

滦平上侏罗统一白垩统扇三角洲露头 层序地层学研究

郭建林^{1,2} 贾爱林² 何东博² 唐俊伟² 纪友亮³

(1.中国地质大学能源学院,北京 100083;2.中国石油勘探开发研究院,北京 100083;3.同济大学,上海 200092)

摘要:在油田开发中,地层划分与对比是十分重要的研究内容,从油田开发到调整等各个阶段,对地层划分与对比的要求越来越高。但油田地下资料是有限的,第一,当井网密度达到一定程度时,不是可以无限制加密的;第二,油田所能获取的占绝对优势的地下信息是通过测井,而测井分辨率又是有限的。所以,高分辨率层序地层学被广泛应用和发展的过程中,野外露头研究是必不可少的。笔者以露头资料为研究对象,对露头区扇三角洲高频层序、准层序、准层序组的剖面识别标志进行了总结,定量研究了不同成因类型砂体的分布规律、几何形态、内部结构和非均质性。把高分辨率层序界面的露头标志向井下岩心和测井信息进行转化,并在露头研究的基础上总结层序地层对比的一般原则。

关键词:露头;层序地层学;扇三角洲

中图分类号:P539.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)04-0628-08

中国东部各油田所处的盆地,以陆相碎屑岩沉积为主,地层的层状分布特征明显,地层划分与对比难度大,而正确的或接近实际的地层划分对储量计算、开发层系划分、注采系统匹配及注采能力的设计都可以起到一定的指导作用^[1]。中国在层序地层学的研究虽然起步稍晚,但由于中国油田储层沉积的特殊性,使陆相碎屑岩储层层序划分很有特色^[2]。

进行层序地层学研究 with 层次界面的划分、对比,建立不同级次的地层结构单元,是各级储层建筑结构分布规律研究和不同规模尺度储层非均质性研究的前提和基础^[6-7]。笔者通过开展滦平上侏罗统一白垩统扇三角洲露头层序地层学和层次界面研究,对露头区扇三角洲准层序组、准层序、层组、单层的边界进行横向追踪,对其识别标志进行总结;并把不同地层单元界面的露头标志向井下岩心和测井信息进行了转化^[8]。

1 露头层序界面和层序结构特征

露头剖面位于滦平县以西,呈北西-南东向延伸,长 1.3 km,属于扇三角洲沉积环境,通过露头层序地层学研究共划分出 35 个层组、14 个准层序和 4 个准层序组。由于该区露头出露不全,因此层序界面分布很局限。

1.1 准层序组

研究露头准层序组界面为滨浅湖的洪泛面,准层序组界面上下为不同的叠加模式,发育进积和加积两种准层序组,间断面处发育古土壤,电镜能谱的特征显示古土壤以高岭石为主,湖泛面处发育碳酸盐岩层(图 1)。

1.2 准层序

研究露头准层序边界是湖泛面及其对应的界面,准层序是以湖泛面及其对应的界面为界的一组岩层或岩层组组成。准层序边界在该区有如下特征:

扇三角洲平原地区准层序界面表现为侵蚀,在扇三角洲前缘地区准层序界面表现为湖泛面,界面之上有上超,界面上下层组的叠加形式有明显变化,在扇三角洲平原地区准层序界面有植物根化石。

该区准层序可以划分出 3 种类型:(1)向上变粗准层序 CU;(2)向上变细再变粗准层序 FU—CU;(3)由细变粗、再由细变粗准层序 CU—CU,反映的水体都是向上变浅(图 2)。

根据上述特征,剖面共划分出 14 个准层序。由于横向相变,同一时期的准层序,其类型在横向上是变化的。同样,由于横向相变,湖泛面的岩性特征在横向上也是变化的,在扇三角洲前缘地区为暗色泥岩、碳酸盐岩,而在扇三角洲平原

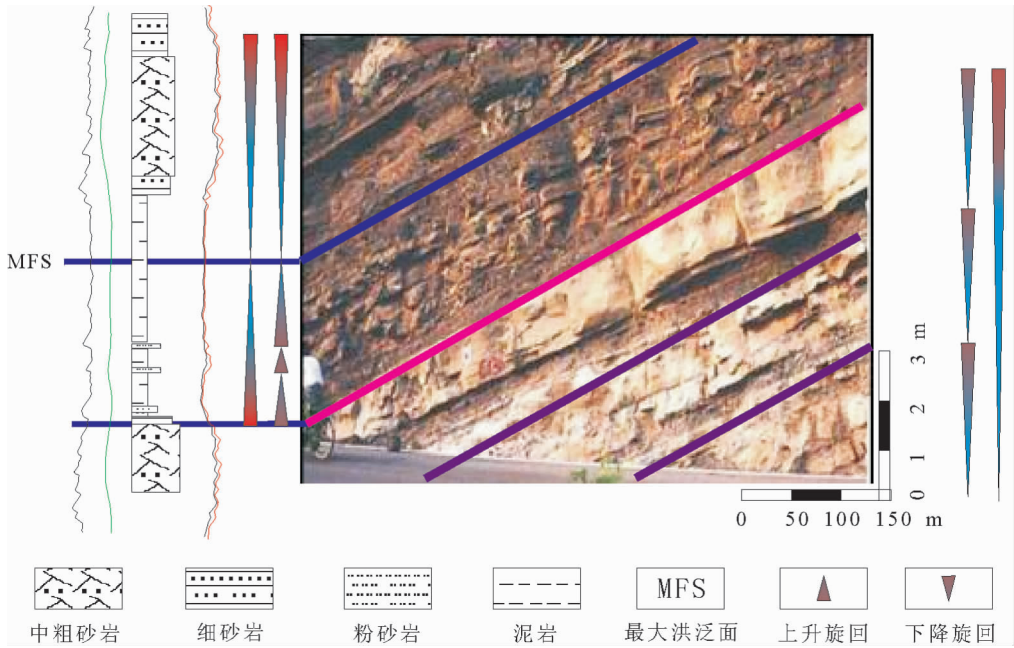


图 1 滦平扇三角洲露头准层序组界面

Fig.1 Boundary of parasequence sets of the Luanping fan-delta outcrop

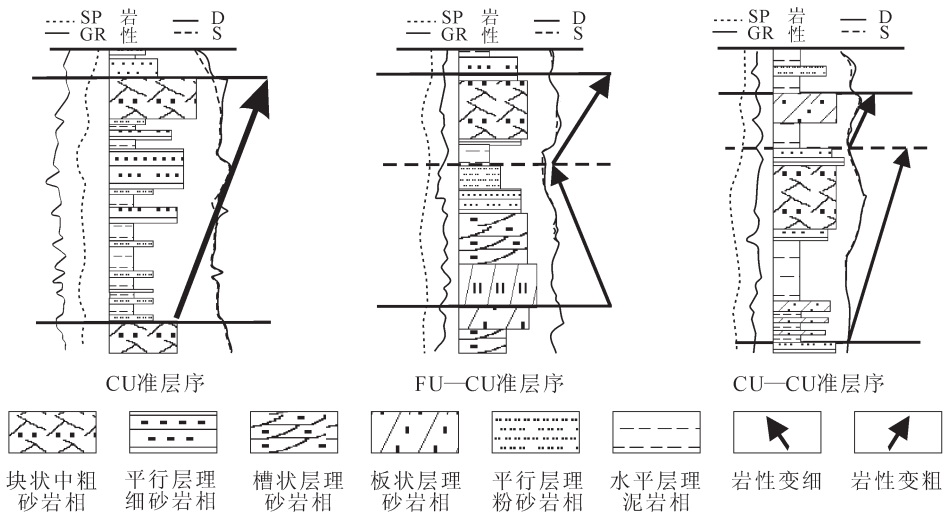


图 2 滦平扇三角洲露头准层序的 3 种类型

Fig.2 Three types of parasequence of the Luanping fan-delta outcrop

地区为粉、细砂岩。

1.3 层组

研究露头层组边界一般为无沉积面,在扇三角洲前缘地区层组边界为 10 cm 以上的暗色泥岩,横向延伸可达数百米。此次在滦平盆地上侏罗统—下白垩统的研究中,在浅湖、半深湖相的碎屑岩夹黑色泥岩相发现了各种恐龙脚印,表明

这些深湖、半深湖相泥页岩在沉积之后,曾经暴露出水面,说明湖平面变化频繁,在枯水期,湖平面下降,深湖—半深湖相黑色泥岩暴露出水面,大量恐龙经过此处到低洼处喝水,留下脚印。

研究露头层组有 2 种类型:(1)向上变粗层组, CU;(2)向上变粗—变细层组, CU-FU。根据上述层组的识别标志,在每

个准层序中,可识别出3个以上的层组,研究露头剖面上共划分出35个层组。该层组边界限定的地质体为河道复合体,往往是多期河道叠置而成的。由于分流河道的不断改道,层组的厚度在横向上可发生很大的变化,且由于湖平面的下降,对下伏层组有侵蚀现象(图3)。

1.4 单层

研究露头单层边界为限定单河道、天然堤、决口扇的界面。在露头剖面上,该界面往往被较高级别的界面所截蚀,其延伸一般为20~100 m(图4)。

从露头剖面的测量可以看出,10 cm以下的隔夹层在电性上不能识别,且分布很不稳定。10 cm以上的砂层才能在横向上追踪几十米,甚至上百米(表1)。

2 层序演化特征及其对砂岩分布规律的控制

2.1 层序演化特征

研究露头从下到上呈现为湖水面由上升到下降的完整旋回,最大湖泛面位置相当于第二准层序组的底部泥岩。伴随构造活动的不同,下部第四—第三准层序组为加积型沉积组合,相当于长期基准面上升半旋回;第二—第一准层序组为进积型沉积组合,相当于长期基准面下降半旋回(表2)。

2.2 层序演化对砂体分布规律的控制

对于一个完整的扇三角洲沉积旋回,辫状河砂体主要分布在高位体系域的扇三角洲平原,相当于基准面长期下降半旋回的晚期。近岸水道主要发育于湖退体系域,相当于基准

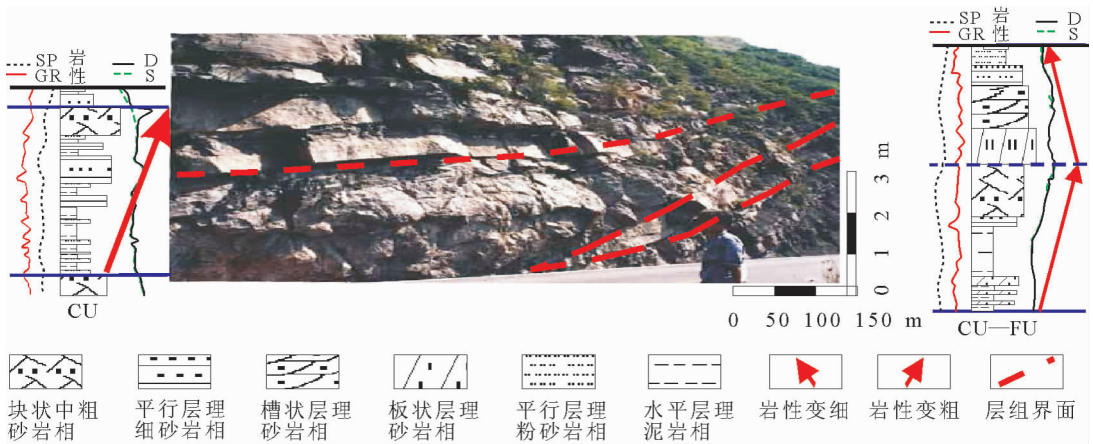


图3 滦平扇三角洲露头层组界面

Fig.3 Boundary of layer sets of the Luanping fan-delta outcrop

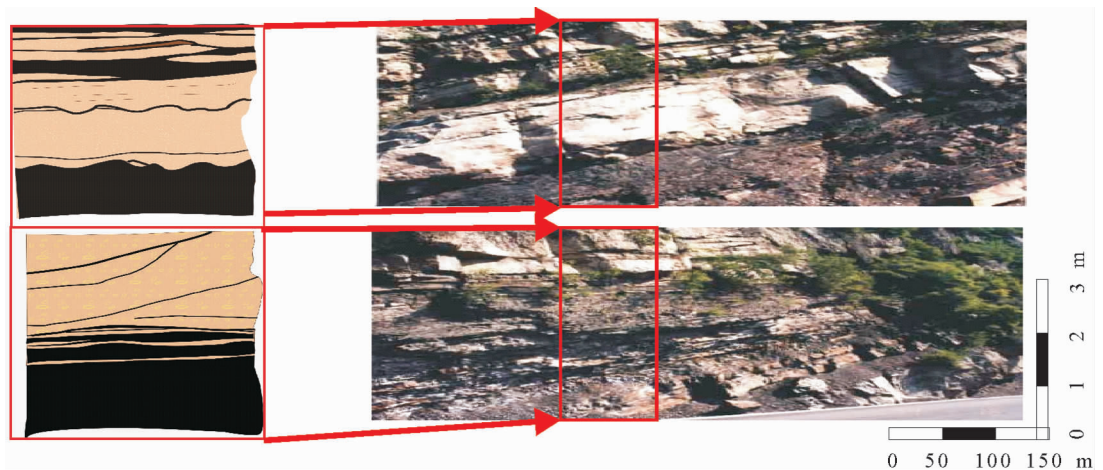


图4 滦平扇三角洲露头单层特征

Fig.4 Characteristics of single layers of the Luanping fan-delta outcrop

表 1 扇三角洲露头不同级别地层单元延伸范围和可比性

Table 1 Extension scope and comparison of stratigraphic units of different ranks in the Luanping fan-delta outcrop

级别	地层单元	伸向延伸	可比性
1	层序	10~100 km	剖面上可区域追踪, 电测曲线可区域对比, 地震可识别
2	准层序组	3~15 km	剖面上可区域追踪, 电测曲线可区域对比, 地震可识别
3	准层序	3~10 km	剖面上可追踪, 油田范围内可电测对比, 三维地震可识别
4	层组	50~300 m	剖面上可对比, 小井距条件下可对比
5	单层	20~100 m	剖面上可识别、对比, 井下可识别, 但对比困难
6	纹层组	5~10 m	剖面上可识别, 井下不能识别与对比
7	纹层	2~5 m	剖面上可识别, 井下无法识别与对比

表 2 基准面旋回与砂体发育关系

Table 2 Relationship between the base-level cycle and sandbody types

长期旋回	中期旋回	准层序组	准层序	沉积相	辫状水道	近岸水道	远岸水道	溢岸沉积	席状砂	天然堤	滑塌沉积	体系域
		一	1	平原	6				8			
2	5	2	4		3	4	5					
二	3	平原				1	4				湖退体系域	
	4	近前缘				3						
	5			5	2		3	1				
	6	一远前缘		1	8			1				
	7	湖泊		5	1		1					
	8			2				1				
三	9	远前缘					3				湖侵体系域	
	10						3					
	11	一湖泊			5		2					
	12		1	4		1						
四	13	前缘				2		3		1	低位体系域	
	14			1	2		3					

注: 数字表示不同沉积微相中砂体发育的个数。

面长期下降半旋回的早—中期。溢岸沉积主要对应基准面长期下降半旋回的晚期, 水道的侵蚀能力强, 易发生溢岸沉积。席状砂主要发育于湖侵体系域, 基准面上升, 湖水作用能力加强, 对原沉积砂改造形成席状砂。滑塌沉积主要分布于低位体系域(表 2)。

层序旋回特征对于砂体规模的控制不仅体现在砂体类型的变化上, 即使对于同一种沉积相类型的砂体, 处于不同的层序旋回位置, 其砂体的分布模式也会存在一定的差异。通过统计整个剖面所有远岸水道砂体的宽度和厚度(图 5), 宽度和厚度仅略呈正相关关系, 相关性差, 宽厚比最大为 226.30, 最小为 22.52, 平均为 85.12, 宽厚比变化级差大。所以在地质建模中虽然可以给出宽厚比的变化范围, 但对宽厚比

变化的实现却缺乏规律性的控制, 或者说是对该种砂体宽厚比变化的模拟只能得到数学上的随机实现, 而缺乏更为精细的地质规律的指导。

通过引入基准面旋回分析发现, 在整个旋回变化过程中, 远岸水道的厚度和宽厚比的变化与基准面旋回的变化有很好的相关关系(图 6)。在基准面长期下降半旋回的晚期厚度较大, 这是因为该时期河道的下切能力强, 沉积物补给充足, 易形成较厚的河道砂沉积。而宽厚比随基准面旋回的变化规律更为明显, 随可容纳空间的增大, 宽厚比增大。在长期基准面旋回由上升到下降转换的高可容纳空间时期宽厚比值大, 而在基准面下降的晚期和上升的初期宽厚比值小。这是因为在扇三角洲环境下高可容纳空间时期岸线向陆推进,

河流注入湖盆水体时阻力增强，河道水流变得更加分散，河道变宽；而在低可容纳空间时期湖盆水体萎缩，河道作用相应增强，水流集中，河道较窄。所以，在地质建模中引入层序地层学规律和认识作为限制条件，可以对砂体类型和砂体规模的随机实现进行更加有效地控制，使模拟结果更加符合地质规律和实际情况。

3 层序地层单元向地下电性特征转化及划分对比原则

3.1 岩性与电性划分地层单元的区别

3.1.1 利用自然电位信息识别地层单元的边界

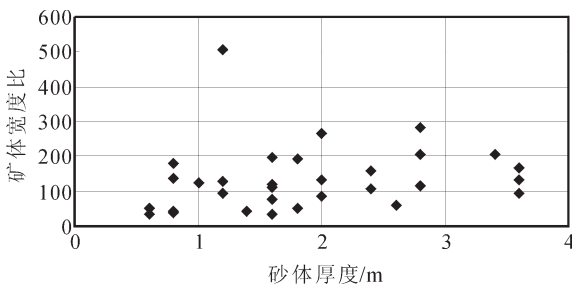


图5 远岸水道宽厚比

Fig. 5 Width/thickness ratio of distal channel sandbodies

利用自然电位信息最容易识别的是准层序边界和层组边界，在自然电位曲线上，准层序边界表现为几十米的漏斗型包络曲线的顶边界，层组的边界在自然电位曲线上表现为5 m左右的漏斗型及钟型曲线的顶边界。

3.1.2 利用多种电测信息识别准层序组边界

在扇三角洲前缘地区，在自然电位曲线上，准层序组边界表现为几百米的漏斗型包络曲线的顶边界，该界面处自然伽马值表现出许多尖峰。但在扇三角洲平原地区，在自然电位曲线上，准层序组边界表现为几百米的包络曲线漏斗形不明显，原因是平原相中，杂基含量高，其幅度大量下降，但可以根据电阻率的上升来判断准层序组的顶界。

根据露头区滦平1井和滦平2井的地层单元的划分结果来看，利用野外露头资料和岩心资料划分出的地层单元的边界与单纯根据电性资料划分出的地层单元的边界不一致。其原因是：野外露头资料和岩心资料划分出的地层单元的边界是横向追踪出来的，很准确；而根据电性资料划分出的地层单元的边界，仅仅是根据电性的旋回性划分出的。因此根据电性划分地层单元时，必须结合多个剖面，划分和对比同时进行。

3.2 转化图版的建立

为了约束地层划分和对比，确定地层划分与对比原则，需要对野外露头剖面进行电性转化。

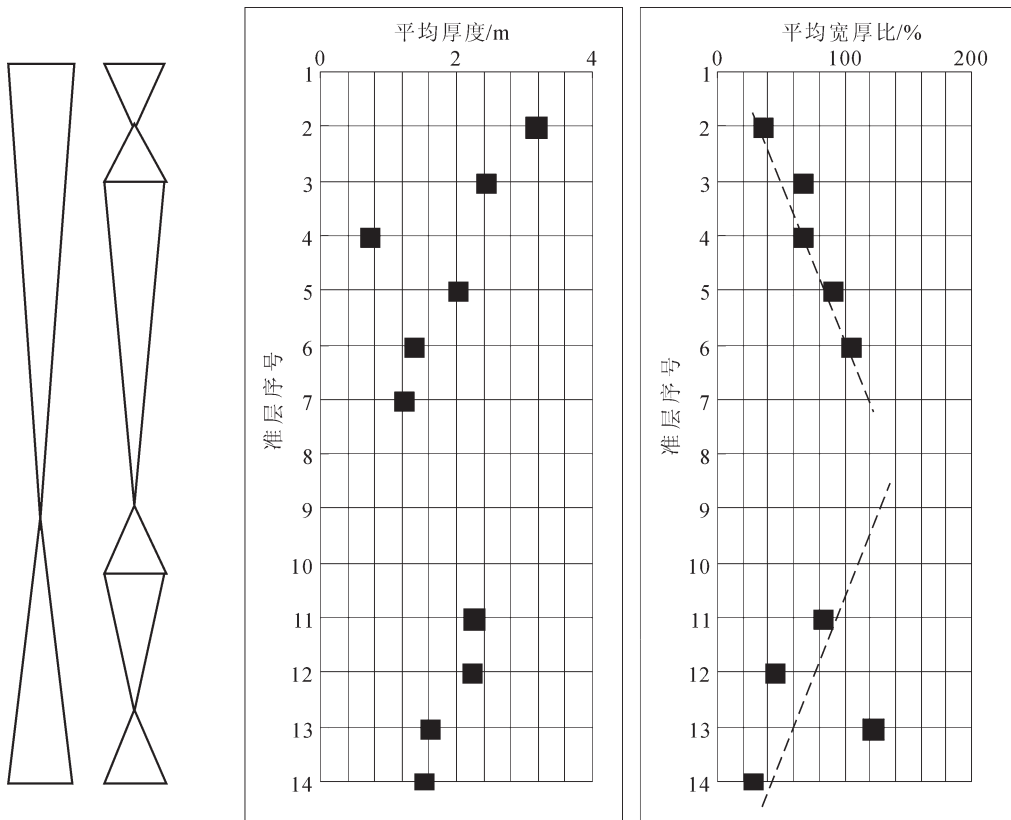


图6 远岸水道宽厚比随基准面旋回的变化

Fig.6 Relationship between the base-level cycle and width/thickness ratio of distal channel sandbodies

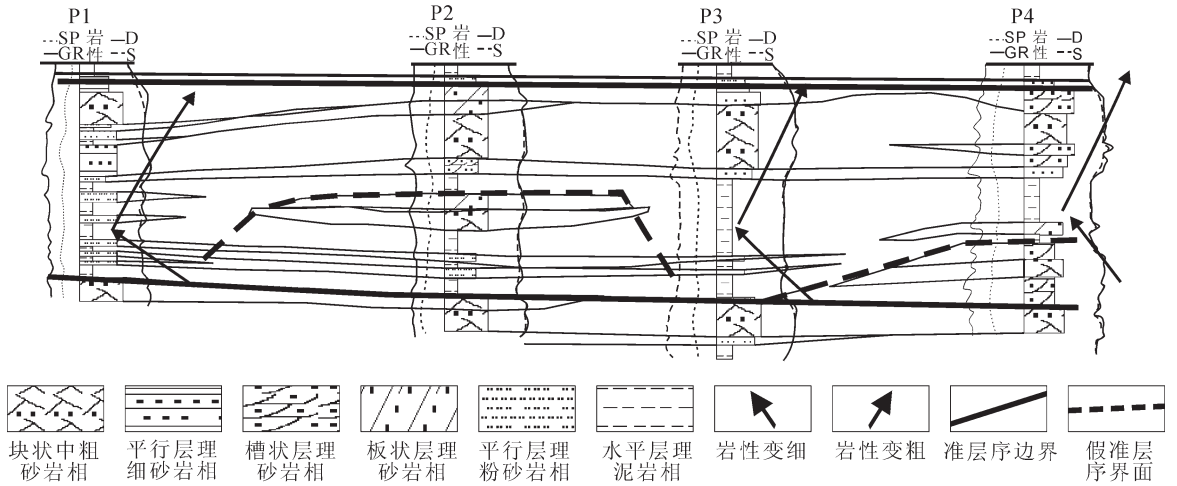


图 7 假准层序合并原则(厚度原则)

Fig.7 Principle of merging of pseudo parasequences (thickness principle)

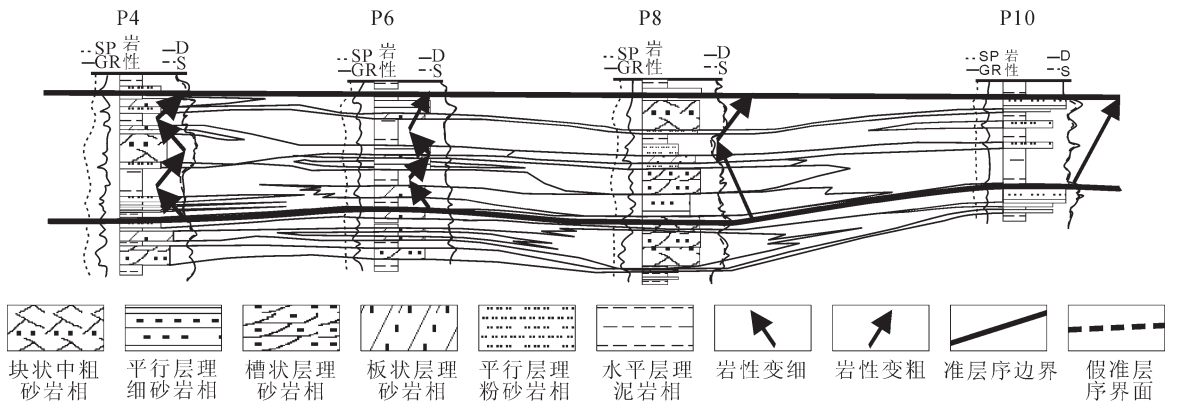


图 8 准层序类型横向变化原则

Fig.8 Principle of lateral variation of parasequence types

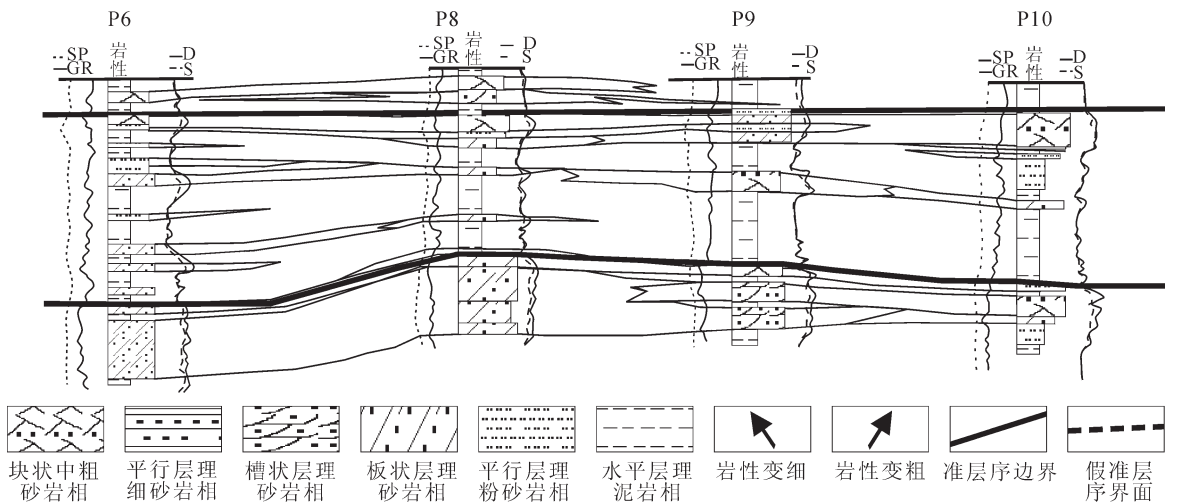


图 9 单层对比时的泥岩厚度渐变原则

Fig.9 Principle of thickness gradation of mudstone in a comparison of single mudstone layers

依据滦平 1 井和滦平 2 井的岩性、岩层厚度、粒度、杂基含量与电性(自然电位、自然伽马、深、浅侧向)的统计关系得出岩电关系图版,对野外露头剖面进行了电性转化。建立了关系图版:(1)砂砾岩厚度与深感应电阻率成正比关系;(2)砂砾岩厚度与浅感应电阻率成正比关系;(3)砂砾岩厚度与中感应电阻率成正比关系;(4)砂砾岩厚度与自然伽马无明显关系;(5)砂砾岩厚度与自然电位成正比关系,个别杂基含量较高的点除外。

3.3 划分对比原则

在实际的剖面划分与对比时,首先进行了岩电转化,然后根据电性进行地层单元的划分和对比,划分对比结果与沿露头剖面追踪出的结果对比,两者之间有误差。据此制定出对比规则,以约束地层划分和对比的随机性。

(1)假准层序的合并原则:在距离不大的范围内,划分出的准层序厚度不应差别太大,若其厚度差别为倍数时,应按厚度均衡原则进行合并(图 7)。

(2)准层序类型横向变化原则:随着相的横向变化,准层序类型也在发生变化(图 8)。

(3)单层对比时,泥岩厚度的渐变原则(图 9)。

(4)若地层单元的厚度变化出现异常时,考虑深切谷和浅切谷的存在。

根据上述原则对多条剖面进行地层划分和对比后,与实际剖面十分吻合。

4 结 语

层序地层划分要紧紧围绕等时性这一原则开展工作,层序和准层序(包括准层序组)是勘探阶段进行地层划分的两级重要单元,层组界面是开发及调整中要准确掌握的层序界面。在实际工作中,根据工作对象和目的的不同,一定要明确重点界面的特征。另外层序地层划分一定要与体系域的建立结合起来,这样才能从成因机制上了解、认识地质体的规模、形态、分布规律以及非均质性油田实际生产中关心的问题^[10]。

参考文献(References):

- [1] 赵翰卿. 对储层流动单元研究的认识与建议[J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3), 8-10.
Zhao Hanqing. Recognition and advice on the study of reservoir flow unit [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 20(3), 8-10(in Chinese with English abstract).
- [2] 王乃举, 等. 中国油藏开发模式总论[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
Wang Naiju, et al. *General Reservoir Development Models in China* [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1999(in Chinese).

- [3] 董国臣, 孙景民, 张守鹏, 等. 廊固凹陷古近系层序地层特征及油气储集规律探讨[J]. 中国地质, 2002, 29(4):397-400.
Dong Guochen, Sun Jingmin, Zhang Shoupeng, et al. Paleogene sequence stratigraphy and oil-gas accumulation in the Langgu subdepression [J]. *Geology in China*, 2002, 29 (4):397-400 (in Chinese with English abstract).
- [4] 赵永刚, 陈景山, 雷卞军, 等. 川西邛崃县白马庙气田上侏罗统蓬莱镇组高分辨率层序地层分析[J]. 中国地质, 2005, 32 (4):674-681.
Zhao Yonggang, Chen Jingshan, Lei Bianjun, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Baimamiao gas field, Qionglai County, western Sichuan [J]. *Geology in China*, 2005, 32(4):674-681(in Chinese with English abstract).
- [5] 倪超, 纪友亮. 饶阳凹陷古近系沙河街组层序地层分析及沉积体系研究 [J]. 中国地质, 2006, 33(1):193-200.
Ni Chao, Ji Youliang. Sequence stratigraphy and sedimentary system of the Paleogene Shahejie Formation in the Raoyang subbasin [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (1):193-200 (in Chinese with English abstract).
- [6] 邓宏文, Timothy A C. 高分辨率层序地层学[M]. 北京:地质出版社, 2002.
Deng Hongwen, Timothy A C, et al. *High resolution sequence stratigraphy* [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2002(in Chinese).
- [7] 靳松, 朱筱敏, 钟大康. 扇三角洲高分辨率层序地层对比及砂体分布规律[J]. 中国地质, 2006, 33(1):212-220.
Jin Song, Zhu Xiaomin, Zhong Dahang. High-resolution sequence stratigraphic correlation of fan deltas and distribution characteristics of sandbodies [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (1):212-220 (in Chinese with English abstract).
- [8] 贾爱林. 扇三角洲储层露头精细研究方法 [J]. 石油学报, 2000, 20 (4),105-108
Jia Ailin. Approach for detailed study of reservoir outcrop [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 20 (4),105-108 (in Chinese with English abstract).
- [9] 穆龙新, 贾爱林. 扇三角洲沉积储层模式及预测方法研究[M]. 北京:石油工业出版社, 2003.
Mu Longxin, Jia Ailin, et al. *Reservoir Models and Prediction Methods for Fan-delta* [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2003 (in Chinese).
- [10] 穆龙新, 贾爱林, 等. 储层精细研究方法——国内外露头储层和现代沉积及精细地质建模研究[M]. 北京:石油工业出版社, 2000.
Mu Longxin, Jia Ailin, et al. *Approach for Detailed Study of Reservoir-Outcrop Reservoir & Modern Deposit around the world and Geological Modeling* [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2000(in Chinese).

Sequence stratigraphy of Upper Jurassic–Lower Cretaceous fan–delta outcrops in Luanping

GUO Jian–lin^{1,2}, JIA Ai–lin², HE Dong–bo², TANG Jun–wei², JI You–liang³

(1. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;*

2. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;*

3. *Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: Stratigraphic division and correlation are the basic and very important content of study during oilfield development. In various stages from oilfield development to adjustment, higher and higher requirements are set for the stratigraphic division and correlation. However, the underground information is limited in a real oil field. Firstly, when the well pattern density reaches a certain level, infill wells are not unrestricted. Secondly, the overwhelming majority of underground information is obtained by well logging, but the resolution of log data is limited. Therefore, during the wide application of high–resolution sequence stratigraphy, outcrop research is essential. Based on actual fan–delta outcrops, the authors have summarized the indicators of recognizing the high–frequency sequences, parasequences and parasequence sets in the fan delta of the outcrop area, quantitatively studied the distribution characteristics, geometry, internal structure and heterogeneity of sandbodies of different genetic types, transformed the outcrop indicators of the high–resolution sequence boundaries into underground core and log information and finally summed up general principles of sequence stratigraphic correlation on the basis of the outcrop research.

Key words: outcrop; sequence stratigraphy; fan delta

About the first author: GUO Jianlin, male, born in 1973, engineer, mainly engages in the study of petroleum development; E–mail: guojianl@petrochina.com.cn.