

文章编号: 1000-0550 (2005) 03-0490-08

近岸水下扇沉积体系高精度层序地层学研究

赵俊青¹ 纪友亮² 夏斌¹ 任拥军³ 张善文⁴

1(中国科学院广州地球化学研究所与南海海洋研究所 边缘海地质重点实验室 广州 510640)

2(同济大学海洋与地球科学学院 上海 200092) 3(石油大学(华东)地球资源与信息学院

山东东营 257061) 4(中国石油化工集团公司胜利油田分公司 山东东营 257015)

摘要 以东营凹陷胜北断层下降盘坨 85 块沙河街组沙三中亚段近岸水下扇沉积体为例,对近岸水下扇沉积体系下的高精度层序地层学进行了研究。经过分析认为,近岸水下扇沉积体系中的高精度层序地层单元划分为准层序组、准层序、层组、层四级,并对准层序和层组的类型和对比方法进行了总结。将近岸水下扇沉积体系中的层组类型划分为 Fu (Fine up)、Cu (Coarse up) 和 Hu (Homogenic up) 三大类,准层序类型划分为 Cu—Fu、Cu—Cu、Cu—Hu 三大类,同时总结出了沿物源方向的相序递变和垂利物源方向的侵蚀切割对比 2 种准层序对比模式和侵蚀叠置、相变对比、薄砂层对比、相似渐变等 4 种层组对比模式。

关键词 近岸水下扇 高精度层序地层学 准层序 层组 沙三中亚段

第一作者简介 赵俊青 男 1974 年出生 博士后 层序地层学、沉积学及石油地质

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

1 引言

近岸水下扇的命名存在着争议,就目前国内外文献中,有水下冲积扇、水下扇、扇三角洲、近岸扇、近岸水下冲积扇、近岸水下扇、重力流水下扇、近源水下扇(复合)体等等提法^[1-8]。在我国东部地区中新生代的许多断陷湖盆的扩张期,普遍发育近岸水下扇,一般随大断裂展布,且多分布在湖盆陡坡的一侧,在层序结构体系上近岸水下扇多分布在湖面升高大于或等于扇体堆积速度的湖进期和高水位早期,垂向上自上而下构成向上变细的垂向层序^[9]。由于近岸水下扇是很好的岩性储集体,且在此类储集体中已发现丰富的油气资源,因此对近岸水下扇的研究对于指导油气勘探具有特别重要的意义^[9]。

对于近岸水下扇沉积体系而言,对研究和生产有实际指导意义,而且通过测井和岩芯方法可以识别的高精度层序地层单元划分为准层序组、准层序、层组、层四级。同时国内外大量的近岸水下扇沉积研究统计显示^[10-17],对于一个近岸水下扇沉积体来讲其形成和发育的时间大致相当于一个准层序组形成和发育的时间,因此在对近岸水下扇沉积体的高精度层序地层研究中,其内部更高精度的层序地层单元划分对

比应当是准层序、层组甚至是层的划分和对比,高精度层序地层单元与近岸水下扇沉积体的对应关系如表 1 所示。本文主要针对近岸水下扇沉积体系中最基本的准层序和层组两级高精度层序地层单元的类型、发育特征和对比模式进行了探讨和研究。

2 层组及界面特征

2.1 层组的类型

在一个层组级别的基准面变化过程中,根据近岸水下扇的形成和发育特点可划分出 Fu 型、Cu 型、Hu 3 种类型,而且层组均由 2~3 个单层构成。

2.1.1 Fu 型

该类层组在垂向上显示为向上正韵律特征,根据形成机理又可分为近源型和远源型两类。

2.1.1.1 近源型

发育于扇根亚相部位,层组底面为冲刷面或岩性突变面,为底部具凸凹不平的强侵蚀面的杂基支撑砾岩(包括砾石和杂基物),粒度向上渐细,系由碎屑流搬运强度渐弱、物源供给渐少、渐细或一定的重力分异作用形成。粒度向上变细可呈均匀递变特征,也可在整体向上变细的背景上由几个次级韵律(可能由碎屑流发育过程的脉动性造成)构成(图 1)。

表 1 近岸水下扇沉积体系高精度层序地层单元与沉积地层单元对比

Table 1 Comparison of high-resolution sequence unit and depositional unit in the fan-delta

| 层序地层 | | | | 沉积体系 (据 Mutti, Nomark, 1987 ^[18]) | | 可比性 |
|------|-----------------------------------|------------|----|---|-----------------------------------|---------------------------|
| 层序单元 | 形成时间 | 延伸范围 | 级别 | 沉积单元 | 形成时间 | |
| 准层序组 | 10 ³ ~ 10 ⁵ | 3 ~ 15 km | 2 | 浊流沉积体系、扇 | 10 ⁵ ~ 10 ⁶ | 剖面上可区域追踪,电测曲线可区域对比,地震可识别 |
| 准层序 | 10 ² ~ 10 ⁴ | 3 ~ 10 km | 3 | 扇朵、水下分流河道复合体 | 10 ⁴ ~ 10 ⁶ | 剖面上可追踪,油田范围内可电测对比,三维地震可识别 |
| 层组 | 10 ¹ ~ 10 ³ | 50 ~ 300 m | 4 | 单个河道充填、席状砂、河口坝组合 | 10 ² ~ 10 ³ | 剖面上可对比,小井距条件下可对比 |
| 层 | 10 ⁰ ~ 10 ² | 20 ~ 100 m | 5 | 成因砂体 | 10 ¹ ~ 10 ² | 剖面上可识别、对比,井下可识别,但对比困难 |

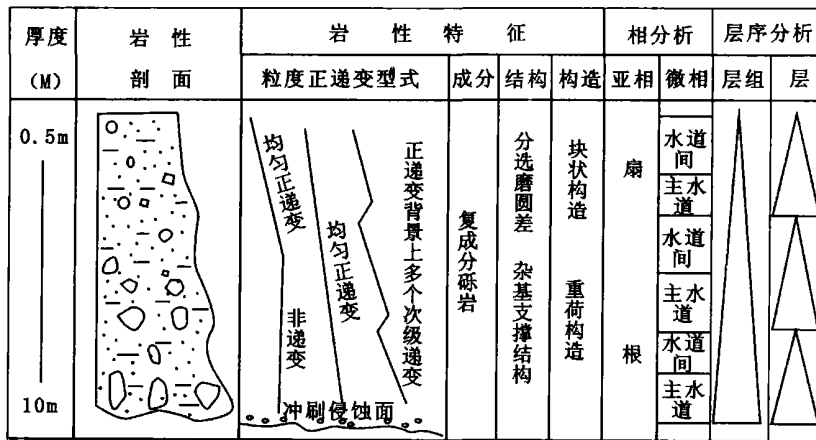


图 1 近源型 Fu层组模式图

Fig 1 The model of near-source Fu bed set

2.1.1.2 远源型

发育于扇中辫状水道部位,由正递变序列底部附一反递变序列组成,由下向上呈细—粗—细韵律,砾状砂岩(杂基支撑砾岩—砾状砂岩)。底部反韵律段通常很薄,只有几至几十厘米,对应于洪水来临前短暂的、强度渐大的牵引流辫状河道沉积。严格地说,每个层组单元底部都应出现该反韵律段,但由于其通常较薄且极易被随后而至的大规模碎屑流部分或全部侵蚀,故实际剖面中很少见到,在地貌极平缓的扇区,这种序列可偶然保存下来(图 2)。

2.1.2 Hu型

多发育于扇根主水道区,剖面上杂基支撑砾岩岩性特征均一,无粒度变化,底部具凸凹明显的强侵蚀面,顶部具或不具侵蚀面。前者属前期正递变序列顶部被后期碎屑流侵蚀形成,后者是在物源充足的条件

下短期碎屑流快速堆积且后期碎屑流改造形成(图 3)。

2.1.3 Cu型

该层组主要发育在近岸水下扇扇中辫状水道前缘和扇中前缘微相以及扇端。该类型又可分为渐进 Cu型和突进 Cu型层组。

2.1.3.1 渐进 Cu型

发育在扇中前缘微相以及扇端部位。层组下部由 2~3 m 厚的灰黑色厚层泥岩夹薄层的砾岩构成;层组上部由厚层的砾岩构成,层组内砂泥近于 1:1。该类型层组形成于短期湖平面缓速上升快速下降,物源供给相对不足时期(图 4)。

2.1.3.2 突进 Cu型

主要发育在近岸水下扇扇中辫状水道前缘部位。层组下部为 0.5~1.0 m 左右的灰黑色湖侵泥岩,向

积过程。准层序顶底界面均表现为湖泛面(图 6B)。

3.1.2 Cu—Cu型

一般发育在洪水密度降低后的较深水的沉积环境中,由 2~3 个 Cu 型层组构成,准层序下部的湖侵泥岩厚度较大,一般在 5~10 m 左右,上部的扇中前缘和扇端砂体沉积厚和厚度一般在 5~10 m 左右。构成准层序的各层组厚度,向上有所降低,但砂泥比

值增大(图 6A)。

3.1.3 Cu—Hu型

一般发育在近岸水下扇扇根部位,由 2~3 个 Cu 型层组和 Hu 型层组构成。准层序下部为 Cu 型层组,向上变为 Hu 型层组。准层序底部泥岩厚度较薄,厚度在 0.5~1.0 m 左右;上部厚层块状砾岩,一般在 10~15 m 左右(图 6D)。

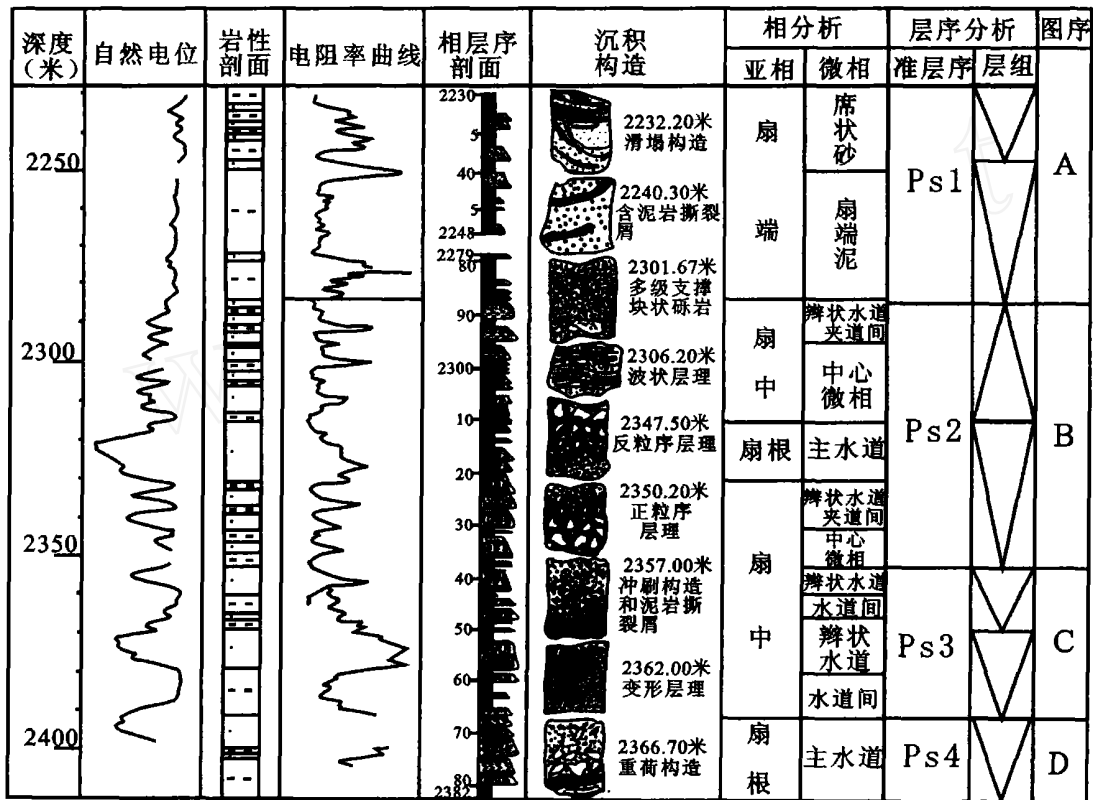


图 6 近岸水下扇准层序类型模式图

Fig 6 The model of parasequence in nearshore subaqueous fan

3.2 准层序界面特征

根据基准面旋回和可容空间变化原理,地层的旋回性是基准面相对于地表位置产生的沉积作用、侵蚀作用、沉积物过路形成的非沉积作用和沉积欠补偿造成的饥饿性乃在非沉积作用随时间发生空间迁移的地层响应^[19],因此,近岸水下扇沉积体系中准层序边界在地层记录中的表现形式随地理位置而变化:在扇根和扇中辫状水道部位,浅水沉积物直接覆于较深水沉积物之上,在准层序界面上通常可见弱的侵蚀冲刷现象;在扇中前缘地区,准层序界面位于向上变深的相序或相组合向水体逐渐变浅的相序或相组合的转化处,界面上下的岩石物理相为连续过渡型;

在扇端相域准层序界面表现为无沉积作用面。此外,当层序界面与准层序界面重合时,界面两侧岩石记录通常以相突变和界面下部的侵蚀冲刷为特征。

4 准层序对比

4.1 对比标志

对于正常发育的 Cu—Cu 型和 Cu—Fu 型准层序,湖泛面可作为对比界面,其下部发育湖侵稳定泥岩段可作为对比的标志层。从对坨 85 近岸水下扇沉积体的 4 个准层序的划分对比情况来看,其底部泥岩厚度一般在 10~15 m 左右,除扇根部位外,可在整个近岸水下扇沉积当中追踪对比,由岸线向湖盆方向

岩厚渐变增厚。在近岸水下扇扇根部位及扇中辫状水道部位,由于多期高密度洪流下切割作用,使得准层序边界表现为侵蚀冲刷面,稳定泥岩段沉积很薄或不发育;在这种情况下侵蚀冲刷面作为其对比标志。

4.2 对比模式

根据近岸水下扇不同类型准层序的形成机理,总结出了近岸水下扇沉积体系中准层序的划分对比规律。

4.2.1 相序递变对比模式

一期近岸水下扇准层序的形成和发育过程相当于一次洪水期间洪流向湖盆的进积过程,因此在平行于物源的方向,准层序的类型和相序从物源区到湖盆

发生有规律的变化(图7)。在扇根部位发育幅度变化很小 Cu—Hu型准层序,准层序底部为薄层泥岩或为大型的侵蚀冲刷面;至扇中部位,准层序底部侵蚀冲刷作用减弱泥岩厚度增大;至扇中前缘部位,准层序类型变为 Cu—Fu型和 Cu—Cu,准层序下部发育厚层的湖侵泥岩段开始发育并向湖盆方向渐变增厚;至扇端部位,变为厚层湖相泥岩段和薄砂层构成的 Cu—Cu型准层序。至此一期完整的近岸水下扇准层序发育完毕,下一期准层序叠加在前一期准层序之上并向岸退积,若干期准层序向岸退积叠加,就形成一个完整的近岸水下扇沉积体,该沉积体相当于一个退积式准层序组。

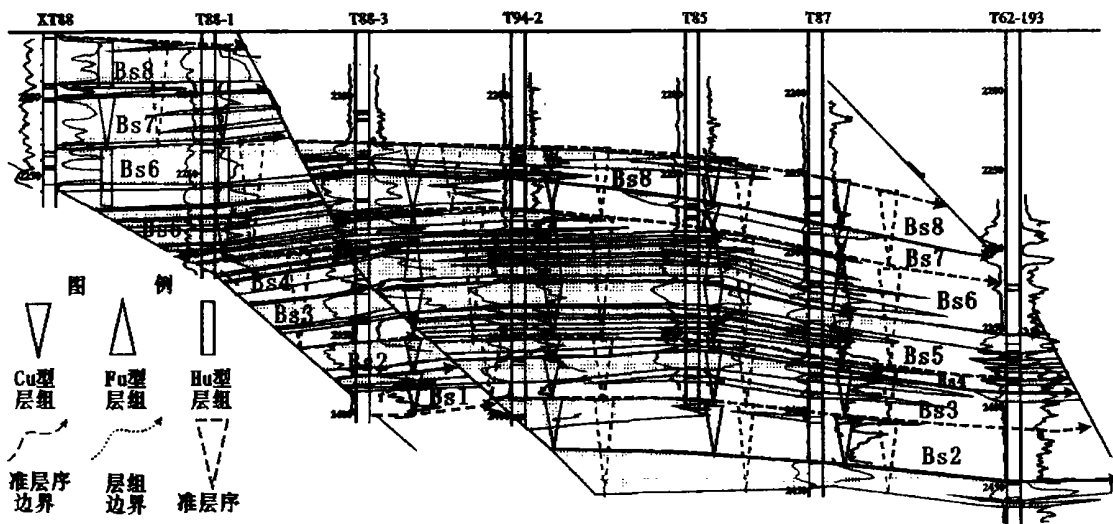


图 7 近岸水下扇准层序相序递变对比模式图

Fig 7 The comparison model of parasequence according to facies change in nearshore subaqueous fan

4.2.2 侵蚀叠置对比模式

在垂直物源方向上,尤其是在水道部位,由于多期洪流作用的侵蚀切割作用,使得形成于不同时期的砂体在垂向和平面上叠置连片叠置,给对比带来一定的困难,但是还是有规律寻的。在水道特别发育相互叠置的部位,其底界面为一侵蚀冲刷面,由此向两侧准层序底界的侵蚀冲刷面逐渐过渡为湖泛面,同时准层序下部的暗色泥岩厚度逐渐增大并趋于稳定(图8)。

5 层组的对比

5.1 对比标志

在近岸水下扇沉积体系中层组在正常情况下表现为粒度向上由细变粗,水体由深变浅的 Cu型层组,其顶底界面为比准层序更次一级湖泛面。通过对

坨 85 块 4 个准层序的层组划分和对比发现,每一个层组下部湖泛泥岩沉积单元厚度一般在 2~5 m 左右。但是在扇根和扇中的水道部位,下切作用使得湖泛泥岩厚度减薄或为一侵蚀冲刷面所替代,同时层组类型也变为 Fu型。

5.2 对比模式

针对近岸水下扇砂砾岩比较发育的特点,重点对发育有砾岩沉积的层组对比模式进行了研究,大致可总结为以下四种对比模式。

5.2.1 叠置砂体对比模式

由于沟道的冲刷作用,使得前期沉积顶部受到冲刷,随后又沉积新的砂体,在沟道内形成砂体叠置现象,两期或多期的砂体叠置在一起为砂体的对比带来很多困难。

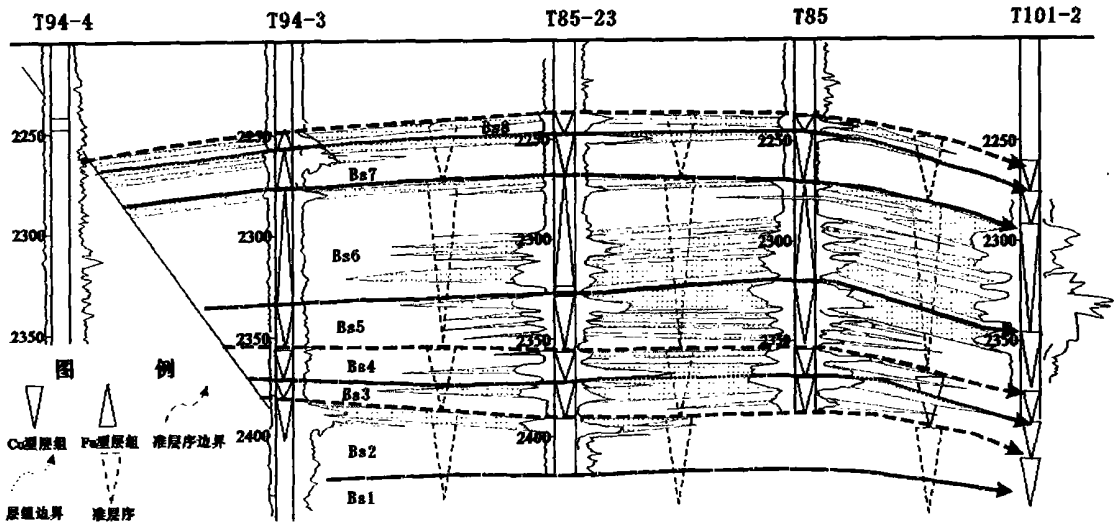


图 8 近岸水下扇准层序侵蚀叠置对比模式图

Fig 8 The comparison model of parasequence according to erosion and overstacking in nearshore subaqueous fan

沟道砂体叠加通常可划分为三种类型：间歇叠加，砂体间有泥岩隔开；连续叠加，叠加的砂体间无泥岩隔开，但砂体内部、岩石的粒度、物性在测井曲线上均有突变形态；侵蚀叠加或下切叠加（图 9-A），即上部沟道下切下部沟道造成上下沟道砂体叠加，表面上看起来象是一个砂体。在对比过程中，前两者通过岩性与电性特征的变化可以比较容易地区分出来，对于后者，电性上区别不明显，划分困难，但是由于侵蚀切割，上部砂体的底部常有底冲刷或泥砾出现，冲刷面上下砂体粒度发生变化、或有很薄的泥质夹层出现。这些变化，往往在自然电位、微电极和感应等测井曲线上有所反映，从而“劈层”常依照下列原则进行，自然电位、微电极和感应测井曲线上幅度变化的位置，砂体的横向变化趋势、沟道的迁移方向均为考虑的方面。

5.2.2 相变对比模式

水下扇沉积的沟道与沟道间、沟道边，扇根与扇中、扇中与扇端的相变地区，常造成层组内部单砂体对比的困难，对比时根据湖泛泥岩厚度渐变原则，同时考虑砂体的厚度变化与砂体的尖灭情况进行对比（图 9-B）。

5.2.3 薄砂层对比模式

厚度小于 2 m 的薄砂体，常分布于扇中沟道间或扇端部位，在横向上分布不稳定。可根据期间的薄泥岩层，将它们与厚的砂层分开，进行合理的对比（图 9-C）。

5.2.4 相似渐变对比模式

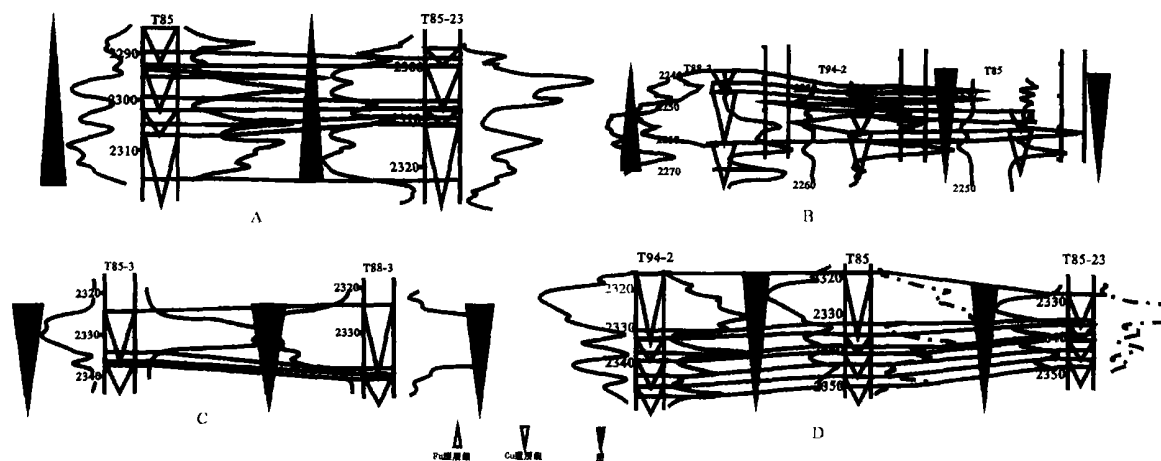
对于相距不远，沉积环境微环境保持不变的井的层组内部单层的划分和对比，可根据层组内部组构的相似性和稳定泥岩段渐变原则来进行划分和对比（图 9-D）。

6 结论

(1) 在近岸水下扇沉积体系中划分出 Fu 型（包括水近源、远缘）、Cu 型（包括渐进、突进）和 Hu 3 种层组类型；根据在一个准层序级别的基准面变化过程中，不同类型层组的叠置方式，可将近岸水下扇沉积体系中的准层序类型划分为 Cu—Fu 型、Cu—Cu、Cu—Hu 型 3 种类型。

(2) 近岸水下扇沉积体系在平行于物源的方向上，准层序的类型从物源区到湖盆发生有规律的变化：在扇根部位发育幅度变化很小 Cu—Hu 型准层序，准层序底部为薄层泥岩或为大型的侵蚀冲刷面；至扇中部位，准层序底部侵蚀冲刷作用减弱泥岩厚度增大；至扇中前缘部位，准层序类型变为 Cu—Fu 型和 Cu—Cu，准层序下部发育厚层的湖侵泥岩段开始发育并向湖盆方向渐变增厚；至扇端部位，变为厚层湖相泥岩段和薄砂层构成的 Cu—Cu 型准层序。

(3) 在垂直物源方向上，尤其是在水道部位，由于多期洪流作用的侵蚀切割作用，使得不同时期的砂体在垂向和平面上叠置连片叠置，在水道特别发育相互叠置的部位，其准层序的底界面为一侵蚀冲刷面，



A 侵蚀叠加对比模式 A The model of overstacking sandstone B 相变对比模式 B The model of facies change
C 薄砂层对比模式 C The model of thin sandstone D 相似渐变对比模式 D the model of similar change of lithology

图 9 层组对比模式

Fig 9 The comparison model of bed set

由此向两侧准层序底界的侵蚀冲刷面逐渐过渡为湖泛面,同时准层序下部的暗色泥岩厚度逐渐增大并趋于稳定。

(4) 针对近岸水下扇砂砾岩比较发育的特点,重点对发育有砾岩沉积的层可总结为侵蚀叠置、相变对比、薄砂层对比、相似渐变四种对比模式。

参考文献 (References)

- 孙永传. 水下冲积扇——一个找油的新领域. 石油实验地质, 1980, 2(3): 32~41 [Sun Yongchuan. Subaqueous-A new field of searching petroleum. *Petroleum Geology & Experiment*, 1980, 2(3): 32~41]
- 董荣鑫, 苏美珍. 近岸水下冲积扇相特征及实例. 石油实验地质, 1985, 7(4): 294~302 [Dong Rongxin, Su Meizhen. The facies characteristics and example of nearshore subaqueous. *Petroleum Geology & Experiment*, 1985, 7(4): 294~302]
- 吴崇筠. 湖盆砂体类型. 沉积学报, 1986, 4(4): 1~24 [Wu Chongyun. Sandbodies in lake basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1986, 4(4): 1~24]
- 曾洪流, 张万选, 张厚福, 等. 廓固凹陷沙三段主要沉积体的地震相和沉积相特征. 石油学报, 1988, 9(2): 12~18 [Zeng Hongliu, Zhang Wanxuan, Zhang Houfu, et al. Characteristics of seismic and depositional facies of main depositional bodies in Member 3 of Shahejie Fm. in Langgu depression. *Acta Petrolei Sinica*, 1988, 9(2): 12~18]
- 端木合顺, 朱蓬芳. 酒西盆地地下白垩统下沟组重力流水下扇沉积. 沉积学报, 1990, 8(2): 75~85 [Duamu Heshun, Zhu Lianfang. Gravity flow submerged fan deposits of lower Cretaceous Xiagou Formation, Jiuxi basin, Gansu. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(2): 75~85]
- 徐怀大, 等. 地震地层学解释基础. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990 [Xu Huanda. The Interpreting Base of Seismic Stratigraphy. Wuhan: China Geological University Publishing House, 1990]
- 张金亮, 沈凤. 乌尔逊凹陷大磨拐河组近岸水下扇储层特征. 石油学报, 1991, 12(3): 25~35 [Zhang Jinliang, Shen Feng. Characteristics of nearshore subaqueous fan reservoir in Danguaihe Formation, Wuerxun depression. *Acta Petrolei Sinica*, 1991, 12(3): 25~35]
- 周书欣. 湖泊沉积体系与油气. 北京: 科学出版社, 1991 [Zhou Shuxin. Lacustrine Sedimentary System and Petroleum. Beijing: Science Press, 1991]
- 张萌, 田景春. 近岸水下扇的命名、特征及其储集性. 岩相古地理, 1999, 19(4): 42~52 [Zhang Meng, Tian Jinchun. The nomenclature, sedimentary characteristics and reservoir potential of nearshore subaqueous fans. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1999, 19(4): 42~52]
- 孙龙德. 东营凹陷北部斜坡带沙三—四段砂砾岩体与油气聚集. 沉积学报, 2003, 21(2): 278~282 [Sun Longde. Sandstone-conglomerate bodies in Sha 3-4 members and hydrocarbon accumulation in northern slope of Dongying sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 278~282]
- Galloway W E. Siliciclastic slope and base of slope depositional systems: component facies, stratigraphic architecture and classification. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(4): 569~595
- Harold G, Marcus R. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(5): 792~822
- 袁向春, 钟建华, 高喜龙, 等. 埕岛东斜坡水下扇沉积特征. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 146~151 [Yuan Xiangchun, Zhong Jianhua, Gao Xilong, et al. Study of sedimentary characteristics of subaqueous fan in eastern slope of Chengdao. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(2): 146~151]
- 赵永军, 王平在, 张卫海. 水下扇沉积过程数学模拟方法. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3): 25~27 [Zhao Yongjun, Wang Pingzai, Zhang Weihai. The mathematic simulation-method of sedimentary

- process of subaqueous fan *Petroleum Geology & Exploitation of Daqing*, 2001, 20(3): 25 ~ 27]
- 15 刘家铎,田景春,何建军,等. 近岸水下扇沉积微相及储层的控制因素研究—以沾化凹陷罗家鼻状构造沙四段为例. *成都理工学院学报*, 1999, 26(4): 365 ~ 369 [Liu Jiaduo, Tian Jinchun, He Jianjun, *et al*. A study of sedimentary microfacies and controlling factors of the reservoirs of the nearshore subaqueous fan-taking the fourth member of the Shahejia formation in the Luoia nose, Zhanhua Depress for an example. *The Journal of Chengdu University Technology*, 1999, 26(4): 365 ~ 369]
- 16 刘招君. 湖泊水下扇沉积特征及影响因素—以伊通盆地莫里青断陷双阳组为例. *沉积学报*, 2003, 21(3): 148 ~ 154 [Liu Zhaojun. Lacustrine subaqueous fan sedimentary characteristics and influencing factors—A case study on Shuangyang Formation in Maoliqing fault subsidence of Yitong basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 148 ~ 154]
- 17 董东. 断陷湖盆陡坡带碎屑流沉积单元的沉积序列和储层特征—以东营凹陷永安镇地区为例. *沉积学报*, 1999, 17(4): 566 ~ 571 [Dong Dong. On vertical sequence and reservoir characteristics of alluvial debris flow sedimentary unit in fault basins, Eastern China-based on a case study of Yong-an alluvial fan, Dongying basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(4): 566 ~ 571]
- 18 Mutti E, Nomark W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: problems and concepts. In: Leggett J K, Zuffa G G, eds. *Deep water clastic deposits: models and case histories* 1987, 21. Fig: 1 ~ 38
- 19 罗立民. 河湖沉积体系三维高精度层序地层学研究. 北京:地质出版社, 1997. 17 ~ 63 [Luo Lining, *Three Dimension High Resolution Sequence in River-lake Sedimentary System*. Beijing: Geological Publishing House, 1997. 17 ~ 63]

High-Resolution Sequence Research on Nearshore Subaqueous Fan System

ZHAO Jun-qing¹ JI You-liang² XIA Bin¹ REN Yong-jun³ ZHANG Shan-wen⁴

1(Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry & South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640) 2(Institute of Earth and Ocean Science, Tongji University, Shanghai 200092)
3(Institute of Earth Resource and Information, University of Petroleum China, Dongying Shandong 257061)
4(Shengli Oil Field Limited Corporation, SINOPEC, Dongying Shandong 257015)

Abstract This paper discusses the high-resolution sequence in nearshore subaqueous fans sedimentary system, exemplifying T85 nearshore subaqueous fans of the third middle member of Shhejie Formation in Shengbei fault's downthrown side of Dongying depression. The research shows that the high-resolution sequence stratigraphic units are divided into parasequence set, parasequence, bed set and bed in the fan-delta. Types and comparison methods of parasequence and bed set are especially studied. The type of bed set is divided into Fu, Cu and Hu, and parasequence into Cu-Fu, Cu-Fu and Cu-Hu. Two comparison methods of parasequence are provided that are facies change paralleling to source area and incision perpendicular to source area and four models of bed set which are correlation of overstacking, correlation of facies change, correlation of thin sandstone bed and correlation of similar changing of lithology.

Key words nearshore subaqueous fan, high-resolution sequence stratigraphy, parasequence, bed set, the third middle member of Shahejie Formation