overbanking as the gravity flow got weakened.

Key words: gravity flow, supercritical flow, sedimentary microfacies, potential reservoir, submarine fan, Huangliu Formation, Neogene, Yinggehai Basin

引用格式:李华,杨朝强,周伟,等. 莺歌海盆地东方1-1气田中新统黄流组浅海多级海底扇形成机理及储层分布[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 429-440. DOI: 10. 11743/ogg20230214.

LI Hua, YANG Zhaoqiang, ZHOU Wei, et al. Genetic mechanism and reservoir distribution of shallow-marine multi-stepped submarine fans in the Miocene Huangliu Formation of Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 429-440. DOI: 10. 11743/ogg20230214.

深海重力流在沿斜坡向下运动过程中可形成大规模的海底扇沉积^[1]。目前,圭亚那盆地、西非、东非、墨西哥湾、巴西东部及南海北部等地区深水油气勘探获得了重大突破,已成为了石油产量增长主体,使得重力流沉积形成机理及优质储层预测成为了当今沉积学及油气勘探领域研究的重点和热点之一^[2-8]。与深海重力流沉积研究相比,浅海重力流沉积研究实例相对较少^[9-11]。1991年,前人在加拿大纽芬兰东南部沙佩尔岛组中识别出了浅水重力流沉积,包括块状粉砂岩、弱递变-弱层状粉砂岩及正递变-层状细砂岩3种岩相,可能为液化流-浊流沉积^[9]。奥利维罗等在研究阿根廷始新世笔石沉积时,对浅海、高能、富有机质的浊流沉积进行了研究。该浅海重力流沉积岩相包括泥岩,泥岩及薄层砂岩互层,厚层砂岩夹泥岩3种组合。其中,厚层砂岩夹泥岩为水道沉积^[11]。总体而言,浅海海底扇沉积特征、形成过程及主控因素等还需要进一步研究。

同时,超临界流和亚临界流的演化及沉积响应是近年国际沉积学领域研究的重要内容之一^[12-17]。根据弗劳德数(Fr)可将重力流分为超临界、亚临界及临界重力流。在 $Fr=1$ 时临界状态较难保持,而超临界及亚临界重力流是常见的重力流类型^[13-14]。重力流在运动过程中,由超临界流向亚临界流转化时,流体运动速度会发生明显变化而形成水跃现象^[12]。超临界流沉积底形主要有波痕、上部/下部平坦床沙、沙丘、逆行沙丘、冲坑-流槽及周期性阶坎等^[12-17]。其中,周期性阶坎的沉积特征及形成过程研究相对较多,而其他底形,特别是冲坑-冲槽研究实例极少。

中国南海北部莺歌海盆地东方1-1气田是中国第一个海上开发的高温、高压气藏。新近系中新统黄流组一段是主要产气层段,浅海重力流沉积发育。前人

针对该区重力流沉积已进行了较多研究,包括沉积环境、重力流类型、形成过程及主控因素等^[18-22]。然而,由于地震资料分辨率较低,钻井资料较少等原因,在研究区重力流沉积微相精细刻画、海底扇形成机理及优质储层分布研究等方面仍较薄弱。通过最新研究发现,研究区发育多级海底扇,公开资料未见其形成机理及储层分布研究。因此,本文基于岩心、测井及地震等资料,结合团队最新研究成果,在中新统黄流组一段Ⅱ₆气组沉积微相精细刻画的基础上,探讨浅海多级海底扇形成机理及优质储层分布规律,提升海底扇形成认识,服务研究区气藏勘探。

1 地质概况

1.1 研究区位置

莺歌海盆地位于海南岛与印支半岛之间,是南海北部大陆架发育的一个新生代转换-伸展型含油气盆地^[21]。盆地长750 km,宽200 km,面积约 $11.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,东部以1号断裂带为界,西部为红河断裂带分支,东北侧与北部湾盆地接壤,西侧与昆崙隆起相接,可划分为莺东斜坡带、中央坳陷带、莺西斜坡带等一级构造单元(图1a)^[21-22]。中新世中-晚期,盆地热沉降及红河断裂带右行走滑导致北部抬升^[21-22],盆地西侧广阔的昆崙隆起及蓝江三角洲提供了充足的物源^[19],陆架坡折向北迁移。研究区位于莺歌海盆地中央坳陷的中北部(图1a),面积280 km²。

1.2 地层特征

莺歌海盆地自下而上发育中新统三亚组、梅山组和黄流组,上新统莺歌海组(图1c)^[18-19]。黄流组可进

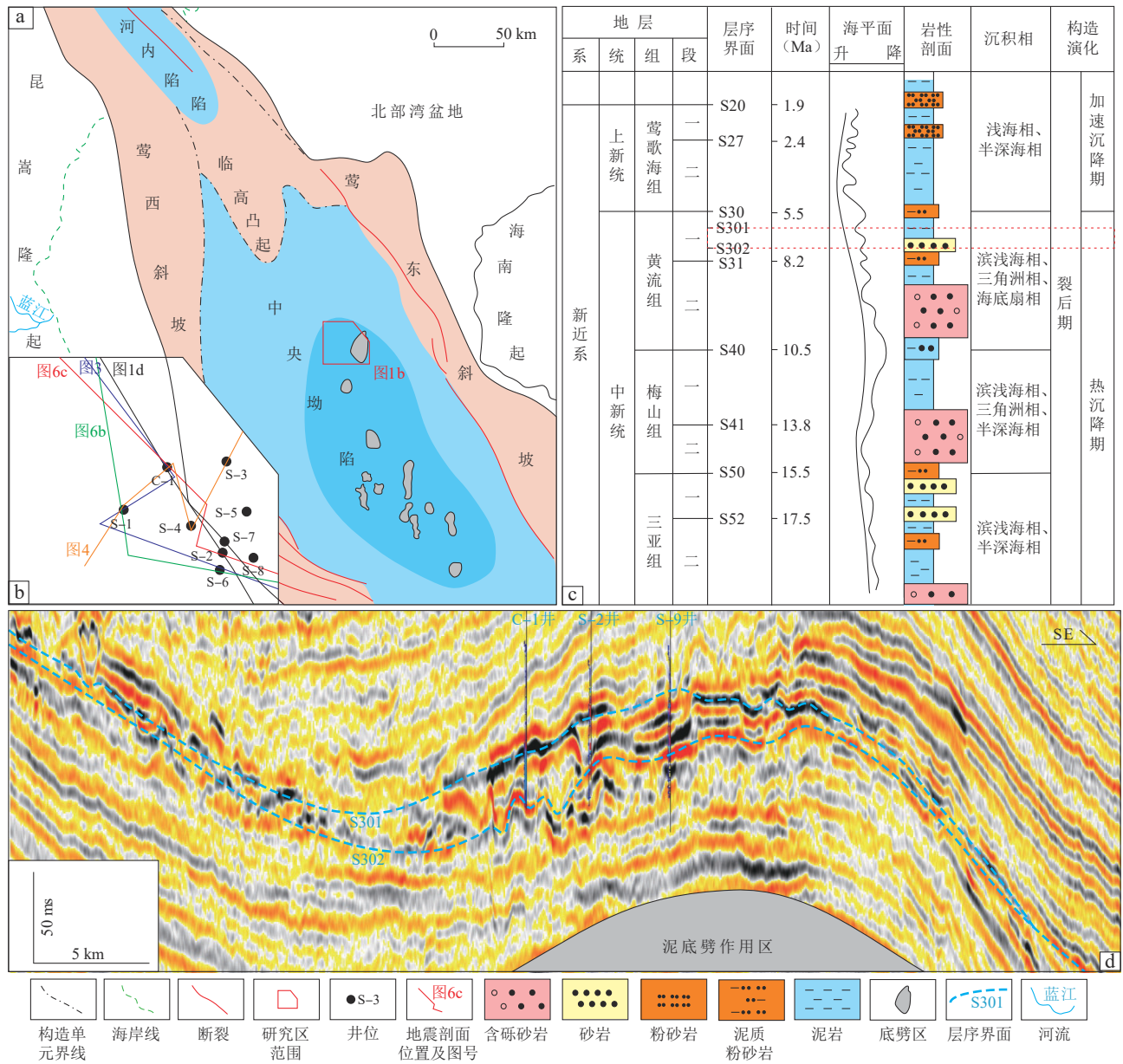


图1 东方1-1气田构造及地层特征

Fig. 1 Structural and stratigraphic characteristics of the Dongfang 1-1 gas field

a, b. 研究区位置及构造特征^[21]; c. 构造演化及地层特征^[18]; d. 地震剖面特征

一步划分为两段。其中,黄一段(黄流组一段)中部(层序界面S302与S301之间)为主要产气层之一,是本文研究目的层段,总体为浅水陆内凹陷的海底扇沉积^[18-19, 21],研究区东南部发育泥底劈(图1a, d)。

2 沉积类型及特征

2.1 沉积类型

综合地震、岩心及钻测井等资料,认为研究区发育水道、席状砂及扇缘砂3种沉积类型(表1)。

2.1.1 水道

水道呈透镜状强反射地震特征,内部多为层状充填(图2a, b)。测井相常见箱形、钟形及复合形(图2c)。岩性以中-细砂岩为主,石英含量59.5%~66.0%(平均62.8%),长石含量0.5%~7.5%(平均6.4%),岩屑含量0.5%~10.0%(平均6.7%)。粒度(粒径 Φ 值)分布在2.7~4.5,标准偏差 σ 为1.52~1.74(分选较差)。累积概率曲线以一段式或两段式为主(图2d)。地震最小振幅属性值6~9,波阻抗7 900~8 100 g/cm³·m/s(图2b, k),沉积厚度大于32 m,砂岩层序内的总厚度大于35 m(表1)。

表1 东方1-1气田黄一段重力流沉积类型及特征

Table 1 Types and main sedimentary characteristics of gravity flow deposits of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field

沉积类型	岩性	分选	地震相	测井相	厚度/m	最小振幅属性值	砂岩累计厚度/m	波阻抗/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
水道	中-细砂	差	透镜状强反射,内部层状充填	箱形、钟形、复合形	> 32	6 ~ 9	> 35	7 900 ~ 8 100
席状砂	细砂、粉砂	中等-差	席状或楔状强反射,连续性中等-好	箱形、指形、漏斗形	16 ~ 32	4 ~ 10	16 ~ 35	< 7 900
扇缘砂	粉砂	—	板状弱反射,连续性弱-中等	指形,低幅微齿	< 32	< 3	< 16	> 8 100

注:“—”为缺失。

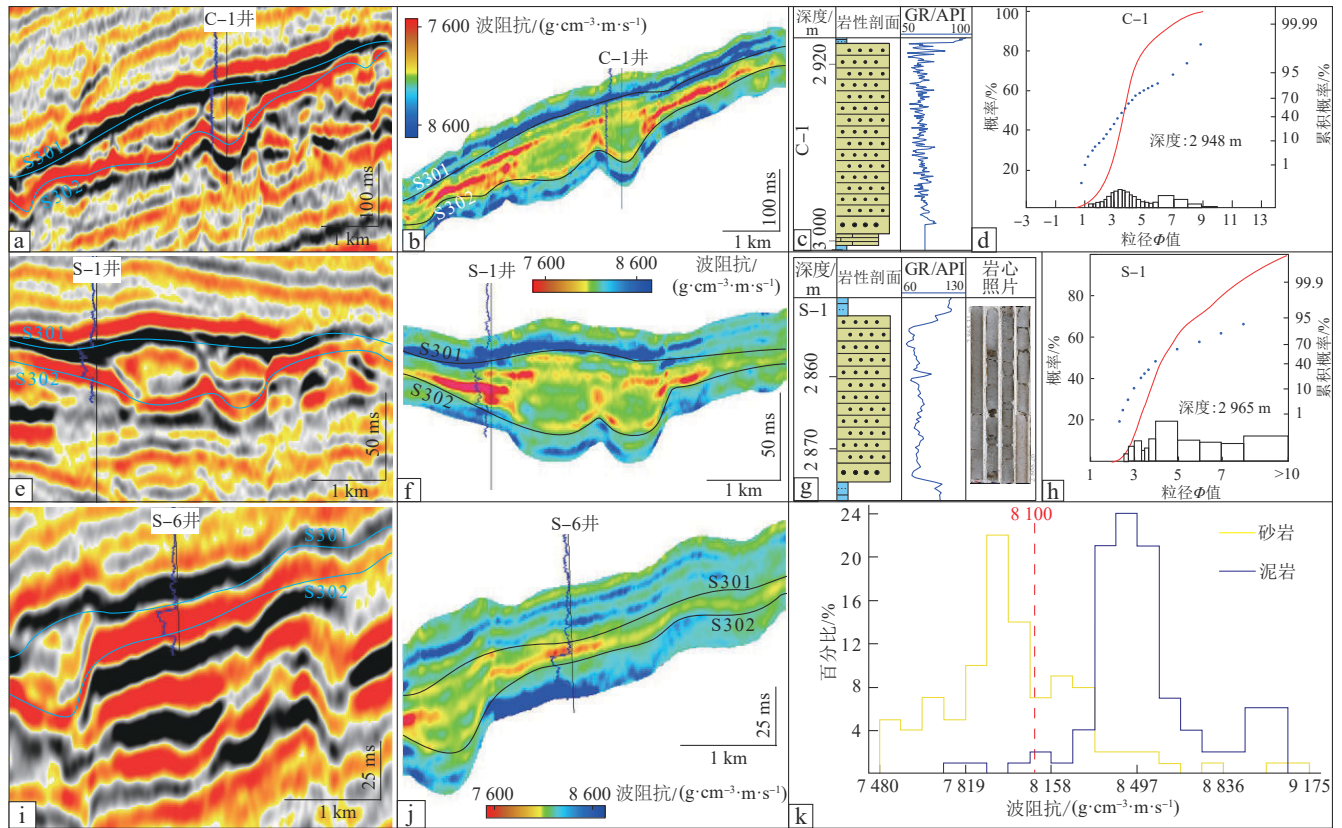


图2 东方1-1气田黄一段重力流沉积类型及特征

Fig. 2 Types and characteristics of gravity flow deposits of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field

a—d. 水道沉积特征; e—h. 席状砂沉积特征; i, j. 扇缘砂沉积特征; k. 波阻抗与岩性关系;

(a, e, i 为地震剖面特征; b, f, j 为地震反演剖面; c, g 中岩性同图1。)

2.1.2 席状砂

席状砂发育在水道两侧及末端,包含堤岸及席状砂(本文将水道两翼具有明显楔状特征的沉积体定义为堤岸沉积,其余的统称为席状砂沉积),整体呈楔状或板状连续性中等-好的强地震反射特征(图2e, f)。测井相以箱形、指状及漏斗形最为常见(图2g)。岩性以中-细砂岩及粉砂岩为主,平行层理发育(图2g),石英含量47.0%~68.0%(平均58.0%),长石3.5%~7.0%(平均6.1%),岩屑0.5%~12.0%(平均

5.8%)。颗粒最细6.18(Φ),最粗为4.23(Φ), σ 分布在1.565~2.730(分选较差-差)。累积概率曲线以二段式为主(图2h)。地震最小振幅属性值4~10,波阻抗小于7 900 $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{m}/\text{s}$ (图2f, k),沉积厚度16~32 m,砂岩累计厚度16~35 m(表1)。

2.1.3 扇缘砂

扇缘砂主要发育在海底扇边缘,岩性为粉砂岩及泥岩。地震特征为板状、连续性中等-差的弱反射(图2i, j)。地震最小振幅属性值小于3,波阻抗高于

$8\ 100\ \text{g}/\text{cm}^3\cdot\text{m}/\text{s}$ (图2k),沉积厚度小于32 m,砂岩累计厚度小于16 m(表1)。

2.2 剖面特征

2.2.1 NW-SE向沉积特征

研究区西北部水道宽1.2 km,厚度较小(约40 m),形态不对称,迎流面较陡,背流面较缓,内部多为层状充填。中部(C-1井)水道极为发育,规模较大(宽4.2 km),“U”及“W”形,中等-强反射地震特征;内部波阻抗较低,发育层状砂岩充填。东南部水道规模相对较小(宽0.85 km),呈“U”形,中等反射地震特征。水道两翼及水道间发育堤岸/席状砂,波阻抗低,岩性为砂岩夹粉砂岩。东南部边缘地区波阻抗值高,以扇缘砂最为常见(图3)。

2.2.2 SW-NE向沉积特征

研究区西南部发育小型水道-堤岸体系,水道规模较小(宽0.9 km)。中部(C-1井)水道最为发育,宽度1.7 km,呈“W”形,层状充填为主。东南部水道宽1.2 km,规模相对较小,而东部水道规模最小(宽0.3 km)。水道两翼及末端发育席状砂沉积,东南部边缘发育扇缘砂(图4)。

2.3 平面特征

研究区地层厚度、砂岩厚度、地震最小振幅属性及波阻抗反射特征具有明显的分带性。研究区北部、中部及东南部地层厚度较大,最厚可达96 m(C-1井西),西部、东部及东南部地层厚度较薄,地层较厚地区地层厚度等值线多呈条带状,中部略具发散特征(图5a)。中部砂岩厚度最厚(达82 m),东南部次之(50~60 m),外形呈条带状及席状,边缘厚度最小(图5b)。地震最小振幅属性在北部、中部(S-1井)及东部(S-3井西)高,高值区多为席状;中部(C-1井)及东南部(S-2井西)地区中等,高值区整体呈条带状(图5c)。东北部、中部、东南部波阻抗值较低,低值区常见条带状及席状分布,边缘地区较高(图5d)。

综上,研究区西北部、中部及东南部发育水道,整体呈NW-SE向展布。中部水道规模最大,东南部次之,西北部最小。水道两翼及末端发育席状砂。海底扇边缘发育扇缘砂(图6a)。另外,水道由一系列串珠状冲坑-流槽断续相连而成,可进一步分为3级(区域)(图6a)。其中,西北部发育2条水道,规模较大;中部水道规模大,数量多(由7条水道构成);东南部发育3条水道,规模相对较小。水道形态整体不对称,迎流面较陡,背流面较缓(图6b, c)。

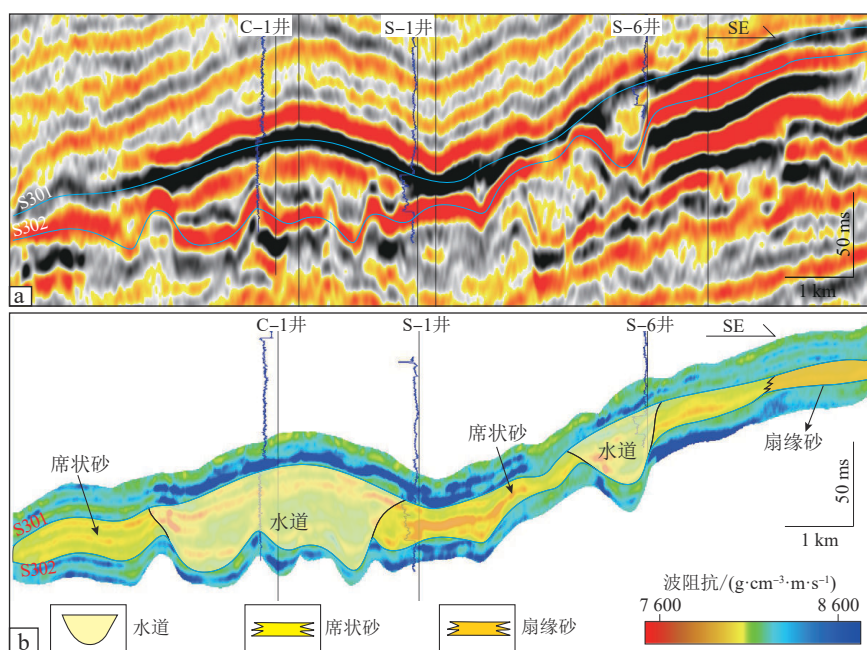


图3 东方1-1气田黄一段NW-SE向剖面沉积特征(剖面位置见图1b)

Fig. 3 Sedimentary characteristics of a NW-SE profile of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field (see Fig. 1b for the profile location)

a. 地震剖面特征;b. 地震反演剖面及沉积相特征

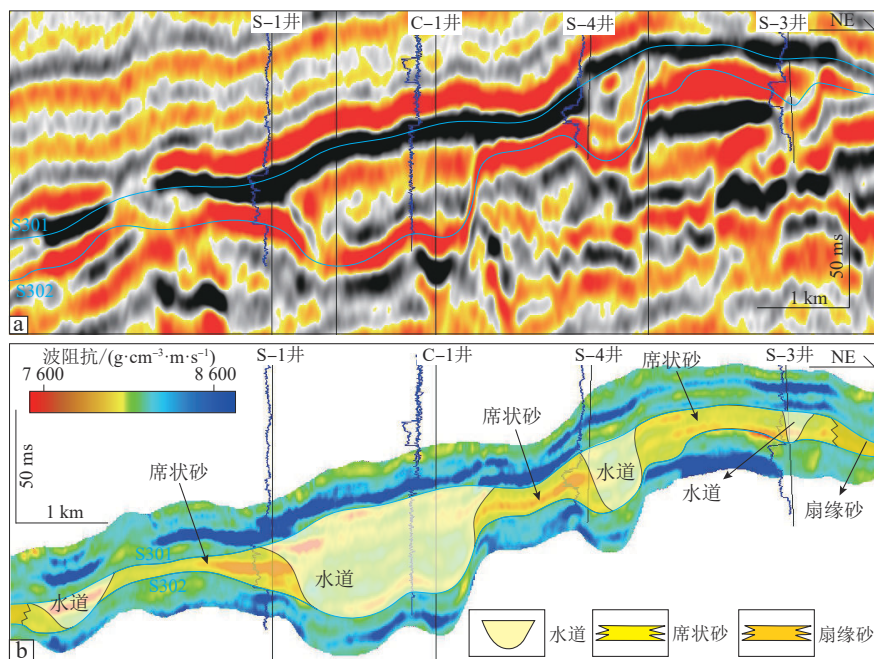


图4 东方1-1气田黄一段SW-NE向剖面沉积特征(剖面位置见图1b)

Fig. 4 Sedimentary characteristics of a SW-NE profile of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field (see Fig. 1b for the profile location)

a. 地震剖面特征;b. 地震反演剖面及沉积相特征

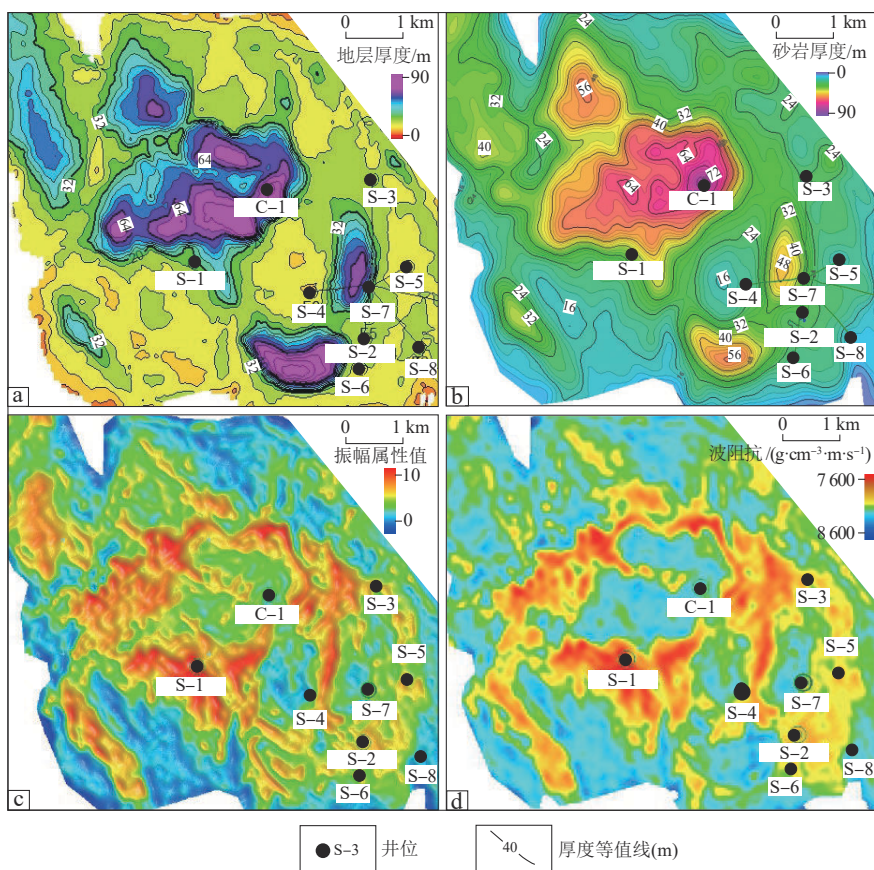


图5 东方1-1气田黄一段沉积体平面特征

Fig. 5 Maps showing distribution of sedimentary body in the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field

a. 地层厚度;b. 砂岩厚度;c. 最小振幅属性值;d. 波阻抗

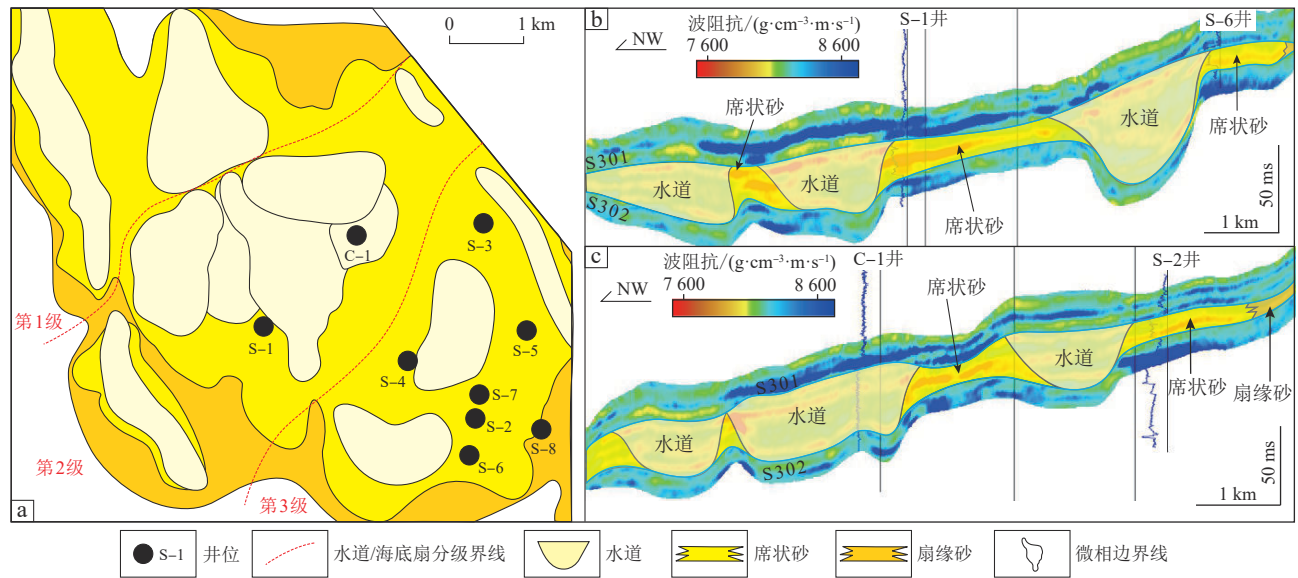


图6 东方1-1气田黄一段海底扇沉积特征

Fig. 6 Sedimentary characteristics of submarine fans of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field

a. 沉积相平面展布特征; b. 剖面1沉积相; c. 剖面2沉积相

(图6b, c剖面位置见图1b。)

3 储层特征

通过研究区9口井的孔隙类型、含砂率、孔隙度及渗透率等分析,结合储层反演及生产动态资料,对水道(典型井C-1井)及席状砂沉积(典型井S-1, S-2)的孔隙类型、物性特征等进行了对比研究。

3.1 孔隙类型

研究区孔隙类型多样,见粒间孔、长石溶孔、粒间溶孔、杂基溶孔及岩屑溶孔等。颗粒以点-短线接触为主,压实作用中等,胶结物多为(铁)方解石及黏土矿物(图7a—c)。其中,水道沉积(C-1井)粒间孔占50%,长石粒内孔及粒间溶孔占10%(图7d)。席状砂(S-1井)发育粒间孔(占57%),见石英(Q)、铁白云石(Ak)、钠长石(Ab)、菱铁矿(Ic)及片状伊蒙混层(I/S)等充填(图7b, e)。S-2井(席状砂)见粒间孔(67%)、长石粒内溶孔(12%)、粒间溶孔(9%)及铸模孔(3%)等(图7c, f)。总之,研究区孔隙以粒间孔为主。

3.2 物性特征

中部水道(C-1井)岩性为细砂岩,含砂率100.0%,孔隙度分布在16.7%~18.3%,渗透率为 $5.4 \times 10^{-3} \sim 9.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。S-1及S-2井为席状砂沉

积,岩性以细砂岩及粉砂岩为主,含砂率分别为97.2%~100.0%及61.0%~100.0%,孔隙度分别为18.3%~19.3%和18.3%~18.4%,渗透率在 $13.9 \times 10^{-3} \sim 14.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (S-1井无资料)。水道沉积岩性相对较粗,含砂率大,孔隙度及渗透率较高。席状砂岩性相对较细,含砂率较低,但孔隙度及渗透率相对水道较好。综合认为,席状砂及水道沉积都可作为有利储层,但席状砂孔隙度及渗透率略优于水道沉积(表2)。

3.3 有利储层分布

3.3.1 有利储层划分及其分布

地震反演波阻抗值与孔隙度关系统计表明,研究区波阻抗与孔隙度呈负相关(图8)。结合砂岩厚度(图5b)、地震储层反演(图5d)、沉积微相(图6a)及物性(3.1及3.2部分)等研究成果,认为研究区有利储层沉积微相为席状砂及水道沉积,岩性为中-细砂岩及粉砂岩,波阻抗低于 $8100 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$,最小振幅属性值小于10,孔隙度大于15%,渗透率高于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (表3)。以此为标准,推测研究区东南部及中部席状砂,中部及东南部水道为有利储层发育区,可进一步划分为16个砂体。其中,16号砂体为扇缘砂沉积,因岩性较细,厚度小,含砂率低,物性较差,为非有利储层,未进行细分(图9a)。

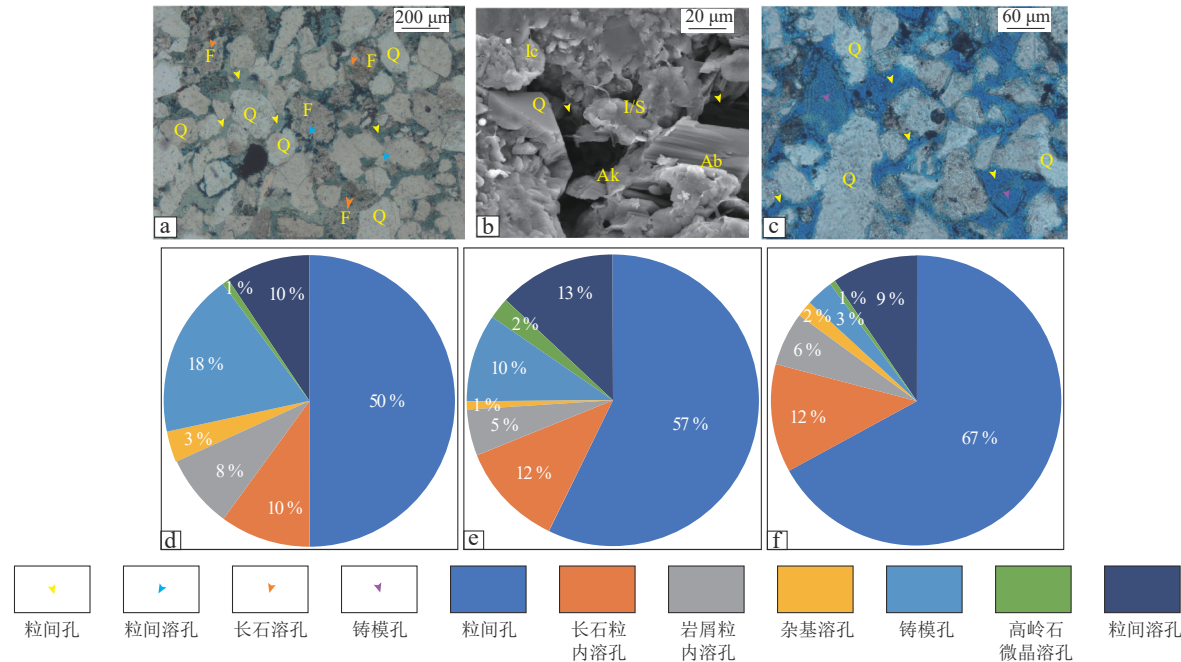


图7 东方1-1气田黄一段孔隙类型及特征

Fig. 7 Types and characteristics of pores of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field
a. 粒间孔,长石粒内溶孔,颗粒点-短线接触,C-1井,埋深2 914 m,单偏光;b. 粒间孔,石英充填,S-1井,埋深2 972 m,扫描电镜;c. 粒间孔,铸模孔, S-2井,埋深2 864 m,单偏光;d—f. 孔隙类型,d为C-1井,e为S-1井,f为S-2井

表2 东方1-1气田黄一段沉积类型及储层特征

Table 2 Sedimentary types and reservoir characteristics of the 1 st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field					
典型井	岩性	沉积类型	含砂率/%	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
C-1	细砂岩	水道	100.0	16.7 ~ 18.3	5.4 ~ 9.0
S-1	细砂岩、粉砂岩	席状砂	97.2 ~ 100.0	18.3 ~ 19.3	—
S-2	细砂岩、粉砂岩	席状砂	61.0 ~ 100.0	18.3 ~ 18.4	13.9 ~ 14.2

注:“—”为缺失。

表3 东方1-1气田黄一段有利储层划分标准

Table 3 Classification standard of potential reservoirs in the 1 st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field						
沉积微相	岩性	砂岩累计厚度/m	波阻抗/(g·cm ⁻³ ·m·s ⁻¹)	最小振幅属性值	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
水道、席状砂	中-细砂岩、粉砂岩	> 15	< 8 100	< 10	> 15	> 5

3.2.2 砂体连通性

研究区砂体数量较多(16个),规模较大,有利储层相互切割、叠置频繁,砂体连通性较为复杂。总体而言,研究区砂体连通性可分为水道与席状砂沉积之间,席状砂与席状砂沉积之间两种类型,具体特征如下。

水道与水道两翼及尾部席状砂沉积常断开不连通。主要依据为:①水道规模较大,内部以层状充填为主,与鄂尔多斯盆地西缘奥陶系水道体系较为类似^[23]。

水道内部砂体沉积与水道外席状砂断开。②C-1井(水道)下部为水层,中部为气-水同层,上部为干层及气层,而S-1井(席状砂)从下至上为水层、气-水同层、干层及气层。两口相邻井在同一小层中具有明显不同的气-水组合关系(图9b)。

席状砂(S-4井处15号砂)与席状砂(S-3井处3号砂)断开或弱连通(图9a)。主要依据为:①两套席状砂之间波阻抗断续相连,差异明显(图9c);②S-4井位于现今构造高部位,且为水层,而S-3井处于构造低部位,却为气层(图9c)。

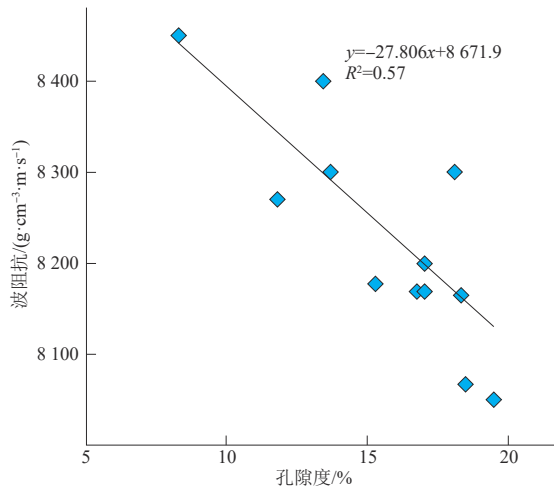


图8 东方1-1气田黄一段波阻抗与孔隙度关系

Fig. 8 Relationship between seismic wave impedance and porosity of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field

3.4 优质储层分布规律

综合沉积微相刻画、地震储层反演及储层质量研究等成果,认为研究区优质储层具有以下特征:

- 1) 席状砂具有分布面积广,厚度较大,含砂率较高,物性好等特征,为优质储层。
- 2) 水道砂一般厚度大,面积相对席状砂较小,但水道带面积仍较大,含砂率高于席状砂沉积,物性较高,为有利储层。
- 3) 水道与席状砂沉积常断开不连通,席状砂与席

状砂之间通常不连通或弱连通,易形成岩性及地层圈闭。

4 讨论

4.1 多级水道形成过程

超临界重力流的搬运及沉积作用与 Fr 密切相关^[15]。重力流沿斜坡向下运动过程中,随着能量逐渐降低,侵蚀作用减弱,而沉积作用增强。当 $Fr > 1$ 时,重力流能量较强,超临界流占主导^[12-13]。随着 Fr 不断增加,超临界重力流的水跃作用可先后形成波痕、平坦床沙、沙丘、冲坑-流槽、逆行沙丘及周期性阶坎(图10a)^[12]。其中,高 Fr 的超临界流具有极强的侵蚀能力,可形成大规模的冲坑-流槽^[12, 14, 24]。Cartigny等通过物理模拟实验认为超临界重力流在形成冲坑-流槽时,可分为超临界重力流发育期、迎流迁移增加、水跃中迁移增加稳定及超临界重力流恢复(下一期超临界流)4个阶段,而亚临界重力流侵蚀作用相对较弱,沉积作用较强,可在冲坑-流槽(水道)尾部及周缘形成席状砂沉积(图10b)^[12]。从地貌及规模来看,研究区浅海海底扇水道规模大,由一系列串珠状冲坑-流槽组成(图6),可能为超临界及亚临界重力流作用而成。

从平面上来看,研究区水道可分为3级(区域)冲坑-流槽(图10c)。第1级(区域)水道形成地区重力流能量较强,重力流以侵蚀作用为主,侵蚀面积较大。

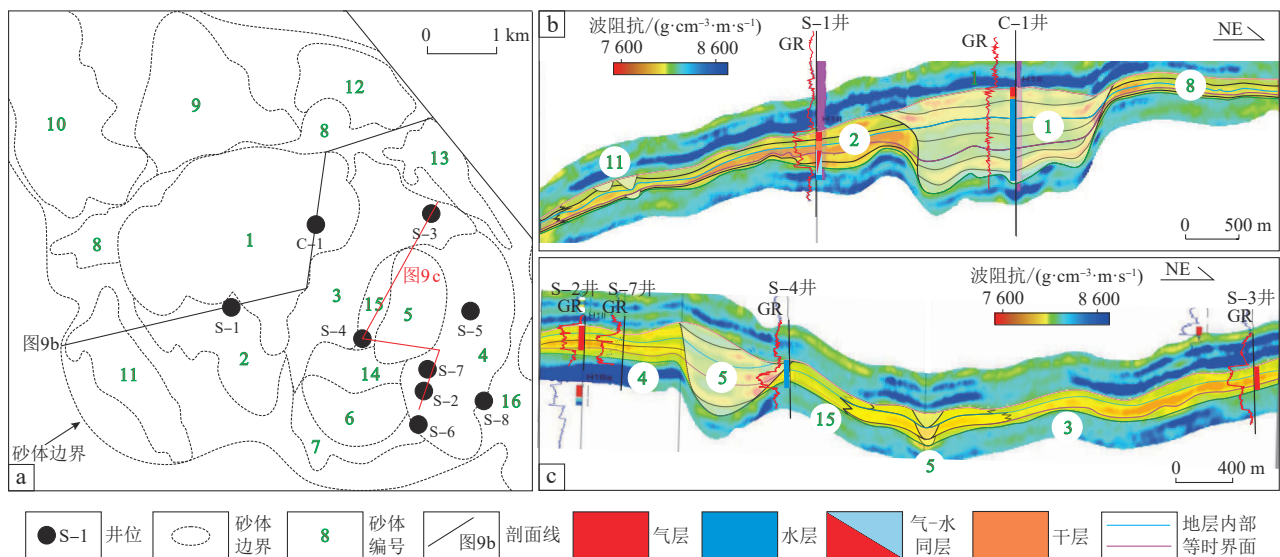


图9 东方1-1气田黄一段砂体分布及连通性

Fig. 9 Distribution and connectivity of sand bodies in the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field

a. 砂体平面分布;b. 砂体剖面1;c. 砂体剖面2

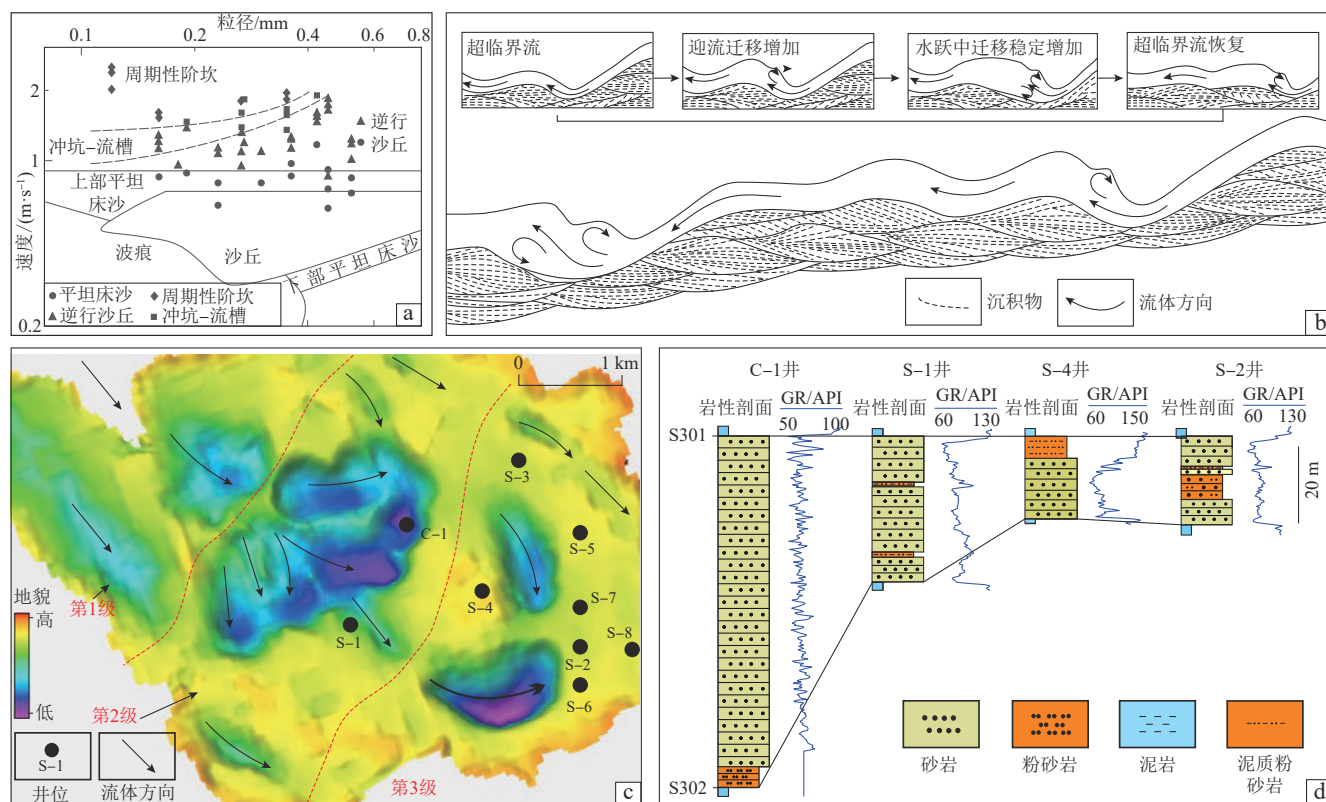


图10 东方1-1气田黄一段水道形成过程

Fig. 10 Forming process of multi-stepped channels in the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas fielda. 超临界流沉积主要底形^[12, 24]; b. 超临界流形成冲坑-流槽过程示意图^[12]; c. 研究区古地貌; d. 岩性剖面特征

第2级水道规模最大,岩性为中-细砂岩,粒度(Φ)2.7~4.5,以悬浮搬运沉积为主(图2d),分选较差。第3级水道规模相对第2级减小。同时,第2及第3级水道之间的席状砂(S-1井)岩性为细砂岩,局部夹粉砂岩,粒度(Φ)分布4.23~6.18,分选较差-差,常见跳跃及悬浮搬运(图2h),而第3级水道末端席状砂岩性变细,粉砂岩含量增多(S-2井)(图10d)。整体来看,研究区从北西向南东沉积物粒度逐渐变细,泥质含量逐渐增加,沉积物搬运方式从悬浮搬运向悬浮及跳跃搬运过渡,反映重力流性质多期变化(超临界流、亚临界流)和能量逐渐衰减过程。

4.2 海底扇形成过程

研究区多级海底扇形成与重力流的演化密切相关(图11),可进一步分为两个阶段:①超临界流-亚临界流转化形成冲坑-流槽(水道)及平坦床沙(席状砂锥形)阶段。黄一段沉积初期,相对海平面较低(图2c),重力流在陆内斜坡运动过程中,能量高,超临界重力流($Fr > 1$)占主导,可形成大规模串珠状冲坑-流槽(水道)。当 $Fr < 1$ 时,以亚临界流为主,发育席状砂沉积。②充填-漫溢沉积阶段。随着相对海平面上升(图1c),

重力流能量减弱,亚临界重力流逐渐发育。当重力流充满水道时,一部分在水道内以层状充填方式沉积下来,而另一部分可漫溢出水道,在水道末端及两翼形成席状砂沉积。当重力流能量足够向前继续运动时,可到达下一级(区域)水道,并发生层状充填及漫溢作用,进而形成新一期的席状砂沉积。

5 结论

1) 莺歌海盆地东方1-1气田中新统黄一段浅水多级海底扇由水道、席状砂及扇缘砂组成。水道呈透镜状,形态不对称,由一系列串珠状冲坑-流槽构成,整体呈NW-SE向展布,可分为3级(区域)。水道两侧及末端发育席状砂。扇缘砂多发育在海底扇边缘。

2) 席状砂及水道沉积储集性能好。席状砂岩性以细砂及粉砂为主,具有分布广,厚度较大,含砂率较高,物性好等特征。水道多为层状细砂岩充填,厚度及面积较大,物性较好。水道与席状砂沉积常断开不连通,席状砂与席状砂之间多断开或弱连通,易形成岩性及地层圈闭。

3) 多级海底扇的形成可分为早期的超临界流-临

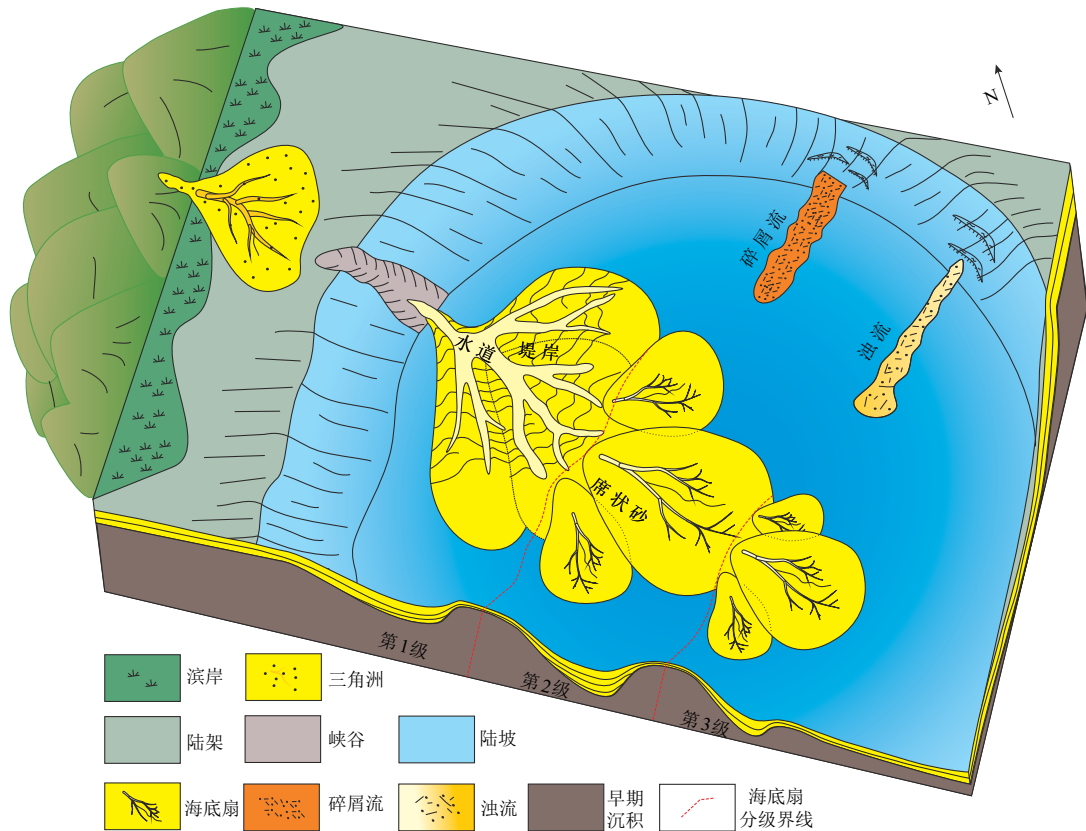


图11 东方1-1气田黄一段多级海底扇模式

Fig. 11 Depositional model of multi-stepped submarine fans of the 1st member of the Huangliu Formation in the Dongfang 1-1 gas field

界流转换阶段(形成多级水道)和晚期的充填-漫溢阶段。黄一段沉积早期,重力流能量高,超临界重力流在莺歌海斜坡上形成冲坑-流槽,而亚临界重力流发育席状砂沉积。随着重力流能量逐渐降低,一部分重力流在水道内发生层状充填,而另一部分流溢出水道形成席状砂沉积。

致谢:审稿专家及编辑老师对稿件进行了详细地评审,并提出了一系列有益的意见和建议。参加本研究工作的还有刘圣乾老师、硕士研究生谈梦婷、葛稳稳、孙玉玺及于星等,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] READING H G, RICHARDS M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(5): 792-822.
- [2] 孙辉, 范国章, 邵大力, 等. 深水局局限制型水道复合体沉积特征及其对储层性质的影响——以东非鲁武马盆地始新统为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1440-1450.
SUN Hui, FAN Guozhang, SHAO Dali, et al. Depositional characteristics of locally restricted channel complex in deep water and its influence on reservoir properties: A case study of the Eocene series, Rovuma Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1440-1450.
- [3] 王陆新, 潘继平, 杨丽丽. 全球深水油气勘探发现现状与前景展望[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(2): 31-37.
WANG Luxin, PAN Jiping, YANG Lili. Present conditions and prospect of global deepwater oil and gas exploration and development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(2): 31-37.
- [4] 李全, 吴伟, 康洪全, 等. 西非下刚果盆地深水水道沉积特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(4): 917-929.
LI Quan, WU Wei, KANG Hongquan, et al. Characteristics and controlling factors of deep-water channel sedimentation in Lower Congo Basin, West Africa [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(4): 917-929.
- [5] PAULL C K, TALLING P J, MAIER K L, et al. Powerful turbidity currents driven by dense basal layers [J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 4114.
- [6] 赵晓明, 刘丽, 谭程鹏, 等. 海底水道体系沉积构型样式及控制因素: 以尼日尔三角洲盆地陆坡区为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(5): 825-840.
ZHAO Xiaoming, LIU Li, TAN Chengpeng, et al. Styles of submarine-channel architecture and its controlling factors: A case study from the Niger Delta Basin slope [J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(5): 825-840.
- [7] KIRKHAM J D, HOGAN K A, LARTER R D, et al. Tunnel

- valley infill and genesis revealed by high-resolution 3-D seismic data[J]. *Geology*, 2021, 49(12): 1516–1520.
- [8] 李华, 何幼斌. 深水重力流水道沉积研究进展[J]. *古地理学报*, 2020, 22(1): 161–174.
- LI Hua, HE Youbin. Research progress on deepwater gravity flow channel deposit [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22(1): 161–174.
- [9] MYROW P M, HISCOTT R N. Shallow-water gravity-flow deposits, Chapel Island Formation, southeast Newfoundland, Canada[J]. *Sedimentology*, 1991, 38(5): 935–959.
- [10] TOKUHASHI S. Shallow-marine turbiditic sandstones juxtaposed with deep-marine ones at the eastern margin of the Niigata Neogene Backarc Basin, central Japan[J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 104(1/4): 99–116.
- [11] OLIVERO E B, LÓPEZ C M I, MALUMIÁN N, et al. Eocene graphoglyptids from shallow-marine, highenergy, organic-rich, and bioturbated turbidites, Fuegian Andes, Argentina [J]. *Acta Geologica Polonica*, 2010, 60(1): 77–91.
- [12] CARTIGNY M J B, VENTRA D, POSTMA G, et al. Morphodynamics and sedimentary structures of bedforms under supercritical-flow conditions: New insights from flume experiments [J]. *Sedimentology*, 2014, 61(3): 712–748.
- [13] PARKER G, GARCIA M, FUKUSHIMA Y, et al. Experiments on turbidity currents over an erodible bed [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1987, 25(1): 123–147.
- [14] POSTMA G, CARTIGNY M J B. Supercritical and subcritical turbidity currents and their deposits—a synthesis [J]. *Geology*, 2014, 42(11): 987–990.
- [15] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 超临界沉积物重力流形成演化及特征[J]. *石油学报*, 2017, 38(6): 607–621.
- CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, et al. Formation, evolution and sedimentary characteristics of supercritical sediment gravity-flow [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(6): 607–621.
- [16] 谈明轩, 朱筱敏, 刘伟, 等. 旋回阶梯底形的动力地貌及其相关沉积物发育特征[J]. *地质论评*, 2017, 63(6): 1512–1522.
- TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, LIU Wei, et al. The morphodynamics of cyclic steps and sedimentary characteristics of associated deposits[J]. *Geological Review*, 2017, 63(6): 1512–1522.
- [17] SLOOTMAN A, CARTIGNY M J B. Cyclic steps: Review and aggradation-based classification [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 102949.
- [18] HUANG Yintao, YAO Guangqing, FAN Xiaoyi. Sedimentary characteristics of shallow-marine fans of the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 403–419.
- [19] 王华, 陈思, 甘华军, 等. 浅海背景下大型浊积扇研究进展及堆积机制探讨: 以莺歌海盆地黄流组重力流为例[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 21–34.
- WANG Hua, CHEN Si, GAN Huajun, et al. Accumulation mechanism of large shallow marine turbidite deposits: A case study of gravity flow deposits of the Huangliu Formation in Yinggehai Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 21–34.
- [20] LI Xiaopeng, WANG Hua, YAO Guangqing, et al. Sedimentary features and filling process of the Miocene gravity-driven deposits in Ledong area, Yinggehai Basin, South China Sea [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 209: 109886.
- [21] 杨朝强, 周伟, 王玉, 等. 莺歌海盆地东方区黄流组一段小层划分及海底扇沉积演化主控因素[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(1): 55–65.
- YANG Zhaoqiang, ZHOU Wei, WANG Yu, et al. Subdivision of the first member of Huangliu formation in Dongfang area of Yinggehai Basin and the main factors controlling the sedimentary evolution of submarine fan [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(1): 55–65.
- [22] 谢玉洪, 范彩伟. 莺歌海盆地东方区黄流组储层成因新认识 [J]. *中国海上油气*, 2010, 22(6): 355–359, 386.
- XIE Yuhong, FAN Caiwei. Some new knowledge about the origin of Huangliu Formation reservoirs in Dongfang area, Yinggehai Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(6): 355–359, 386.
- [23] 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 等. 深水重力流水道-朵叶体系形成演化及储层分布——以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组露头为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 917–928.
- LI Hua, HE Youbin, TAN Mengting, et al. Evolution of and reservoir distribution within deep-water gravity flow channel-lobe system: A case study of the Ordovician Lashenzhong Formation outcrop at western margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 917–928.
- [24] SOUTHARD J B, LAMBIE J M, FEDERICO D C, et al. Experiments on bed configurations in fine sands under bidirectional purely oscillatory flow, and the origin of hummocky cross-stratification [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1990, 60(1): 1–17.

(编辑 张亚雄)