

文章编号: 1000-0550(2013)05-0798-09

深水湖盆沉积砂体的层序地层分析

——以四川侏罗系为例

吴因业 张天舒 陶士振 冯荣昌

(中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院 北京 100083)

摘要 层序地层学方法标志着沉积地质学最新的一次革命,作为多学科的方法融合,它把自源作用(来自沉积体系内部)和异源作用(来自沉积体系外部)分析,形成了统一模式来解释沉积盆地的演化和地层结构,并在油气勘探中得到广泛应用,这对于减少储层预测风险尤其有效。深水湖盆沉积砂体主要有三角洲前缘向深水斜坡的进积砂体、重力流砂体包括浊积水道砂体、浊积扇砂体和碎屑流砂体。非水道化的浊积砂体分布与盆地坡度、体系域演化密切相关,高坡度地区发育三角洲前缘向深水斜坡的滑塌浊积砂体,其他地区在湖侵早期和湖退晚期发育非水道化的湖底扇浊积砂体。层序体系域结构的重建和沉积机理的分析大大提高了沉积砂体的预测精度,减少储层预测风险。这些沉积砂体孔隙度低,渗透率也低,薄片观察发现极细砂为主。分选性中等,磨圆度次棱角状。碎屑成分主要为石英和石英岩岩屑,少许长石,另见方解石碎屑。胶结物主要为方解石。他们属于低孔低渗储集层,可以成为裂缝性油气藏和非常规油气资源的勘探目标。

关键词 四川侏罗系 层序地层学 沉积学 体系域 深水沉积环境 储集层 高密度浊流

第一作者简介 吴因业 男 1964年出生 博士 教授级高工 层序沉积学和石油地质 E-mail: wyy@petrochina.com.cn

中图分类号 TE121.3 **文献标志码** A

0 引言

深水湖盆沉积砂体主要有三角洲前缘向深水斜坡的进积砂体、重力流砂体包括浊积水道砂体、浊积扇砂体和碎屑流砂体。相比在海相盆地,其规模较小但沉积单元更加复杂,例如非洲西北部摩洛哥浊积体系单个沉积体大于 100 km^3 在Agadir盆地和Seine-Madeira深海平原间分布大于 $1\ 500\text{ km}$ 长度^[1-4],可以识别出浊流和碎屑流。深水环境四个主要过程有助于碎屑沉积的堆积:①在基准面大幅度下降后,大陆架边缘三角洲向上部斜坡的进积作用;②重力流;③等深流;④深海沉积。虽然半深海物质输入的周期性变化遵循海侵或海退的旋回性变化,但在深海中,从悬浮到沉积过程是持续进行的,它与基准面的变化并没有关系。在层序地层学中,等深流也缺少普遍的特征,其反映了与基准面变化无关的温盐环流的质量平衡作用。重力流向深水环境搬运沉积物的主要形式有黏性碎屑流(泥石流)和浊流。另外,重力流的其他类型包括有颗粒流(砂质非粘性碎屑流)、液化流和流化流,通常这些类型并不是单独存在的,而是和浊流的“牵引毯状沉积”成为一体。海相深水碎屑

体系的基本沉积单元包括海底峡谷充填沉积、浊流水道充填沉积、浊流堤和漫滩波状沉积、浊流决口扇复合体及泥石流巨厚层^[5-6]。一些沉积单元的形成与河道化流体有关(如受限于峡谷或堤成水道);另一些与非河道化流体(如浊流决口扇或舌状泥石流)或漫滩沉积(如河道化重力流附近的天然堤和波状沉积物)有关^[7-11]。在四川盆地侏罗系发现的重力流,大多是非水道化的浊积砂体,其沉积标志是平坦的湖底砂体形态、粒序层理(不完整的鲍马序列)、不明显的底部冲刷^[12,13]。本文从露头层序识别、体系域分析、准层序叠加样式和储集层预测方面,以四川侏罗系为例开展了深水湖盆的沉积砂体研究。

1 四川侏罗系的露头层序和体系域识别

四川侏罗系为一套巨厚的陆相沉积(位置见图1),近年来随着钻探工作的开展,已经在这套地层中获得了多口工业油井和气井,找准侏罗系地层中的砂体,是提高钻探成功率的关键。为此,我们课题组依据沉积学和层序地层学方法和工作流程(图2),开展了露头层序识别和沉积砂体研究。总共出野外3次,约24天。第一次野外为四川—重庆野外沉积

收稿日期: 2013-07-31

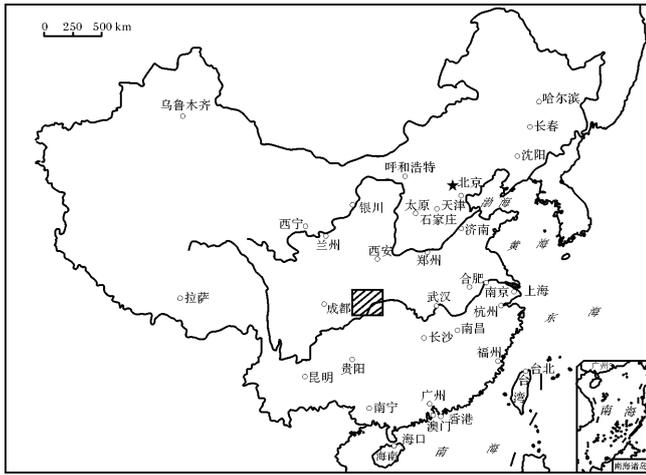


图 1 四川侏罗系的研究区位置图(方框是研究区)

Fig. 1 The location of studied area in Jurassic Sichuan (pane area)

地质调查与样品采集工作: 1) 勘察四川盆地侏罗系露头剖面, 10 天, 14 个露头点, 大约 $15 \times 700 \text{ m} = 10\,500 \text{ m}$ 剖面长度, 行程 1 800 km(合川—重庆—临水—铁山露头等), 剖面名称分别是 D1 炭坝剖面, D2-1 邻水北剖面, D2-2 石桥铺剖面, D3-1 铁山西剖面, D3-2 铁山东剖面, D4 七里峡剖面, D5-1 葫芦剖面, D5-2 赵家镇渠口剖面, D6 温泉剖面, D7-1 大垭口剖面, D7-2 青垭口剖面, D8-1 吊钟坝剖面, D8-2 卧龙河剖面, D9 明月峡剖面。2) 中下侏罗统大安寨段和

凉高山组等采集样品 95 块(沉积专题样品)。3) 拍摄野外地质照片 1 041 张。4) 拍摄影像 4 卷 12 个文件, 野外地质录音 16 个文件。第二次和第三次野外工作主要在大巴山前和米仓山前的侏罗系露头研究。

1.1 侏罗系沉积层序

四川盆地侏罗系由下至上分为珍珠冲组(J_1)、自流井组(J_1) (东岳庙、马鞍山和大安寨段)、凉高山组(或叫新田沟组)(J_2)、沙溪庙组(上沙溪庙段和下沙溪庙段)(J_2)、遂宁组(J_3)和蓬莱镇组(J_3)。

珍珠冲组双壳类化石仅有 *Kija* 和 *Margaritifera* (*Qiyangia*) 两个属, *Kija* 数量较少。这一组合与国际地层组三工河组双壳类化石组合相当。自流井组和新田沟组所含双壳类化石主要有: *Cuneopsis*, *Psilunio*, *Kija*, *Margaritifera* (*Palaeomargaritifera*), *Modiolus* 等, 与西山窑组双壳类化石组合相当。下沙溪庙组和上沙溪庙组主要含有以下双壳类化石: *Cuneopsis*, *Psilunio*, *Unionelloides*, *Lamprotula* (*Eolamprotula*), *Margaritifera* (*Palaeomargaritifera*), *Kija*, *Unio*, *Undulatula* 等, 与头屯河组双壳类化石组合相当。与吐哈盆地侏罗系的对比, 可以发现吐哈盆地侏罗系由下至上分为八道湾组(J_1)、三工河组(J_1)、西山窑组(J_2)、三间房组(J_2)、七克台组(J_2)、齐古组和喀拉扎组(J_3)。与陕甘宁盆地侏罗系的对比, 陕甘宁盆地侏罗系由下至上分为富县组(J_1)、延安组(J_2)、直罗组(J_2)和安定组(J_3)。

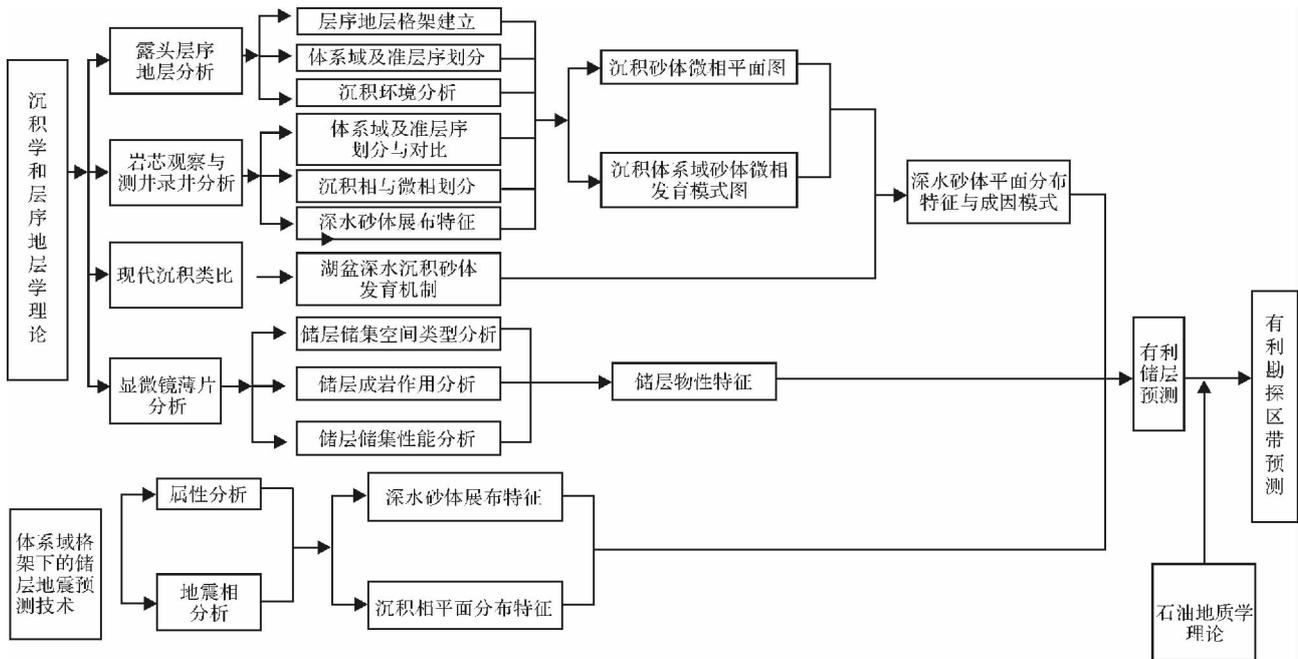


图 2 四川侏罗系的沉积学和层序地层学研究工作流程

Fig. 2 Workflow of sequence stratigraphy and sedimentology in the Jurassic Sichuan Basin

1.2 侏罗系沉积层序和体系域实例分析

以合川露头剖面为例,合川剖面总计 502 m,从珍珠冲组到凉高山组(新田沟组),其中新田沟组 200 m。珍珠冲组岩性特征如下:

4—中上部紫红色泥岩和砂质泥岩,夹石英砂岩和粉砂岩透镜体;下部黄绿色石英细砂岩夹紫红色砂质泥岩,具有赤铁矿结核。81.9 m。

3—紫红色砂质泥岩夹粉砂岩透镜体,具有交错层理。78.4 m。

2—黄绿色砂质泥岩夹细石英砂岩和粉砂岩,具有铁质结核。24.2 m。

1—顶部是 6 m 含小型交错层理的白色石英砂岩和薄层灰色页岩,中部 10 m 不等厚黄绿色砂质泥岩和粉砂岩,局部具有煤层;下部是白色粗粒石英砂岩,底部见少量石英砾。24.2 m。

珍珠冲组沉积层序分析:

从 1 到 2 构成一个湖侵体系域(TST),沉积环境为三角洲平原—三角洲前缘及滨浅湖,水体逐渐变深;从 3 到 4 沉积特征反映出氧化环境的滨浅湖,属于湖退体系域(RST)。

自流井组大安寨段岩性特征如下:

13—紫红色钙质泥岩,含丰富的钙质结核。4.4 m。

12—顶部是角砾团块结构的黄灰色隐晶灰岩,中

部和底部砂屑白云岩(doloarenite)和灰绿色钙质页岩。21m。

11—浅灰色微晶灰岩与贝壳灰岩交替,灰色页岩与钙质页岩的交替。20 m。

大安寨段沉积层序分析:

从 12~13 构成一个湖退体系域,沉积环境为滨浅湖,具有碳酸盐岩和碎屑岩的混积岩,水体逐渐变浅;从 11 沉积特征反映出浅湖—半深湖相和介壳滩相,属于湖侵体系域。

凉高山组岩性特征如下:

21—顶杂段,黄绿、紫红色砂质泥岩。35.5 m。

20~18—上灰段,细粒长石砂岩夹黄绿色砂质泥岩、粉砂岩。61.3 m。

17~16—中黑段,灰黑色页岩为主。62.8 m。

15~14—下杂段,杂色砂质泥岩夹块状细粒石英砂岩。含姜结石。

凉高山组沉积层序分析:

从 14~17 构成湖侵体系域,最大洪泛面在 17,从 18~21 构成湖退体系域。主要沉积相从滨湖,三角洲平原、前缘,半深湖到湖退体系域的滨浅湖、泛滥平原(图 3)。

从准层序的叠加样式来看,湖侵体系域准层序叠加样式为加积到退积(即 A-R),湖退体系域准层序叠加样式为加积到进积(即 A-P)。



图 3 四川侏罗系露头剖面沉积层序特征

1) 侏罗系凉高山下段细砂岩夹灰绿色泥岩,见姜结石,滨湖沉积, A-块状砂岩,重庆合川露头; 2) 马鞍山紫红色泥岩; 3) 侏罗系大安寨灰岩(B)夹暗色泥岩; 4) 侏罗系底界,珍珠冲组与三叠系须家河组的沉积间断面,重庆合川露头。

Fig. 3 The depositional sequence feature of outcrops in the Jurassic Sichuan Basin



图4 四川侏罗系盆地山前带露头剖面的沉积层序特征:

1) J_1b 砂岩, 河流相, 广元须家河剖面露头; 2) J_2s 河流相砂岩, 旺苍县唐家河露头; 3) J_3p 砾岩, 冲积扇, 青川县竹园剖面—大柏园剖面; 4) 河流相砂岩, 注意交错层理特征, 四川广元千佛崖剖面露头。

Fig. 4 The depositional sequence feature of outcrops in front belts of mountain in the Jurassic Sichuan Basin

2 四川侏罗系深水湖盆沉积砂体特征

从四川侏罗系盆地山前带地质调查发现, 沉积特征表现为冲积扇—河流体系, 发育有砾岩、砂砾岩和具有交错层理的河流相砂体(图4)。进入盆地沉积中心区, 发育有湖盆细粒沉积、湖盆三角洲和砂质碎屑流及深水浊积砂体。特别是侏罗系凉高山组岩性上从下到上划分为下杂段(滨浅湖—三角洲相)、中黑段(半深湖相)、上灰段(浅湖—三角洲相)、顶杂段(滨湖相)。可划分为一个湖侵体系域和一个湖退体系域。中黑段半深湖稳定泥岩可识别出最大湖泛面。凉高山组沉积类型有: 三角洲前缘水下分流河道、滨湖泥坪、滨湖滩坝、浅湖滩坝、浅湖泥、浅湖湖湾、半深湖泥、重力流(滑塌、液化、浊流)。凉高山组沉积时期, 沉积中心位于盆地东北部达川、万县一带。由于靠近沉积中心, 东北部龙岗地区湖侵期退积和湖退早期加积持续时间相对较长, 沉积暗色泥岩厚度大。从井下岩心观察和沉积地质解释可以发现: 1) 四川川中侏罗系 G100 井岩心凉高山段, 1 280.86 m ~ 1 282.62 m 显示深水重力流沉积砂体, 主要是浅湖—半深湖的水道浊积砂(A), 可以形成良好的油气储集体, 大套湖相泥岩(B) 分布于砂岩上下地层。2) C 是 A 的放大, 可以观察到砂岩与泥岩之间的接触关系,

注意比例尺为5角硬币, 直径约2 cm(图5)。在部分井的岩心观察中, 发现有深湖泥岩夹浊积砂体的发育, 砂岩段显示出鲍马序列 A-B-C, 反映水道浊积砂体的特征。

从微观上看, 碎屑岩浊积砂体和混积岩储层都可以形成有利的侏罗系次生孔隙发育带。这些沉积砂体孔隙度低, 渗透率也低, 孔隙度一般小于6%。薄片观察发现极细砂为主。分选性中等, 磨圆度次棱角状。碎屑成分主要为石英和石英岩岩屑, 少许长石, 另见方解石碎屑。胶结物主要为方解石。他们属于低孔低渗储集层, 可以成为裂缝性油气藏和非常规油气资源的勘探目标。以 G100 井浊积水道砂体和 X56 井湖底扇浊积砂体为例(图6), 1) G100 井浊积水道砂体, 井深 1 280.86 m, 细粒岩屑长石砂岩, 岩屑以火山岩、泥岩为主。胶结物以方解石为主, 其次为高岭石。颗粒间点—线接触, 少见石英次生加大。颗粒分选较好, 次棱角状—次圆状。铸体, 正交, $\times 100$ 倍。2) X56 井湖底扇浊积砂体, 井深 1 695.48 m, 含生物碎屑岩屑长石粉—细砂岩, 岩屑以火山岩、泥岩岩屑为主。含生物碎屑, 介壳破碎, 长轴直径最大 5.5 mm, 一般 1.5 mm, 结晶方解石。含黏土杂基, 胶结物以方解石为主, 高岭石次之, 胶结致密, 颗粒间线接触, 未见石英次生加大, 发育裂缝。颗粒次棱角—次



图5 岩芯观察和沉积地质解释:

1) 四川中侏罗系 G100 井岩芯凉高山段, 1 280.86 m ~ 1 282.62 m 显示深水重力流沉积砂体, 主要是浅湖—半深湖的水道浊积砂 (A), 可以形成良好的油气储集体, 大套湖相泥岩 (B) 分布于砂岩上下地层。2) C 是 A 的放大, 可以观察到砂岩与泥岩之间的接触关系, 注意比例尺为 5 角硬币, 直径约 2 cm。

Fig. 5 The core observation and its sedimentary geology interpretation in the Jurassic Sichuan Basin

圆状, 分选较好。总体上看, 孔隙不发育, 属于致密储集层。

3 深水湖盆沉积砂体分布模式

3.1 四川侏罗系沉积演化

四川侏罗系的沉积演化可以分为湖侵体系域和湖退体系域的交替过程, 同时也是湖相碳酸盐岩和湖相碎屑岩的交替过程。以自流井组大安寨段和凉高山组的沉积为典型代表, 从中部 G19 井剖面沉积层序分析可以发现, 从 2 420 m 到 2 392 m 构成一个湖侵体系域, 湖侵早期 (相当于大三亚段) 以加积式准层序叠加为主, 沉积环境为滨浅湖滩坝; 湖侵中晚期以半深湖为特征, 退积式准层序组。从 2 392 m 到 2 346.5 m 沉积特征反映出浅湖介壳滩相, 属于湖退体系域, 水体向上变浅。

剖面上, 介壳滩主要发育在湖退阶段, 平面上, 西部和南部介壳滩最为发育, 其次为中部, 东北部介壳滩发育最少。介壳滩的分布受湖岸线曲折性、湖盆坡度、水下隆起、碎屑颗粒注入等因素影响, 弯曲的湖

湾、缓坡、水下隆起、无碎屑颗粒注入等条件有利于介壳滩的发育 (图 7, 介壳滩发育时期沉积模式)。大安寨段既是生油岩又是储集岩, 介壳灰岩形成良好的油气储层。

到了湖盆深水沉积期, 主要是凉高山组最大洪泛面时期, 沉积模式表现为湖底扇等浊积砂体的发育 (图 8, 深水沉积发育期沉积模式)。

3.2 四川侏罗系深水湖盆沉积砂体分布模式

国际深水沉积砂体研究中关于浊流和碎屑流沉积物的分类^[4-6], 认为可以识别出以下几种: 1) 泥质浊流; 2) 低密度浊流; 3) 高密度浊流; 4) 颗粒流; 5) 块体流; 6) 低黏性砂质碎屑流; 7) 高黏性砂质碎屑流; 8) 泥质碎屑流。

在四川盆地侏罗系发现的深水沉积砂体类型主要是低密度浊流和少量的高密度浊流, 低密度浊流主要是 TC 和 TD 段, 为湖底扇浊积砂体或深水透镜状浊积砂体 (图 7)。高密度浊流以 TB 段为主, 为近岸或远岸的浊积扇中的水道浊积砂体。凉高山组沉积时期, 北部坡度较陡, 水体相对较深, 半深湖相沉积较厚, 发育与扇三角洲相关的滑塌浊积扇。南部水体相对较浅, 以滨浅湖相为主, 发育三角洲及与之相关的湖底扇沉积, 湖底扇延伸范围较远。以钻探的 G100 井 TST2 湖底扇外扇为例, 1 286.61 m ~ 1 286.81 m 井段灰色粉砂岩, 上下为深灰色泥岩。发育包卷层理、碟状构造、冲刷面。显示鲍马序列 CD-CD-CD-E, 分析认为是低密度浊流的湖底扇沉积砂体。在野外露头的观察中, 低密度浊流的浊积砂体底平顶凸, 厚度约 10 ~ 20 m (图 9), 显示侏罗系浊积砂体底部有重荷模特征, 并且可以有侏罗系多期浊积砂体的叠合。

4 结论与展望

4.1 结论

上述研究可以得出以下认识:

1) 四川盆地中下侏罗统以湖相、陆源三角洲及湖盆碳酸盐沉积为主, 发育 4 套深灰色、黑色泥页岩, 沉积了 2 套介壳灰岩层和 3 套粉细砂岩, 深水沉积砂体发育, 混积岩较发育。

2) 侏罗系主要目的层发育 4 套三级层序, 凉高山组主要发育二个体系域, 即湖侵体系域和湖退体系域, 湖侵体系域的水道浊积砂体可以是致密油勘探的甜点目标。

3) 沉积环境主要有三种类型: 一是湖盆深水浊

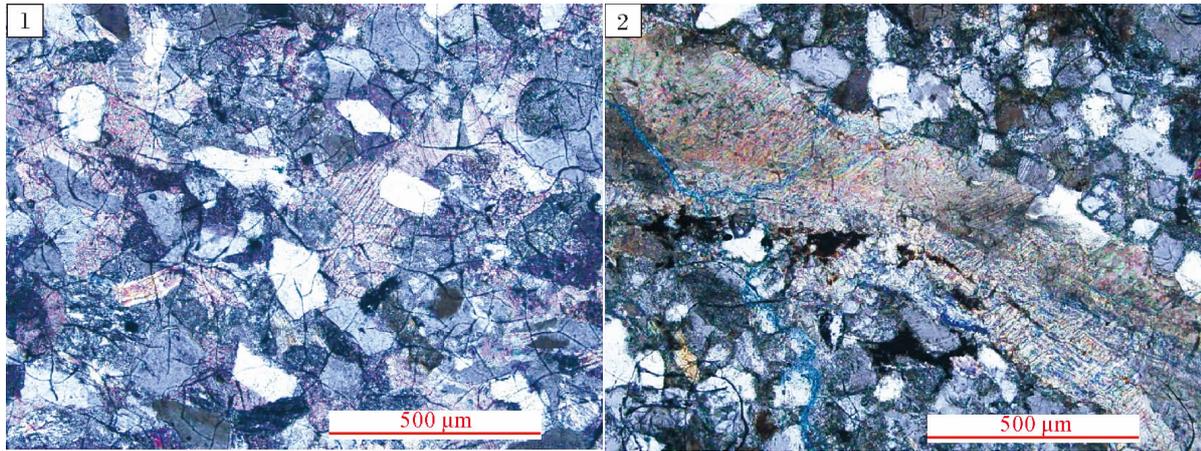


图 6 四川侏罗系油积砂体的微观特征

1) G100 井油积水道砂体, 井深 1 280.86 m, 细粒岩屑长石砂岩, 岩屑以火山岩、泥岩为主。胶结物以方解石为主, 其次为高岭石。铸体, 正交, ×100 倍。2) X56 井湖底扇油积砂体, 井深 1 695.48 m, 含生物碎屑岩屑长石粉—细砂岩, 岩屑以火山岩、泥岩岩屑为主。含生物碎屑, 介壳破碎, 长轴直径最大 5.5 mm, 一般 1.5 mm。发育裂缝。颗粒次棱角—次圆状, 分选较好。铸体, 正交, ×100 倍。

Fig. 6 The microscopic character of turbidite sandstones in the Jurassic Sichuan Basin

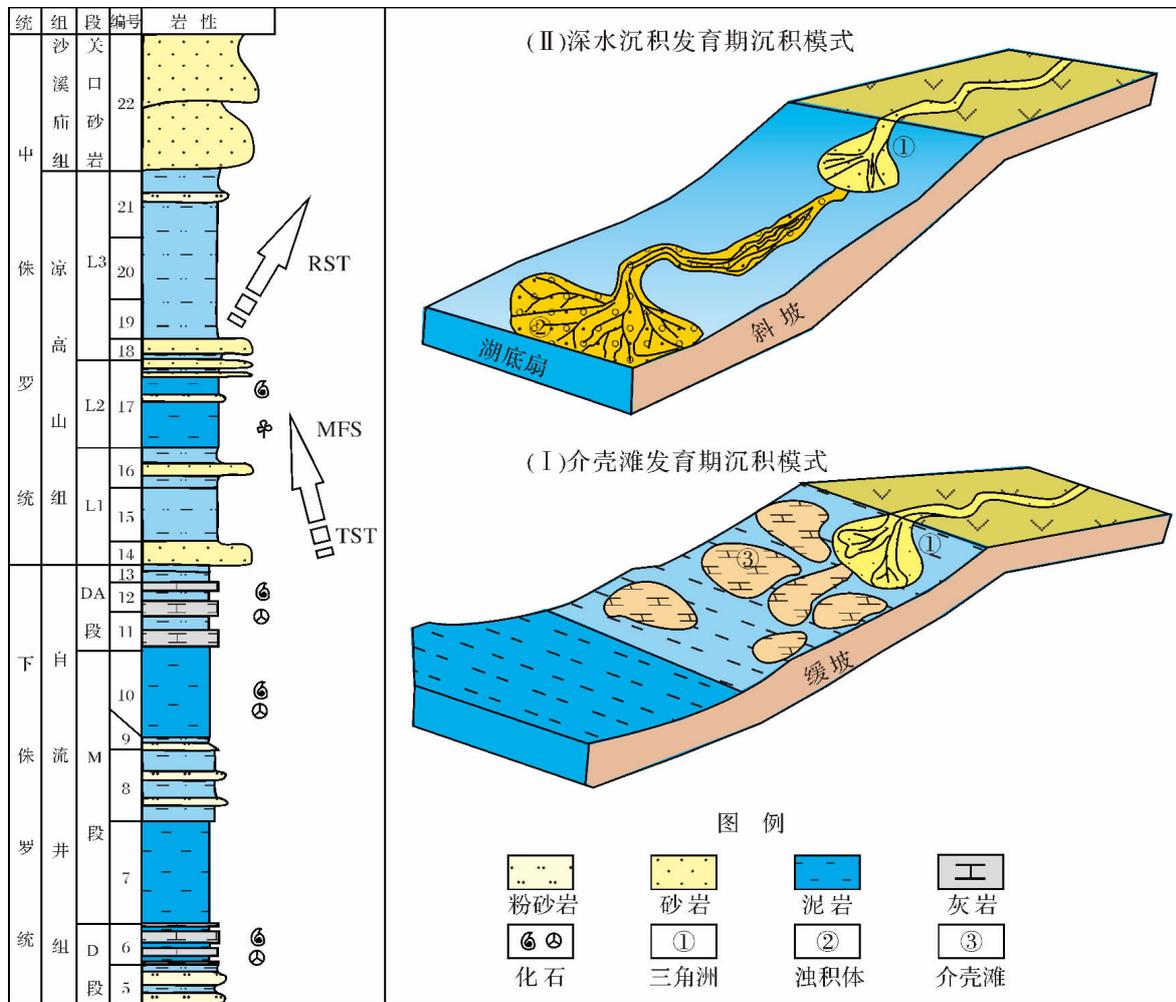


图 7 四川侏罗系沉积演化模式 注意湖盆深水沉积的湖底扇和油积水道砂体

Fig. 7 The depositional evolution model in the Jurassic Sichuan Basin

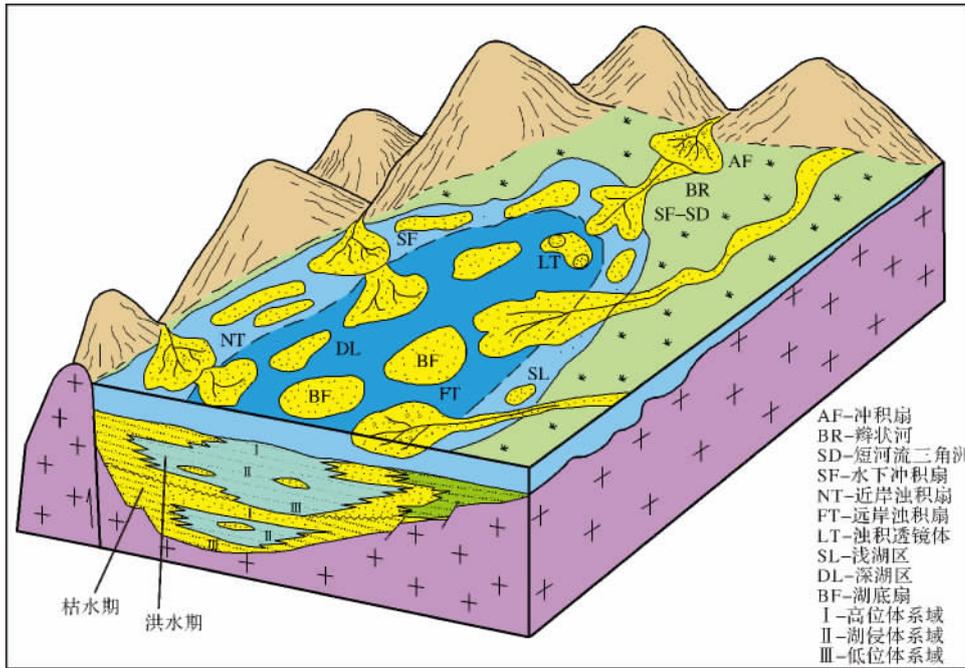


图8 四川侏罗系深水沉积砂体的分布

注: 由于陆相盆地没有海盆那样明显的坡折带和缺乏明显的初始湖泛面, 由此低位体系域和湖侵体系域难以区分, 常常合并为湖侵体系域, 高位体系域即湖退体系域。

Fig.8 The distribution of deep water depositional sandbodies in the Jurassic Sichuan Basin



图9 四川侏罗系野外地质露头中低密度浊流的浊积砂体特征:

1) 侏罗系凉山段细砂岩与灰色泥岩, 半深湖夹浊积砂体沉积, A-块状砂岩, 显示粒序特征, 四川七里峡露头; 2) 浊积砂体底平顶凸, 厚度约10~20 m, 显示湖底扇浊积砂体特征(B); 3) 侏罗系浊积砂体底部显示有重荷模特征(C); 4) 侏罗系多期浊积砂体的叠合, 四川七里峡露头。

Fig.9 The feature of sandbodies in low density turbidite flow in field outcrops in the Jurassic Sichuan Basin

流沉积环境, 主要发育湖底扇和浊积水道砂体, 二是岸线迁移引起的相缘渐变碳酸盐岩和碎屑岩混合沉积环境, 三是原地沉积混合的叠合滩坝沉积环境。

4.2 深湖沉积研究展望

展望深水湖盆沉积学的未来, 深湖沉积研究进展虽然很大, 与国际上相比依然有差距。特别是深水湖

表 1 深水湖盆沉积学研究的关键问题和展望

Table 1 The key problems and prospects of sedimentology in the deep water lake basin

| 关键问题 | 国际进展 | 国内进展 | 研究展望 |
|----------------|---|---|---|
| 深水湖盆砂质碎屑流和浊积砂体 | 目前已建立砂质碎屑流、浊流、底流等综合模式,其中识别出浊积体 5 种,碎屑流 3 种。 | 在渤海湾、松辽、鄂尔多斯盆地以及西藏地区均发育砂质碎屑流沉积。初步建立四川侏罗系深水湖盆浊积砂体模式和长庆油田华庆地区砂质碎屑流模式。 | 1) 深水砂体分布模式与预测等研究。 2) 湖盆异重流砂体(浊积岩的一种,与河流密切相关的高密度流)和震积岩的分析研究。 |
| 深水湖盆细粒沉积模式 | 发现海相页岩沉积模式 4 种,分布特征 8 种。 | 初步分析中国陆相湖盆细砂岩—粉细砂岩的分布特征。 | 1) 与国际互补,系统分析各类细粒沉积的分布特征。 2) 建立细粒沉积学研究方法。 3) 盆地中心粉细砂岩、碳酸盐岩、富有机质等细粒沉积物形成机制。 |
| 湖盆混积岩沉积模式 | 海相混积岩沉积模式 2 种,海相分布特征研究。 | 陆相湖盆碎屑岩—碳酸盐岩混合沉积的分布特征。初步建立长庆油田华庆地区砂质碎屑流模式,同时解决油田勘探生产问题。 | 1) 与国际互补,系统分析各类混积岩沉积的分布特征。 2) 地震沉积学侧重于地震解释技术的应用和精度的提高,层序沉积学侧重于体系域格架下异旋回和自旋回结合的沉积物特征、沉积趋势和沉积机理分析。 3) 混积岩的优质储层精细描述,以及泥页岩储层富有机质纹层组织识别方法。 |

盆砂质碎屑流和浊积砂体研究、深水湖盆细粒沉积模式和湖盆混积岩沉积模式三个方面(表 1)。

因此,首先要从技术方法方面,研究深水湖盆沉积的准层序叠加样式和滨线迁移规律,探索高密度流、异重流^[14]和低密度流浊积砂体及细粒岩层序沉积学的 A-P-R 分析方法(A 指 Aggradation 加积,P 指 Progradation 进积,R 指 Regradation 退积);然后再从石油地质理论方面,针对中国陆相湖盆,开展湖盆细粒岩沉积砂体微相和岩相古地理研究,探索湖相碎屑岩与湖相碳酸盐岩的细粒岩沉积模式与石油地质成藏条件,为致密油储层勘探的有利沉积环境分析提供科学依据。

致谢 一起参加野外地质工作的有陶士振、谢芬、李军、李登华等同志,以及北京驻四川科研经理部、西南油气田公司的部分专业人士和中国石油杭州地质研究院的部分专业人士提供工作便利,一并致谢。

参考文献 (References)

1 Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy [M]. Elsevier, Amsterdam, 2006
 2 贾承造,刘德来,赵文智等. 层序地层学研究新进展[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(5): 1-4 [Jia Chengzao, Liu Delai, Zhao Wenzhi, et al. Some new achievements in sequence stratigraphy research [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(5): 1-4]

3 Martinsen O J, W. Helland-Hansen. Strike variability of clastic depositional systems: does it matter for sequence- stratigraphic analysis? [J]. Geology, 1995, 23: 439-442
 4 Peter J, Talling, Douglas G, et al. Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. Sedimentology, 2012, 59: 1937-2003
 5 Vail P R. Sequence Stratigraphy Workbook, Fundamentals of Sequence Stratigraphy. 1988 AAPG Annual Convention Short Course: Sequence Stratigraphy Interpretation of Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure [M]. In: Bally A W. Editor: AAPG Atlas of Seismic Stratigraphy, 1988: 217-259.
 6 Van W J C. Sequence Stratigraphy and Marine To Nonmarine Facies Architecture of Foreland Basin Strata, Book Cliffs, Utah, U. S. A. . Sequence Stratigraphy of Foreland Basin Deposits. Outcrop and Subsurface Examples from the Cretaceous of North America [J]. AAPG Memoir 64, 1995: 137-223.
 7 吴因业,张天舒,张志杰,等. 沉积体系域类型、特征及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 69-81 [Wu YinYe, Zhang Tianshu, Zhang Zhijie, et al. Types and characteristics of depositional systems tract and its petroleum geological significance [J]. Journal of Palaeogeography 2010, 12(1): 69-81]
 8 吴因业,顾家裕, Cedric G,等. 塔里木盆地满西区块强制海退体系域沉积模式[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 21-25 [Wu YinYe, Gu Ji-ayu, Cedric Griffiths, et al. The depositional model of forced regressive systems tract of Manxi Block in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 21-25]
 9 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271 [Zou Caineng, Zhao

- Wenzhi, Jia Chengzao, *et al.* Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2008, 35(3): 257-271]
- 10 朱如凯, 毛治国. 火山岩油气储层地质学——思考与建议[J]. 岩性油气藏 2010, 22(2): 7-13 [Zhu Rukai, Mao Zhiguo. Volcanic oil and gas reservoir geology: Thinking and forecast [J]. *Lithologic Reservoirs* 2010, 22(2): 7-13]
- 11 姜在兴. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势[J]. 石油与天然气地质 2010, 31(5): 535-541 [Jiang Zaixing. Advance on sedimentary system and sequence stratigraphy [J]. *oil and gas reservoir geology* 2010, 31(5): 535-541]
- 12 吴因业, 朱如凯, 罗平, 等. 沉积学与层序地层学研究新进展—第18届国际沉积学大会综述[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 199-206 [Wu Yinye, Zhu Rukai, Luo Ping, *et al.* Advance on Sedimentology and Sequence Stratigraphy: A Summary from 18 International Sedimentology Congress [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 199-206]
- 13 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 915-921 [Zhu Xiaomin, Liu Changli, Zhang Yina, *et al.* On Seismic Sedimentology of Lacustrine Deltaic Depositional Systems [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 915-921]
- 14 何起祥. 沉积动力学若干问题的讨论[J]. 海洋地质与第四纪地质 2010, 30(4): 1-9 [He Qixiang. Some problems on Sediment dynamics [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 1-9]

Sequence Stratigraphy of Depositional Sandbodies in the Deep-water Lake Basin: A case from Jurassic Sichuan

WU Yin-ye ZHANG Tian-shu TAO Shi-zeng FENG Rong-chang

(RIPED of PetroChina, Beijing 100083)

Abstract: The method of sequence stratigraphy marks a new revolution of sedimentary geology. It uses multiple subjects to form a sedimentary model to interpret evolution and stratigraphic structure of sedimentary basin for oil and gas exploration based on analysis of autocycle and allocycle. Sequence stratigraphy is useful to decrease the risks of reservoir prediction. The main types of sedimentary sandbodies of deep-water lake basin are progressive sandstones from delta front to slope, gravity flow sandstones including turbidite channel, basin floor fan and debris flow sandstones. The distribution of non-channellized turbidite sandstones has closely relation with basin slope and systems tract evolution. There are developed sliding turbidite from delta front to slope in high-gradient areas, and developed basin floor fan turbidite in other areas during early transgressive and late regressive period. The rebuilding of sequence and systems tracts and analysis of sedimentary mechanism would increase predicting ability of reservoirs and decrease risks of reservoir prediction. These turbidite sandstones have low porosity and low permeability, with very fine grains on thin section observation. There are median sorting and poor rounding in grains. The clastic contents are quartz, quartz sandstone, and minor feldspar and calcite. The cements are mainly calcite. They belong to low-porosity and low-permeability reservoirs which could be as exploration targets of fracture reservoirs and unconventional resources.

Keywords: Jurassic in Sichuan; sequence stratigraphy; sedimentology; systems tract; deep water environment; reservoir; high density turbidite