

doi:10.3799/dqkx.2012.018

阿尔及利亚扎尔则油田 F4 层段 地层与储层分布规律

郑文波^{1,2}, 吴修利^{1,2}, 邓宏文^{1,2}

1. 中国地质大学能源学院, 北京 100083

2. 中国地质大学海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083

摘要: 区域构造—沉积演化背景与研究区大量岩心、测井资料分析相结合的沉积相分析表明, 下泥盆统 F4 层段属于处于陆隆部位的半深海背景下的海底扇沉积。以 F4 层段中部稳定发育的深海泥岩段为区域对比标志层, 将其分为上部和下部 2 个旋回, 分别对应 2 期扇体的形成与发育过程。以各扇体内部较为稳定的泥岩为次级对比标志层, 可进一步将各扇体划分出相当于砂层组级别的地层单元, 由此建立了 F4 层段具有时间意义的地层对比格架。在分析各扇体沉积亚相类型与成因机制的基础上, 认为 F4 层段储层成因类型主要包括辫状水道复合体、沉积型水道和水道末端舌状体 3 种类型。在高精度时间地层格架内, 分析了储集砂体平面展布规律, 并提出 F4 层段海底扇至少存在来自北西和东南 2 个方向的物源供给体系, 属于多点物源和砂质扇成因类型。该研究不仅为重力流沉积层序地层划分和对比提供了研究思路与方法, 同时也为 F4 层段剩余油的分布研究提供了可靠的地质模型, 为油藏的深入开发挖潜提供了科学依据。

关键词: 相; 地层学; 重力流; F4 层段; 储层成因与分布; 伊利兹盆地; 阿尔及利亚; 沉积学。

中图分类号: TE121

文章编号: 1000-2383(2012)01-0181-10

收稿日期: 2011-08-29

Stratigraphy and Facies Distribution of Lower Devonian F4 Unit in Zarzaitine Oilfield, Illizi Basin, Algeria

ZHENG Wen-bo^{1,2}, WU Xiu-li^{1,2}, DENG Hong-wen^{1,2}

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Based on cores and well logs, the analyses of tectono-sedimentary setting and facies show that F4 unit formed by submarine fan located in the continental rise. Lower Devonian F4 unit can be divided into upper cycle and lower cycle by a correlating fan-wide marine mud datum called “middle mud”, which correspond individual the two-stage of the submarine fan evolution. Each cycle can be subdivided into several sub-cycles by mudstone or thin bedded siltstone, and mudstone which can be traced in the interior fan, thereby establishing the chronostratigraphic frame of F4 unit. In light of the analysis of subfacies and their mechanisms, the reservoir types of F4 unit include braided channel-complex, sedimentary channel and tongue-like body. Facies distribution maps in the precision stratigraphic framework indicate that the submarine fan sediments formed F4 unit were supplied from at least two sources, i. e., northwest and southeast. The genetic type of F4 unit is a multiple point-source sand-rich fan. This study provides not only correlation strategy of submarine fan, but also a reliable geological model for the further development of F4 unit.

Key words: facies; stratigraphy; gravity flow; F4 unit; Illizi basin; Algeria; sedimentation.

由于深海扇储层的巨大勘探远景,国内外对其研究已经历了数十年的历史,诸多学者建立了多种沉积模式,包括 Bouma (1964)、Normark (1970)、Mutti and Ricci (1978)、Walker (1984) 等人对深海扇的研究及建立的模式,其中 Walker (1984) 的沉积模式被我国大多数沉积学工作者所采用. 实际上,深海扇形成与发育过程中由于受构造背景(沉积地形)、海平面变化、物源供给体系等因素的影响,通常并不是由上扇、中扇、下扇亚相构成的简单扇体. Reading and Richards (1994) 在研究中根据粒度的变化、物源的发育情况、斜坡地形等将深海扇分为 12 种类型. 不同成因类型的海底扇,其扇体规模、物源、砂质扇成因类型、发育位置、沉积相构成、沉积特征、储层成因类型与分布规律都有很大差别.

由于研究思路和分析方法的不同,对阿尔及利亚伊利兹盆地扎尔则油田下泥盆统 F4 层段深海扇的成因类型、地层划分与对比、储集砂体形态和分布规律的认识存在差异,因此对剩余油分布规律认识不清楚,油田的深入开发进入了瓶颈期. 前人研究曾提出 F4 层段为单点物源深海扇类型(李顺明, 2005)的观点,本文研究则认为其属于多点物源砂质扇沉积. 深海扇成因类型不同,对储层成因类型与砂体分布规律的认识必然存在差异性,由此有必要对该油田剩余油分布、剩余油储量评估以及油藏挖潜前景等方面重新评估.

扎尔则油田发现于 1957 年,目前进入开发晚期,主要产层为下泥盆统 F4 层段. 油田钻井 200 余口,在 11 口井中进行了较为系统的取心. 本文以重力流沉积学理论为指导,以岩心详细观察与描述为主,识别 F4 层段主要沉积相类型与沉积特征,通过精细岩—电标定建立沉积相的测井相解释图,确定未取心井沉积相构成. 在此基础上,分析 F4 层段海底扇的纵向演化特征,以海侵泥岩或扇内较稳定泥岩作为对比标志层建立时间地层对比格架,在时间地层单元内分析沉积相的分布特征,特别是骨架砂体分布规律,确定主要物源供给方向,以 Reading and Richards 模式为指导确定了 F4 层段海底扇的砂质扇成因类型.

1 地质概况

伊利兹 (Ilizi) 盆地位于古达米斯盆地南部,在阿尔及利亚境内面积约 25 万 km²,周缘为塔西利高原和阿哈加尔地盾,西北为三叠纪盆地和达哈尔拱起,西侧以毕奥特隆起为界,东侧以利比亚锡尔特盆地为邻,盆地具有古生界克拉通性质(图 1). 北非盆地在古生代大部分时间是一个整体,志留纪晚期到泥盆纪,劳亚古陆与冈瓦纳古陆分裂,弗拉斯 (Frasnian) 运动使伊利兹盆地东部的 Tihemboka 穹隆和西部的 Amguid-Hassi Touareg 构造带发生多次小规模抬升,

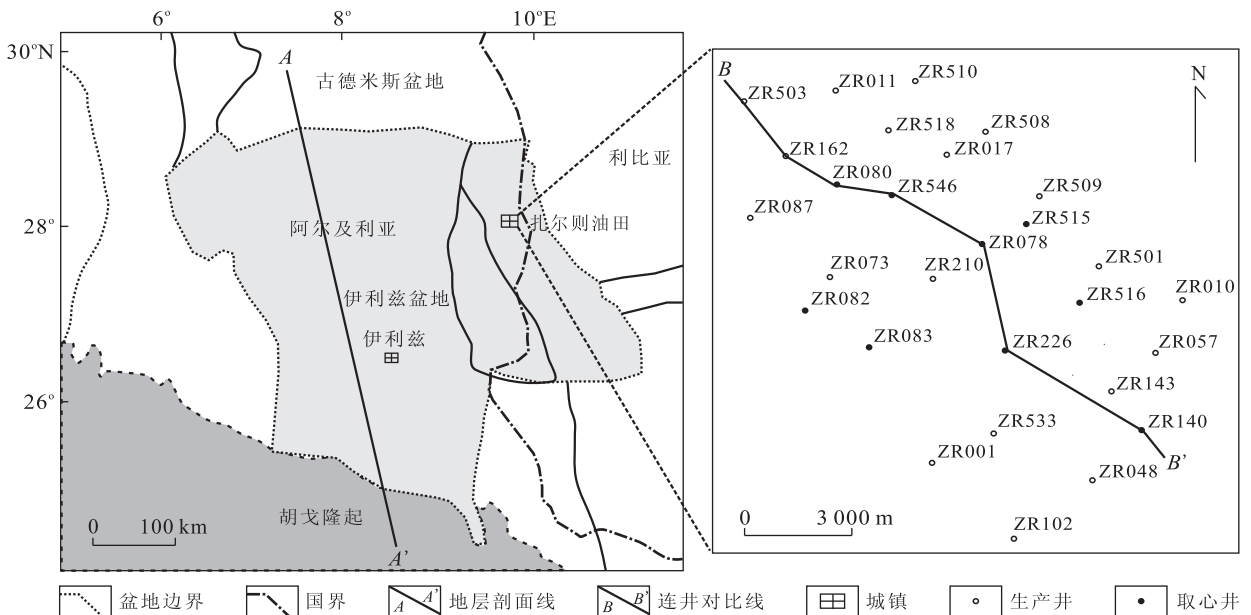


图 1 伊利兹盆地位置和扎尔则油田构造位置

Fig. 1 Map of Zarzaitine oilfield in Illizi basin and core correlation section

图中 A-A' 为盆地区域地层分布剖面; B-B' 为扎尔则油田内部垂直物源方向连井对比剖面

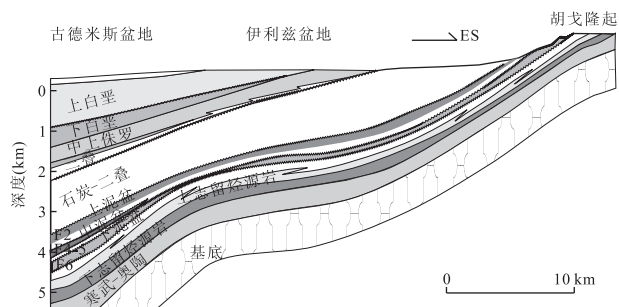


图2 地层发育图和 A-A' 地层剖面

Fig. 2 Stratigraphic unit and section of Illizi basin

造成局部剥蚀,并逐渐发育成一个独立的盆地,沉积物源主要来自南部(Aliev, 1975; Van de Weerd and Ware, 1994; Boote *et al.*, 1998).

伊利兹盆地古生界自下而上发育前寒武系基底、寒武—奥陶系、志留系(哥特兰系)、泥盆系、石炭系海相地层,石炭系以上为晚达西勒(Tassilien)陆相沉积(图2)。由区域地层剖面可以看出,古生界地层向盆地西北部增厚,主要为海相页岩和砂岩,仅在石炭系发育泥灰岩和灰岩(图2)。盆地古生代经历了几次海侵—海退沉积旋回,在志留纪和晚泥盆世分别发生了2次大的海泛事件,形成了该区的生油岩(Aliev, 1975)。在这些旋回内形成的进积型河流相砂岩、三角洲相砂岩及浅海相砂岩均为储集层(Aliev, 1975)。盆地内古生界泥盆系可划分为中上统和下统,中上统包含 F2 层段,下统由 F4 和 F6 层段组成;F4 属于下泥盆统艾姆斯阶(Emsian),与中上泥盆统 F2 不整合接触(图2)。F4 层段为扎尔则油田主要含油层系,地层厚度 40~60 m,顶部遭受不同程度的剥蚀,特别是油田主体部位,剥蚀厚度近 25 m。

2 沉积相类型与沉积特征

以重力流流变学为基础,深水沉积物流可广义的划分为 2 大类,即塑性流体和牛顿流体。塑性流体以碎屑流为代表,牛顿流体以浊流为代表,前者呈典型的层流状态,后者以具牛顿流体特征的紊流状态通过悬浮负载作用搬运沉积物(Hampton, 1972; Leeder, 1982; Shanmugam and Clayton, 1989; Middleton, 1993; Stanley, 1993; Reading, 1996; Shanmugam, 2002)。以岩心观察为基础,在 F4 层段中识别出包括砂质泥砾岩相、块状层理砂岩相、交错层理砂岩相、波状层理粉砂岩相、砂泥薄互层相、

灰色泥岩相和紫红色泥岩相 7 种岩相类型,以前面 3 种岩相类型为主(表 1),各岩相类型和沉积特征见图 3。砂质泥砾岩相、块状层理砂岩相,特别是含大量悬浮泥质漂砾的块状砂岩相,形成于具塑性流体性质的碎屑流;由泥砾定向排列呈槽状交错层理的砂岩相形成于稀释的重力流;波状层理粉砂岩相和砂泥薄互层相则为具有紊流状态的浊流产物。

上述 6 种岩相类型在纵向上形成不同的相组合,其代表了深海扇各亚相的沉积序列。根据岩心和测井识别相组合特征,确定了 F4 层段主要沉积相类型如下(表 1)。

2.1 滑塌碎屑流

该相以砂质泥砾岩或泥砂混杂为特征,泥砾岩中泥砾呈红色和紫色,泥砂混杂时以紫红色泥岩为基质,砂呈团块状,滑塌变形层理发育,厚度一般不大,十几厘米至数十厘米,其形成于水流对陆架或陆坡沉积侵蚀后的滑塌与滑移作用,为非河道化碎屑流沉积作用的结果,主要发育于 F4 层段各扇旋回的底部。

2.2 重力流水道

Johnson *et al.* (2001)将海底扇发育的水道分为 5 种类型:(1)限制性侵蚀河道,其形成于斜坡底部供给水道复合体,河道边缘和河道充填特征复杂,发育富含泥砾的底部滞留沉积;(2)具有简单边缘和充填特征的侵蚀河道;(3)沉积型河道,仅在河道底部发育不明显的侵蚀作用,以沉积充填作用为主;(4)具有非均质的薄层充填的侵蚀河道;(5)河道复合体,河道内充填结构变化明显,主要由前 3 类河道侵蚀后的剩余部分组成。这 5 种类型的河道在充填特征和几何形态方面有明显差异。根据岩心和测井相解释,F4 层段深海扇河道主要有 2 种类型:辫状水道复合体和沉积水道。

2.2.1 辫状水道复合体 辫状水道是构成 F4 层段深海扇的主要类型。其特点是纵向上具有多期河道叠置特征,单河道厚度 1~3 m 不等,向上厚度逐渐增大。多层叠置形成的水道复合体一般厚度 5~10 m 不等,最大可达 20 m,与上下覆层突变接触,GR 曲线多呈锯齿状桶形或箱形(图 4)。构成叠置辫状水道的单河道下部为碎屑流形成薄层泥砾岩相(十余厘米),中上部为块状砂岩,粒度最粗可达中粗砂岩,局部见泥砾半定向排列显现的交错层理,砂岩断续含漂浮的泥砾,大者可以达到数厘米(图 3)。辫状水道以混合负载的高密度碎屑流(塑性流体)沉积作用为特征,作为 F4 层段主要沉积亚相类型,一般发

表 1 F4 层段岩相类型

Table 1 Type of litho-facies in F4 unit

类型	厚度	岩石类型	颜色	结构	构造	成因机制	发育程度
砂质泥砾岩相	0.1~0.5 m	砂质支撑泥砾岩	红/紫/绿/灰色	分选差,泥砾磨圆中等	包卷层理,揉皱构造	滑塌/碎屑流/水道底部	中等
块状层理砂岩相	0.2~3.0 m	中细砂岩夹少量泥质漂砾	灰色	分选中等,磨圆较好	无构造,局部见泄水/火焰状/碟状构造	碎屑流为主,局部颗粒/液化流	普遍
交错层理砂岩相	0.2~0.4 m	中细砂岩为主	灰色	分选一般,磨圆较好	槽状交错层理,或泥砾定向排列显示	低密度碎屑流	少量
波状层理粉砂岩相	0.1~0.3 m	粉砂岩/泥质粉砂岩	灰色	分选好,磨圆好	波状、爬升/透镜状层理	低密度浊流, Tc-d 段	局部
砂泥薄互层相	0.1~0.6 m	粉砂岩和泥岩	灰/黑色	分选中等,磨圆较好	波状层理,互层层理	低密度浊流, Td-e 段	中等
暗色泥岩相	0.05~0.10 m	泥岩	灰/灰黑色		块状,局部见虫孔和植物碎屑	悬浮沉积作用	中等

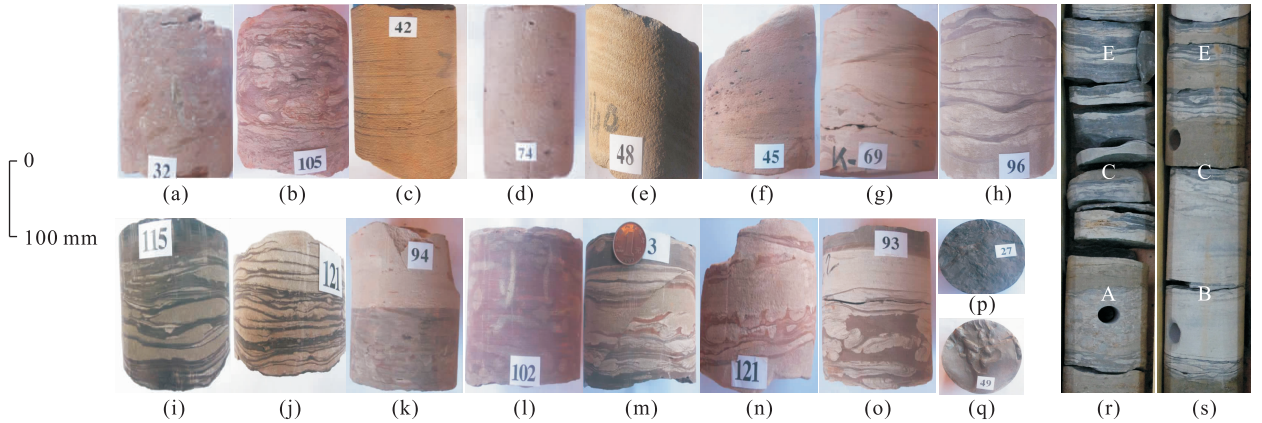


图 3 岩心图版

Fig. 3 Core assemblage

a. Zr140, 1 483.0 m, 泥砾岩相; b. Zr83, 1 267.6 m, 泥砾岩相; c. Zr140, 1 474.0 m, 块状层理砂岩相; d. Zr140, 1 457.2 m, 块状层理砂岩相; e. Zr140, 1 487.35 m, 交错层理砂岩相; f. Zr140, 1 473.4 m, 交错层理砂岩相; g. Zr140, 1 461.2 m, 波状层理砂岩相; h. Zr140, 1 438.8 m, 波状层理砂岩相; i. Zr515, 1 509.9 m, 砂泥薄互层相; j. Zr515, 1 495.4 m, 砂泥薄互层相; k. Zr140, 1 440.2 m, 灰黑色泥岩; l. Zr140, 1 434.8 m, 紫色虫孔泥岩; m. Zr140, 1 492.3 m, 微断层; n. Zr80, 1 272.5 m, 砂球枕构造; o. Zr140, 1 440.7 m, 液化构造; p. Zr140, 1 471.4 m, 重荷模; q. 1 484.4 m, 植物碳屑; r. Zr515, 1 362.4 m, 鲍马序列 A-C-E; s. Zr515, 1 360.1 m, 鲍马序列 B-C-E

育于 F4 层段各期扇旋回中下部. 根据其叠置程度、厚度与砂岩分选程度的变化可以判断其距离源区的远近.

2.2.2 沉积型水道 厚度小于辫状水道, 一般 3~4 m. 多为单一水道, 较少叠置现象. 河道底部发育不明显的侵蚀作用, 主体为块状层理砂岩相, 局部可见到颗粒流形成的碟状构造或液化流形成的泄水构造. 粒级以细砂岩或中细砂为主, 粒度较为均一. 水道主体部分为块状, 顶部数厘米可迅速变为灰色波状层理粉砂岩, 但与上覆泥质沉积仍为突变接触关系, 说明天然堤不甚发育. GR 和 AC 曲线上以块状为主或由于顶部粒度变细呈不明显的钟形(图 4). 该相以弯度不大的孤立或单水道沉积作用为主, 流体浓度较辫状水道低, 流动机制逐渐从碎屑流的层

流向浊流的紊流过渡, 多发育在 F4 层段各期扇旋回中上部.

2.3 水道末端舌状体

由块状层理砂岩相组成, 以细砂岩为主, 厚度不大, 一般 1~3 m, 略呈向上变粗韵律, GR 与 AC 曲线呈反旋回(图 5). 舌状体多形成于扇上水道末端或侧翼, 为沉积物流速减慢迅速卸载后的非河道化沉积. 该相由重力流流动机制从碎屑流向紊流转变过程中在水道末端由于浓度降低的浊流沉积作用形成, 通常发育在各期扇旋回的上部.

2.4 浊积席状砂

由粉细砂岩或砂泥薄互层组成. 单砂岩厚度数厘米, 一般小于 10 cm, 发育鲍马序列 AC 段或 BCE 段(图 4); 砂泥薄互层时厚度为 1~2 cm, 以鲍马序

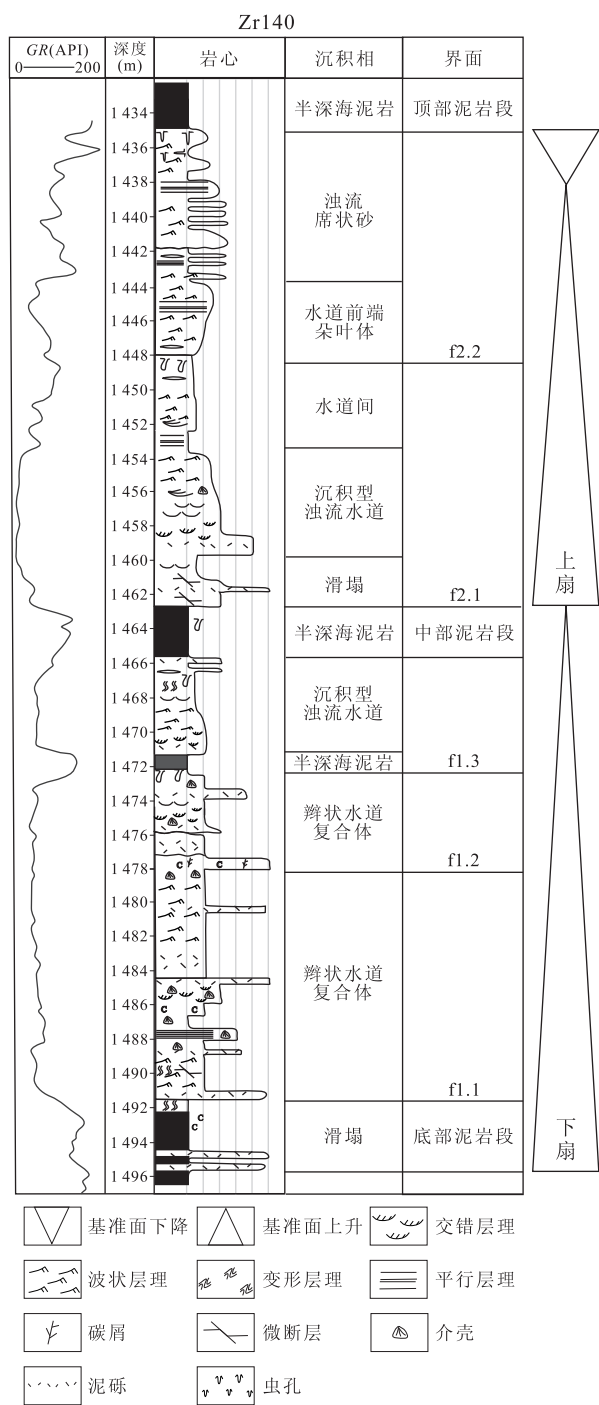


图 4 F4 层段沉积相与层序地层划分
Fig. 4 Division of facies and sequence in F4 unit

列 CE 段为特征,发育波状层理,透镜状层理等,砂岩底部见负荷模构造(图 3). 该相是稀释的浊流向牵引流过渡过程中形成的,多发育于各期扇旋回的上部或水道间.

2.5 浅海一半深海沉积

以深灰色、灰色或灰黑色泥岩夹砂泥薄互层为特征,多发育于水道间或扇体之间,形成于海泛期沉

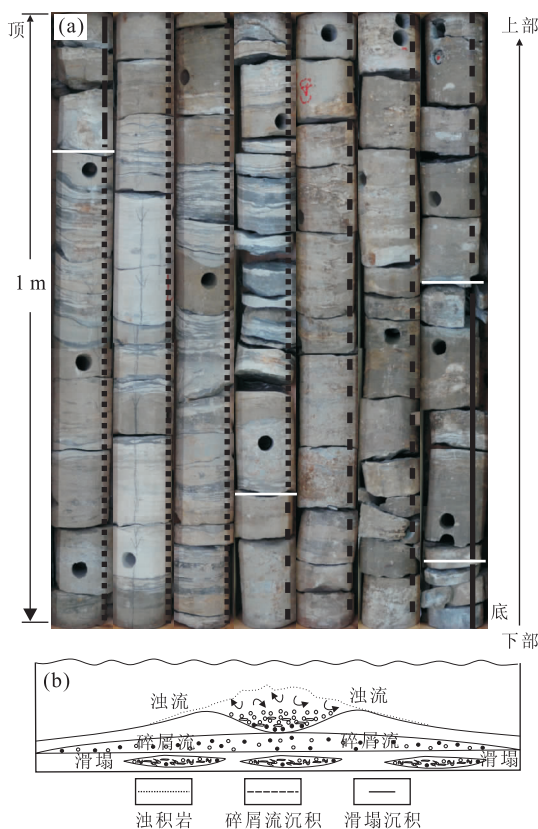


图 5 F4 某段岩心重力流沉积垂向序列(厚 7 m)(a)和重力流垂向叠加序列成因解释(b)

Fig. 5 Core succession (7 m) of gravity flow sedimentation (a) and vertical sequence of gravity flow deposition (b)

a. 底部为半深海相泥岩,其上为碎屑流沉积的块状砂岩,见漂浮泥砾,向上为浊流成因的块状砂岩,顶部向牵引流过渡形成砂泥薄互层,形成于重力流能量和浓度衰减,形成可容纳空间增大、水体变深的旋回

积作用. 油田开表明,扎尔则油田储层成因类型主要为辫状水道复合体、沉积型水道和水道末端复合体,前 2 种类型在注水开发过程中水淹明显.

3 层序地层划分与对比

3.1 重力流层序地层划分方法

深海扇的形成与发育过程中,受海平面升降、构造沉降和沉积物供给速率的影响,可容纳空间与沉积物供给比值(A/S)发生变化,产生扇体的进积与退积旋回. 深海扇向盆地进积,扇近源部分较高梯度的“相”叠加扇远源部分较低梯度“相”之上;深海扇退积时,扇远源部分较低梯度的“相”叠加在高梯度“相”之上. 因此,扇体进退旋回形成的垂向相序列记录了地形梯度随时间的变化,即能量旋回,也是基准面变化旋回. 由此根据钻、测井反映地层叠加样式的变化可以划分深海扇的基准面旋回(邓宏文等,

2002;姚根顺等,2009;吴景富等,2010).

砂质深海扇偏砂的地层单元建造扇体骨架,代表大量沉积物供给期和扇体增长长期或进积期,而偏粉砂和泥的地层单元代表海平面上升、沉积物供给减少的扇体衰退期或退积期.根据扇范围发育偏粉砂、偏泥的细粒单元对深海扇进行时间地层划分和对比. Johnson *et al.* (2001)将偏粉砂、偏泥的地层单元分为 3 种类型:(1)发育结核层的半深海泥岩代表相对长期密集段沉积作用;(2)扇内发育的泥岩、薄层粉砂岩和砂质浊积岩,都不是自旋回,而是海平面升降或气候变化导致的异旋回;(3)偏砂单元内发育的、延伸范围较小的薄层粉砂岩和细粒浊积岩(Hodgson *et al.*, 2006).偏粉砂、偏泥单元可以出现在扇体不同部位,以不同规模覆盖或穿越扇体,其标志着沉积物供给量向深水盆地的减少或海平面上升,代表着不同级次的密集段,可作为地层划分与对比标志层.沉积物重力流滑塌、流动和搬运主要依靠其本身所具有的势能,势能大小与斜坡地形坡度相关.在特定的坡度下,较高黏度的流体沉积在上坡高势能位置,较低黏度的流体沉积在下坡低势能位置.在势能降低,流体稀释、流速减小的过程中,由于流速、浓度和黏度变化,重力流流体机制发生转变,由高密度碎屑流经过颗粒流或液化流变为浊流,由此造成沉积序列与沉积构造的不同(Bouma, 1964; Fisher, 1983; Bouma *et al.*, 1985; Ganni, 2004),如大小不等的漂砾在碎屑流沉积内常见,而在浊流内不发育,因而可根据重力流相序特征反映出的地形梯度变化,分析可容纳空间与沉积物供给比值(A/S)的减少和增加(邓宏文等,2002),在深海扇内识别较高级次旋回(图 5, 6).

3.2 层序地层划分与对比

如前所述,研究区泥盆系可划分中上统和下统,中上统包括 F2 层段,下统包含 F4 和 F6 层段,二者在研究区为不整合接触关系. F4 层段隶属于下泥盆统艾姆斯阶(Emsian),经历的地质年代为 4.4 Ma.根据 F4 层段保存较完整的钻/测井对比剖面分析,该不整合之上为逐层超覆的海相页岩,因而推测 F4 层段深海扇发育在 1 个三级层序内.

3.2.1 F4 层段地层划分 F4 层段中部普遍发育厚度不大,但可区域对比的深灰色泥岩(middle mud),将扇体分为 2 个部分,二者均具有退积叠加样式,说明 F4 层段深海扇经历了 2 个发育期.因此分布较广的海泛泥岩密集段“middle mud”具有一级标志层意义,根据各旋回内部发育的细粒段又可以

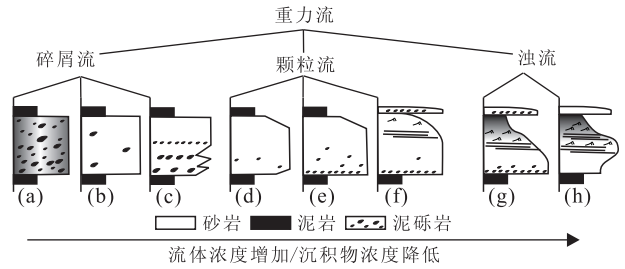


图 6 重力流流变学机制的变化导致沉积物沉积构造和结构的差异(据 Ganni, 2004 修改)

Fig. 6 Difference in structure of gravity flow sedimentation a. 粘性碎屑流; b. c. 非粘性碎屑流; d. e. f. 密度流; g. 浊流(鲍马序列); h. 浊流(高密度流)

将各旋回划分为次级单元(图 4).

下旋回:自下而上沉积序列,即滑塌碎屑流沉积—辫状水道复合体—沉积水道(或水道末端舌状体)—鲍马序列浊积岩(盆地中部),这一沉积序列形成于重力流能量逐渐降低、浓度减小、水体变深的过程中,反映了基准面旋回上升和可容纳空间增大时扇体的退积作用.根据其内部发育的粉砂和泥岩薄互层可进一步划分出 3 个次级沉积单元.

上旋回:通常与下旋回以灰色泥岩(middle mud)分开,但当扇体对下覆扇侵蚀作用明显时,灰色泥岩不发育,而水道成因的厚层块状砂岩直接上覆在下旋回砂泥互层之上,突变明显.旋回顶部遭受不同程度的剥蚀,但从保存较全的井分析,上旋回自下而上沉积序列与下旋回相似,不同的是旋回下部辫状水道复合体较少叠置,砂岩均质性好,块状特征明显,反映沉积物供给稳定,高浓度碎屑流沉积作用减少,扇体发育“成熟”的过程.因此,与下旋回相比, F4 层段上旋回主体应该形成于海平面上升阶段.在上旋回顶部滑塌成因的泥砾岩增多,泥岩中见碳屑、虫孔发育,可能与 F4 层段沉积后期基底抬升或扇体进积、水体逐渐变浅有关.根据其内部发育的粉砂和泥岩薄互层可划分出 2 个次级沉积单元.

3.2.2 F4 层段地层对比 选择位于扎尔则油田中部、沿构造走向延伸的一条剖面分析 F4 层段地层与沉积相发育特征(剖面位置见图 1).该剖面下旋回地层发育齐全,上旋回遭受不同程度剥蚀,特别是油田主体部位 ZR546 井区残留厚度薄.以中部分布较为稳定的海泛泥岩(middle mud)为对比标志层, F4 层段可以划分为上下 2 期扇. 2 期扇均经历了初期以薄层滑塌沉积为主,中期以厚层碎屑流成因的辫状水道复合体进积充填为特征、晚期渐变为浊流水道和席状砂发育的 3 个阶段.在纵向上,由于物源

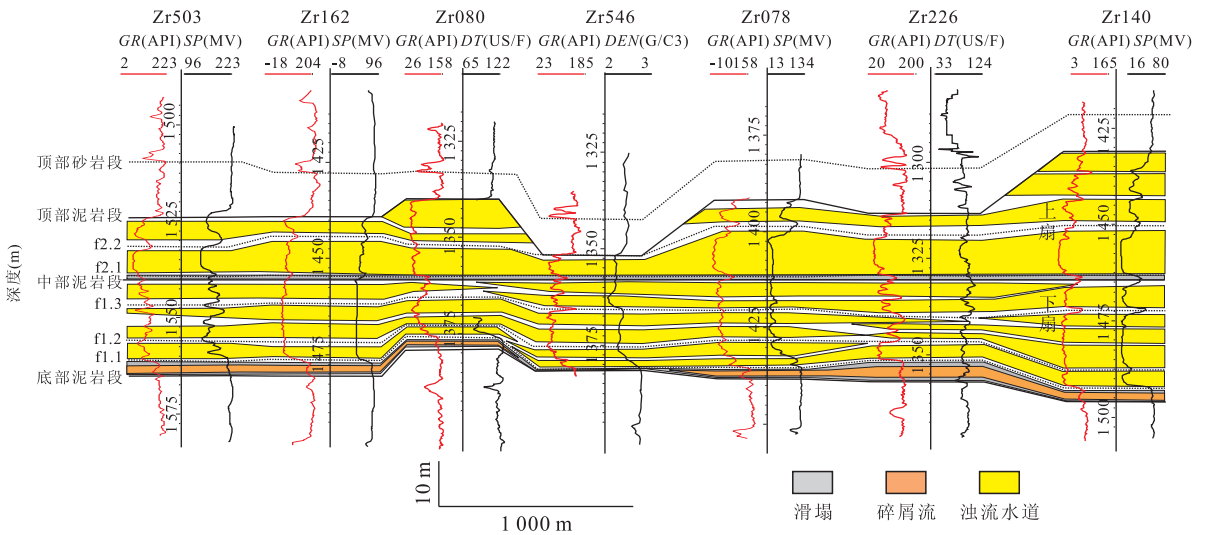


图 7 垂直物源方向的层序地层与沉积相对比剖面

Fig. 7 Stratigraphy and facies correlation section in vertical of source

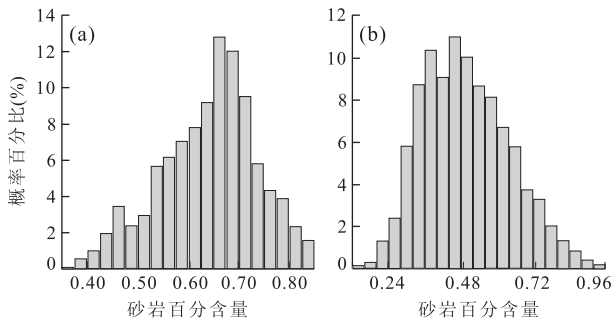


图 8 F4 层段上下旋回砂岩百分含量概率分布

Fig. 8 Histogram of sand percentage in F4 unit

a. 下扇; b. 上扇

供给减弱或海平面逐渐上升,扇体向物源方向退积.早期局部地貌“洼地”以厚层辫状水道复合体充填作用为主,随着“低”地形的填平补齐,地形渐变平缓,孤立的水道或席状砂发育(图 7).

由剖面东西方向上地层厚度、河道成因类型和砂体厚度变化可以看出,F4 层段地层厚度和辫状河道厚度分别从 2 侧(东南侧和北西西侧)向中部的 ZR546 井区方向减薄,推断深海扇至少存在分别来自西部和东南 2 个方向的物源体系供给,ZR546 井可能为 2 物源体系交汇部位.

3.2.3 F4 层段深海扇成因类型与演化特征 根据砂岩等厚图所确定的砂岩百分含量概率图可以看出,F4 层段发育的上下 2 个深海扇旋回中砂岩百分含量出现在 50%~60% 的概率最大,根据 Reading and Richards(1994)定义,其属于砂质扇类型(图 8).

在层序地层划分与对比基础上,以次级旋回为单元分析 F4 层段深海扇的形成与演化过程.深海

扇下旋回形成初期,以范围有限、厚度较薄的滑塌碎屑流沉积为特征(图 9a);随着沉积供给速率的增加,扇向盆地方向进积,碎屑流成因的辫状水道发育,由于水道摆动迁移形成厚层、连片的朵叶体,分布范围广,主河道发育区分布遵循“低地充填”规律分布(图 9b, 9c);之后河道迁移作用逐渐减弱,孤立河道逐渐增加,厚度变小,较少迁移,并在河道末端发育少量规模不大的朵叶体(图 9d).各次级旋回沉积相展布特征和砂体延伸方向均表明,F4 层段深海扇沉积时期至少存在 2 大物源供给体系,分别来自南东方向和北西西方向;同时,推测在研究区中部也可能存在物源供给体系.上部扇的形成早期也发育滑塌沉积,与下部扇相比,分布零散、厚度薄(图 7);随后,扇向盆地中心大范围进积,分布范围较下部扇广,辫状水道砂体厚度大、侧向连续性较好(图 9e);之后,沉积物源供给减弱或海平面上升,较为孤立、较少叠加的浊积水道和水道末端舌状体发育(图 9f).上旋回在主体部位剥蚀严重,残存厚度区可见滑塌成因的棕红色泥砾和砂泥混层增加,推断与后期海平面下降、扇体进积作用有关.

由上述分析可以看出,F4 层段深海扇经历了 2 期演化过程,储层以辫状复合水道和沉积型水道砂质沉积作用为主.辫状水道复合体河道摆动迁移形成大面积、厚层、连片分布的朵叶体,随着海平面上升、可容纳空间增大沉积型水道、孤立的水道和少量水道末端朵叶体发育.深海扇由分别来自东南方向、北西西方向和可能的南部方向的物源体系供给,具有临近斜坡、多点物源、砂质扇沉积特征.

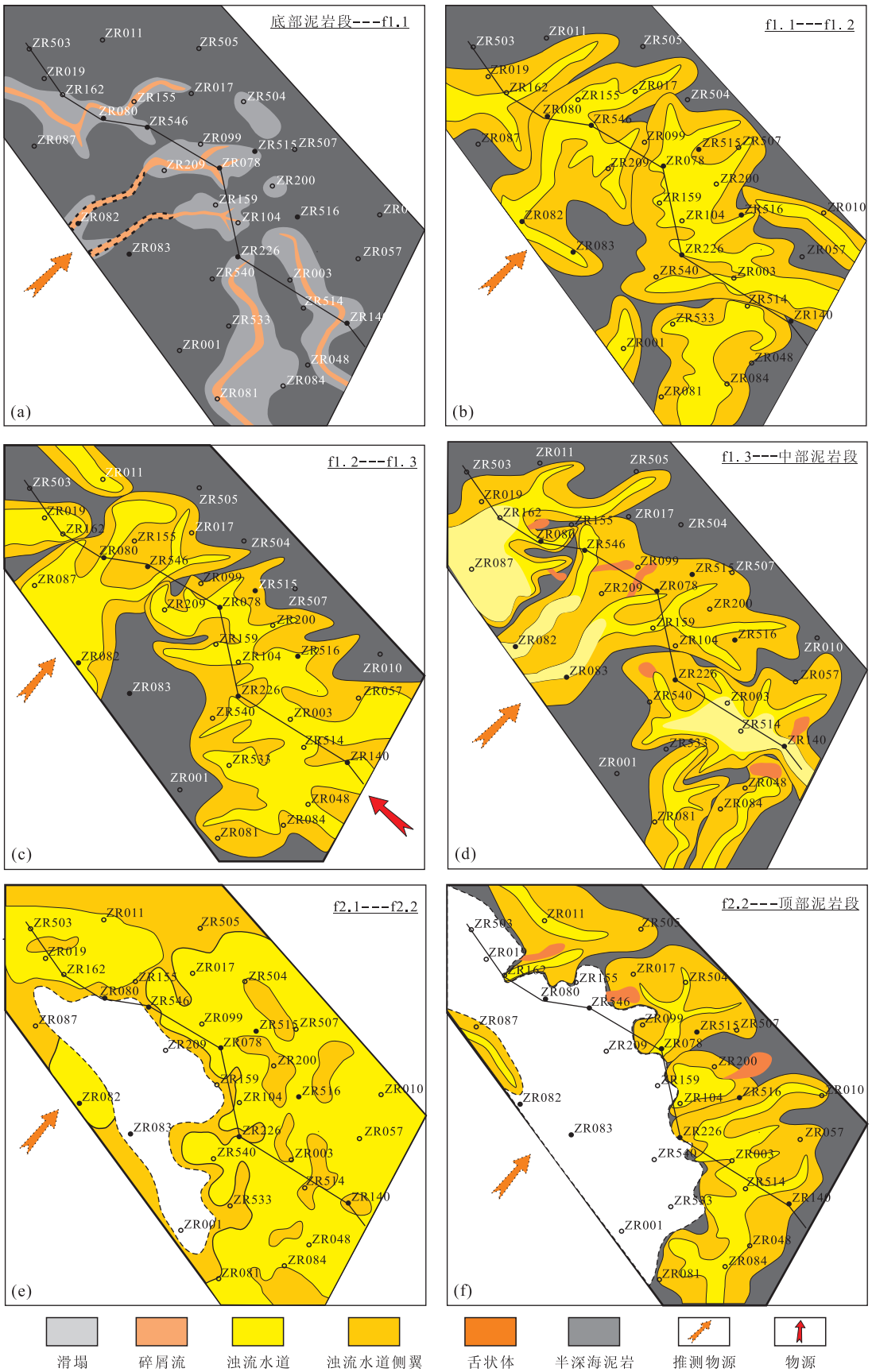


图 9 扎尔则油田 F4 深海扇沉积相分布与演化特征
 Fig. 9 Facies distributions of F4 unit in Zarzaitine oilfield

4 结论

(1) 扎尔则油田 F4 层段形成于多点物源和砂质深海扇的沉积作用, 主要由碎屑流成因的辫状水道复合体、沉积型水道、浊积成因的水道末端舌状体和席状砂组成。

(2) 以深海扇内海泛作用形成的不同规模的密集段可将 F4 深海扇划分上、下 2 个旋回, 其分别经历了海平面上升或沉积物供给速率减少导致扇体向陆地方向退积的过程, 重力流流变学机制发生由碎屑流向浊流的转变导致沉积相和储层成因类型自下而上的规律变化。

(3) 高精度时间地层单元沉积相分布表明, 以辫状水道复合体为主体的深海扇在进积期主要由河道迁移叠置形成的朵叶体构成, 砂岩厚度大、连通性好, 开发水淹明显; 深海扇退积期发育孤立水道和河道末端朵叶体, 砂体连通性差, 是剩余油分布、开发挖潜的主要目标。

References

- Aliev, O., 1975. El Agreb-El Gassi oil fields, Central Algerian Sahara. *Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, 59(9): 1676—1684.
- Boote, D. R. D., Clarke-Lowes, D. D., Traut, M. W., 1998. Palaeozoic petroleum systems of North Africa. In: MacGregor, D. S., Moody, R. T. J., Clark-Lowes, D. D., eds, Petroleum geology of North Africa. *Geological Society of London Special Publications*, 132: 7—68. doi: 10.1144/GSL.SP.1998.132.01.02
- Bouma, A. H., 1964. Turbidites. In: Bouma, A. H., Brouwer, A., eds., *Developments in sedimentology*. Elsevier, Amsterdam, 3: 264. doi: 10.1016/S0070—4571(08)70967—1
- Bouma, A. H., Normark, W. R., Barnes, N. E., et al., 1985. Submarine fans and related turbidite systems. Springer Verlag, New York.
- Deng, H. W., Wang, H. L., Zhu, Y. J., et al., 2002. High-resolution sequence stratigraphy—principles and applications. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Fisher, R. V., 1983. Flow transformations in sediment gravity flows. *Geology*, 11(5): 273—274. doi: 10.1130/0091—7613(1983)11<273:FTISGF>2.0.CO;2
- Gani, R., 2004. From turbid to lucid; a straightforward approach to sediment gravity flows and their deposits. *The Sedimentary Record*, 2(3): 4—8.
- Hampton, M. A., 1972. The role of subaqueous debris flows in generating turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42: 775—793. doi: 10.1306/74D7262B-2B21-11D7-8648000102C1865D
- Hodgson, D. M., Flint, S. S., Hodgetts, D., et al., 2006. Stratigraphic evolution of fine-grained submarine fan systems, Tanqua depocenter, Karoo basin, South Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 76(1): 20—40. doi: 10.2110/jsr.2006.03
- Johnson, S. D., Flint, S., Hinds, D., et al., 2001. Anatomy, geometry and sequence stratigraphy of basin floor to slope turbidite systems, Tanqua Karoo, South Africa. *Sedimentology*, 48(5): 987—1023. doi: 10.1046/j.1365—3091.2001.00405.x
- Leeder, M. R., 1982. *Sedimentology: process and product*. George Allen & Unwin, London.
- Li, S. M., 2005. Sedimentary origins and controls on low density turbidity. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 12(4): 29—31 (in Chinese with English abstract).
- Middleton, G. V., 1993. Sediment deposition from turbidity currents. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21: 89—114. doi: 10.1146/annurev. ea. 21. 050193. 000513
- Mutti, E., Ricci, L. F., 1978. Turbidites of the northern Apennines; introduction to facies analysis. Translated by Nilsen, T. H.. *International Geology Review*, 20(2): 125—166. doi: 10.1080/00206817809471524
- Normark, W. R., 1970. Growth patterns of deep sea fans. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 54: 2170—2195. doi: 10.1306/5D25CC79-16C1-11D7-8645000102C1865D
- Reading, H. G., 1996. *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford, 688.
- Reading, H. G., Richards, M., 1994. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 78(5): 792—822. doi: 10.1306/A25FE3BF-171B-11D7-8645000102C1865D
- Shanmugam, G., 2002. Ten turbidite myths. *Earth-Science Reviews*, 58(3—4): 311—341. doi: 10.1016/S0012—8252(02)00065—X
- Shanmugam, G., Clayton, C. A., 1989. Reservoir description of a sand-rich submarine fan complex for a steamflood project: Upper Miocene Potter sandstone, North Midway Sunset field, California. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 73.
- Stanley, D. J., 1993. Model for turbidite-to-contourite continuum and multiple process transport in deep marine settings: example in the rock record. *Sedimentary Geology*, 82(1-4):

241—255. doi:10.1016/0037-0738(93)90124-N

Van de Weerd, A., Ware, P. L. G., 1994. A review of the East Algerian Sahara oil and gas province (Triassic, Ghadames and Illizi basins). *First Break*, Blackwell, Oxford, United Kingdom.

Walker, R. G., 1984. Turbidites and associated coarse clastic deposits. In: Walker, R. G., ed., *Facies models: response to sea level change*. Geoscience Canada, Reprint Series 1, Toronto, 171—188.

Wu, J. F., Xu, Q., Zhu, Y. H., 2010. Generation and evolution of the shelf-edge delta in Oligocene and Miocene of Baiyun sag in the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 681—690 (in Chinese with English abstract).

Yao, G. S., Yuan, S. Q., Ma, Y. B., et al., 2009. Deepwater mass transport deposition system of Huaguang depression, Qiongdongnan basin and its significance for hydro-

carbon exploration. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 471—476 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

邓宏文, 王红亮, 祝永军, 等, 2002. 高分辨率层序地层学: 原理及应用. 北京: 地质出版社.

李顺明, 2005. 低密度浊流的沉积成因及控制因素——以东营凹陷广利油田纯化镇组为例. *油气地质与采收率*, 12(4): 29—31.

吴景富, 徐强, 祝彦贺, 2010. 南海白云凹陷深水区渐新世——中新世陆架边缘三角洲形成及演化. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(4): 681—690.

姚根顺, 袁圣强, 马玉波, 等, 2009. 琼东南华光凹陷深水重力搬运沉积体系及其油气勘探. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 471—476.