

文章编号: 1000-0550(2012)01-0101-10

须家河组沉积模拟实验及大面积砂岩成因机理分析^①

马晋文^{1,2,5} 刘忠保² 尹太举^{1,2} 杨威³ 施振生³ 蒲秀刚⁴ 连丽霞^{1,2}

(1. 长江大学地球科学院 湖北荆州 434023; 2. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室 长江大学 湖北荆州 434023;

3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007; 4. 大港油田公司勘探开发研究院 天津 300280;

5. 中国冶金地质总局三局地质堪查院 太原 030002)

摘要 四川前陆盆地上三叠统须家河组砂岩大面积分布,是整个盆地现天然气勘探的重点层系之一,随着气田的勘探和开发,亟需弄清形成大片砂岩的主控因素来指导勘探和生产。为研究其成因机理,在对须家河组区域构造演化、古地貌、沉积体系等地质条件调查研究的基础上,运用沉积物理模拟的方法,将原型地质条件转化为物理模型,并设计模拟实验参数,通过水槽模拟实验技术进行研究。实验主要设计三个物源,通过控制流量、加沙量、地形坡降、活动底板沉降量及湖水水位等参数,在水槽装置再现形成大面积砂岩的演变过程,系统研究大面积砂岩形成的主控因素。模拟结果表明,地形坡降小、不同来水特征组合、湖水频繁进退、各沉积体系间交汇及盆地沉降与沉积速率的匹配等,影响着大面积砂岩的形成。实验发现多期河道不断分汊改道,在侧向上不断迁移,纵向上受湖水水位的变化表现为前积和退积,致使砂体在横向和纵向上相互拼接,导致砂岩大面积分布。

关键词 大面积砂岩 主控因素 沉积模拟 多物源

第一作者简介 马晋文 男 1984年12月 硕士研究生 沉积学 E-mail: majinwen1985@163.com

通讯作者 刘忠保 E-mail: lzb623@163.com

中图分类号 P512.2 文献标识码 A

0 前言

沉积模拟是沉积地质和含油气盆地分析中十分活跃的领域。20世纪50年代前,主要对沉积表面现象的观察描述进行模拟^[1];60年代至70年代间,转而注重沉积构造和形成机理的定性研究^[2~4];80年代后,着眼于大型盆地模拟和沉积学的定量研究^[5,6];而今,更多重要的理论及实际应用问题可通过沉积模拟来解释研究。沉积模拟将自然界真实的碎屑沉积体系从空间尺寸及时间尺度上都大大缩小,并抽取控制体系发展的主要因素,建立实验模型与原型之间应满足的相似关系^[7~11],依据这种对应关系及试床实验确定实验方案,从而开展沉积模拟实验,再现沉积过程和结果。

四川盆地一直是我国天然气勘探的重点盆地之一,而川西陆相砂岩储层勘探则是其中最热点地区之一^[12]。须家河组砂体面积分布广,但成因机理不清,主控因素不明,砂体叠置特征不详,优势储层分布预测困难,严重影响了该区的进一步勘探。前人研究认为须一段下部为海陆过渡相,须一段上部,须三、须五

段主要发育滨、浅湖沉积相,须二、四、六段主要发育三角洲沉积相,局部地区发育河流相^[13~15]。近期在安岳地区的研究表明须一—须六段具有浅海相沉积特点,有可能是浅海潮汐沉积^[16],若果如此,必会影响该区的勘探方向,形成新的勘探突破。然而总体上从该区盆地构造和沉积演化特征看,该区海相沉积的证据还不是很充分,而湖相沉积的认识更为广大研究者所接受,因而本次研究基于湖相砂体的成因机理,通过沉积物理模拟,探讨须家河组大面积砂体的成因机理。

针对此,按照模拟区域地质特征及生产资料,建立原型物理模型,明确盆地范围、古地貌、构造演化、各沉积体系展布特征、古水位变化、模拟各期的沉积厚度及砂地比等物理要素,依据沉积模拟相似理论,确定模拟实验模型的边界大小、物源方位、底型坡降、构造沉降量、湖水水位变化、沙泥级配等模拟参数^[11,17~21],再结合经验及试床实验调整模拟过程来水量、加沙量、粒度大小等水动力参数,塑造模拟底型,进行沉积模拟实验。在模拟过程中,对沉积现象进行仔细观察及描述,并适时对经典现象进行录像和

①国家自然科学基金项目(批准号:41072087)资助。
收稿日期:2011-01-20; 收修改稿日期:2011-04-21

内部结构特征的刻画,难于精细体现地层和砂体的细节,但对砂体的总体展布和形成机理的分析还是具有重要的参考价值。

根据江南古陆、龙门山和米仓山一大巴山三物源沉积体系的分布方位,实验对应设计各物源河流出水口所在装置位置分别为 $X=3\text{ m}$ 、 $Y=4\text{ m}$ 、 $X=0.8\text{ m}$ 、 $Y=14\text{ m}$ 和 $X=5.2\text{ m}$ 、 $Y=14\text{ m}$ 处(图1),龙门山和米仓山一大巴山两物源水流入湖夹角约为 110° 。江南古陆、龙门山和米仓山一大巴山各物源处原始底型坡度设计参考构造恢复的须一上部底界面的地形,坡降分别为 $1\% \sim 5\%$ 、 $40\% \sim 50\%$ 和 $20\% \sim 30\%$ 之间。

1.3 实验参数设计

流量、加沙量、粒径大小等参数,需达到水流和携带沉积物能力的平衡。由于不同时期的来水情况、流水时间、流量及加沙量不同,考虑到实验的可操作性、水流的搬运能力以及洪水期、平水期、枯水期含沙量的变化,根据经验参数及试床调整最终设计龙门山和米仓山一大巴山物源洪水期、平水期、枯水期的流量均约分别保持在 6 l/s 、 3 l/s 、 1 l/s ,江南古陆物源洪水期、平水期、枯水期的流量约分别保持在 4.35 l/s 、 1.92 l/s 、 0.49 l/s ,洪水期、平水期、枯水期的时间比例约为 $1:2:6$;加沙量与流量比例匹配,设计约为 $6:3:1$,实验中视具体情况和易于操作,可适当调整。

2 模拟过程与结果

依据设计方案开展了实验模拟。模拟过程中,监控碎屑沉积体系的生长形态及演变规律。根据各期砂体的沉积厚度以及剖面获取的砂泥层的厚度,对碎屑沉积体建立三维模型,深入研究过程与结果的对应性并进行分析。

2.1 模拟过程

实验依据体系域及准层序组叠置关系所反映的相对湖平面变化控制模拟水位变化。各物源来水情况按平水—洪水—平水—枯水的顺序供水,按照设计中各种水流态持续时间和加沙量来操作。第一轮模拟须一段上部,依次模拟到第六轮须三段上部。除须一段上部仅有龙门山物源外,其它每一轮模拟均对应龙门山、米仓山一大巴山和江南古陆三物源。各阶段跟踪河道变化,三角洲的形成、演变,并测量其沉积厚度,实验共历时约 180 h 。整个模拟过程,随着时间的变迁,水流的冲刷,泥沙的沉积,三角洲在不停的演变,分布范围渐渐变大(图2)。

(1) 第一沉积期

模拟层段为须一段上部,为高位体系域沉积。湖水水位经 8 h 由 17 cm 慢慢上升到 21.7 cm ,再保持通水 8 h 后经 8 h 将湖水水位控制到 17.6 cm 。

龙门山物源水流呈多股分流全方位入湖。当湖水下降时,多条水流携带沉积物向更远的地方沉积,扇体表面被切割时有纵向砂坝保留下来,其外缘呈圆滑状并渐渐变大。

(2) 第二沉积期

模拟层段为须二段下部,为进积型准层序组,砂体叠置样式为进积。湖水水位经 24 h 由 17.6 cm 慢慢降至 10 cm 。

龙门山物源水流切割前期沉积的扇体,携带沉积物向湖区更远的方向推进,扇体面积继续扩大。米仓山一大巴山物源阵发性来水入湖形成扇体,水流切割扇体表面并携带沉积物向前推进,侵蚀龙门山右侧物源,与龙门山物源扇体因横向分流展宽而汇合。江南古陆物源分流河道发育,砂体全方位扩大,整体呈现大面积鸟足状三角洲形态^[24],其沉积环境为典型的

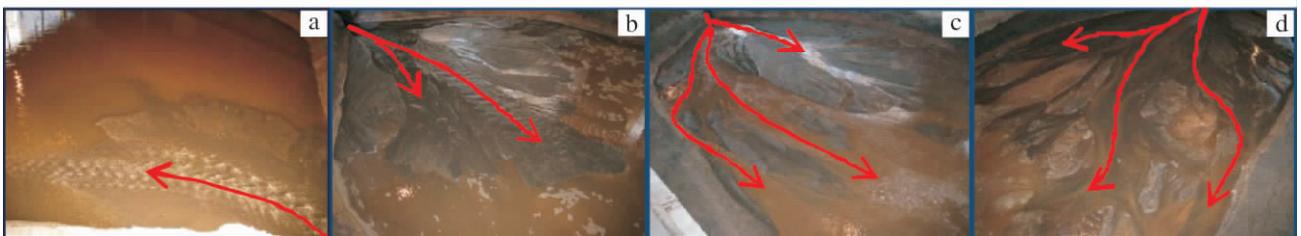


图2 江南古陆物源处三角洲的沉积演化过程

(a): 实验刚开始时,须一上部三角洲的锥形。(b) (c) (d): 分别为须二下、中、上三期三角洲逐渐变大的某一时刻的形态。

Fig. 2 Evolution of the delta in Jiangnan ancient land

(a) the initial pattern of the deltas in the experiment of the 1st section of Xujiache Formation. (b) (c) (d): the corresponding delta shapes in some time of the three periods of the lower, middle, upper second section of Xujiache Formation

砂质辫状河沉积。

(3) 第三沉积期

模拟层段为须二段中部,为加积型准层序组,砂体叠置样式为加积。实验历时 32 h,湖水位整体趋于稳定,基本控制在 8 cm 左右。各物源砂体表面被切割改造。龙门山物源与江南古陆物源在 $Y=9\sim 10\text{ m}$ 处交汇,湖盆砂体面积不断展宽。

前 3 期整体是一个湖水位下降的过程,各方位沉积不断地在侧向上展宽,纵向上延伸,致使龙门山物源分别与其它两物源交汇,从而三物源砂体连片(图 3)。

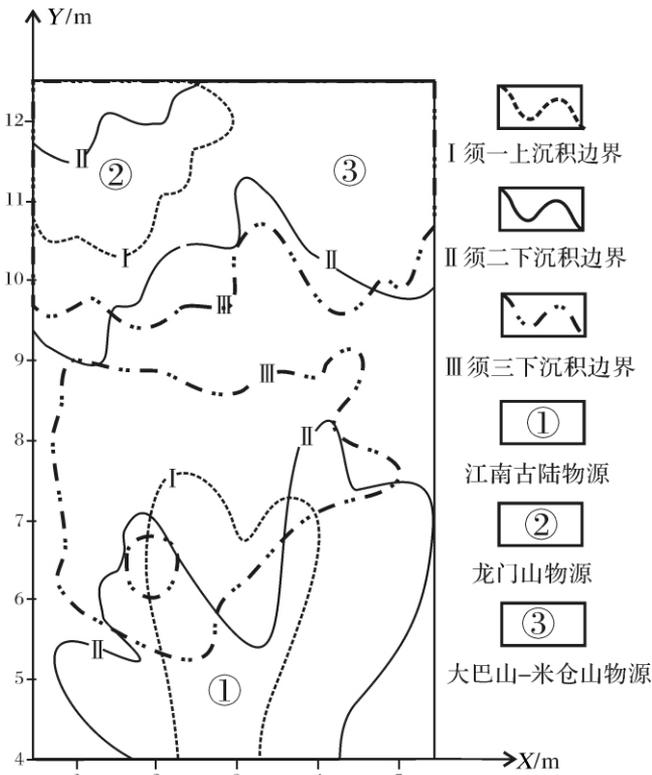


图 3 前 3 期沉积砂体边界图

Fig. 3 The boundary map of the sand-bodies in the preceding 3 stages

(4) 第四沉积期

模拟层段为须二段上部,为退积型准层序组,砂体叠置样式为退积。湖水位由 8 cm 慢慢上升到 13 cm,历时 24 h。

各物源处沉积的砂体均向后退缩,沉积范围渐渐变小,退积期次性明显。入湖河流方位变化频繁,砂体侧向叠置明显。

(5) 第五沉积期

模拟层段为须三段下部,为湖侵体系域。湖水位

由 10 cm 慢慢上升到 18 cm,历时 24 h。该期在第四期沉积的基础上,依旧是湖水位上升,沉积范围缩小,砂体退积。随着湖水位上升,湖盆面积增大,江南古陆物源沉积区与龙门山物源沉积区间不再发生交汇。

(6) 第六沉积期

模拟层段为须三段上部,为高位体系域。湖水位经 12 h 由 10 cm 慢慢上升到 18 cm,再经 8 h 慢慢下降到 15 cm,最后经 8 h 降至 12 cm。

湖水位上升时,沉积物向物源区退积,期次性明显。湖水位下降时,沉积物向湖区进积,湖盆范围缩小,砂体纵向延伸远,三角洲面积扩大。由于基准面下降,可容空间减小,河道下切能力增强,河道较固定,以侵蚀改造早期沉积为主,使不同期沉积体相互叠置。

2.2 模拟结果

实验中,龙门山物源沉积与米仓山—大巴山物源沉积背景及特征相似,为陡坡深水沉积。两物源水流均以喷射的方式入湖,沉积物还来不及分选便迅速堆积,形成的朵体边缘形态圆钝,休止角约大于 35° ,整个扇体表面呈圆锥状,横宽纵短。但随着时间的迁移及湖水位的进退,入湖砂体不断的在纵向上进积、退积,横向上分流侧积,朵体渐渐的扩大,垂向上砂体不断加积,导致两物源砂体交错叠置,致使两物源砂体连片。剖面显示,两物源交汇处,如 $Y=10\sim 12\text{ m}$, $X=2.5\sim 3.5\text{ m}$ 间区域,泥质含量较高,厚度可达 15 cm,在泥岩之间夹有很薄的砂层,使来自两物源砂体得以连通。

江南古陆物源河流属牵引流沉积,距深湖区较远,坡度较缓,湖水位较浅,区域受水面积较大。水流携带沉积物易堆积淤高,河道频繁迁移分叉,并入湖形成规模不等的朵体,各朵体相连在横向上砂体连片。纵向上,伴随着湖平面的下降,沉积物向前推进的速度加快^[18]。最终,江南古陆物源沉积延伸至 $Y=9.5\text{ m}$ 处,侵蚀龙门山物源右侧,两物源交汇在一起。剖面显示,在无沉降区,由于水动力较强,侵蚀程度较高,使得该区域泥质含量较少,砂质含量极高。在深湖区 $Y=9.25\sim 10.25\text{ m}$, $X=2.3\sim 5\text{ m}$ 处,沉降量越大,泥质沉积厚度较大,且在横向展布越稳定。

为了更直观反映沉积体三维空间的形态及内部结构,对模拟结果进行模型重建。根据实验过程中测得各期沉积厚度值和最终沉积体剖面砂泥岩相数据,分别建立了沉积体的几何模型和岩相模型(图 4、图 5)。结果表明龙门山和大巴山—米仓山物源沉降

幅度大, 沉积厚度大, 砂体延伸距离较短。江南古陆物源一侧地形平缓, 沉降幅度小, 沉积厚度小且较均一, 延伸较远。岩相模型中发现泥岩分布范围较小, 主要发育于滨浅湖地区, 其余部位以砂岩沉积为主, 局部含有断续分布的泥岩夹层。模型与原型进行对比, 沉积体三维空间的展布及构造形态与原型拟合度较好, 基本达到了建模的目的。

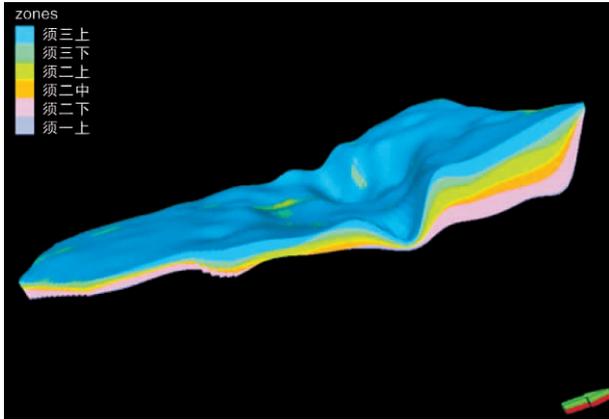


图 4 地层格架模型

Fig. 4 Framework architecture model

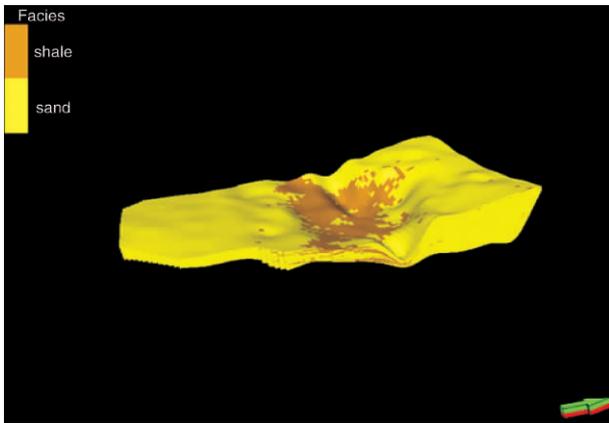


图 5 岩性模型

Fig. 5 Lithology model

3 大面积砂岩形成机理的实验认识

各物源来水情况不同、坡度大小不同、距离深水区的位置不同、底板沉降量不同, 导致其沉积体系分布及内部结构有一定的影响。通过对实验现象的观察和分析, 关于大面积砂岩的成因得出如下结论。

3.1 地形平缓及湖水浅有利于砂体大面积分布

坡降控制在 45‰ 左右, 入湖水深约 15 cm 的龙门山物源沉积从 $Y=12.5\text{ m}$ 延伸至 $Y=9.3\text{ m}$, 横向上展宽为 3.5 m, 各期沉积的宽厚比小于 34:1。各期沉积结束后, 龙门山物源沉积的最大厚度和最小厚度

分别为 62 cm 和 21 cm。坡降控制在 4‰ 左右, 入湖水深约 3~5 cm 的江南古陆物源沉积从 $Y=4\text{ m}$ 延伸至 $Y=9.7\text{ m}$, 横向上展宽为 5.6 m, 各期沉积的宽厚比大于 98:1。最终, 江南古陆物源沉积的最大厚度和最小厚度分别为 22.5 cm 和 16.6 cm。实验表明, 龙门山物源发育于沉降量大、坡度较陡、水体较深的环境中, 水流携带沉积物顺直流入湖区, 形成相对均质的砂砾扇体, 但砂体延伸距离较短, 横向上展宽相对较大, 沉积厚度较大(图 6)。江南古陆物源发育于构造稳定、地形坡度平缓、水体能量相对较弱的环境中, 缓坡浅水三角洲发育, 渠道化特征明显, 砂体具有沉积厚度薄、分布范围广泛的特征, 有利于大面积砂岩的展布(图 7)。



图 6 陡坡深水扇三角洲

Fig. 6 Deep-water fan deltaic deposition on higher-gradient slope developing within a small distribution area



图 7 缓坡浅水三角洲

Fig. 7 Shallow-water deltaic deposition developed on lower-gradient slope with a widespread morphology

3.2 盆地沉降与沉积速率的匹配保证了砂砾岩得以长期发育

实验过程观察, 活动底板沉降, 湖区可容空间增

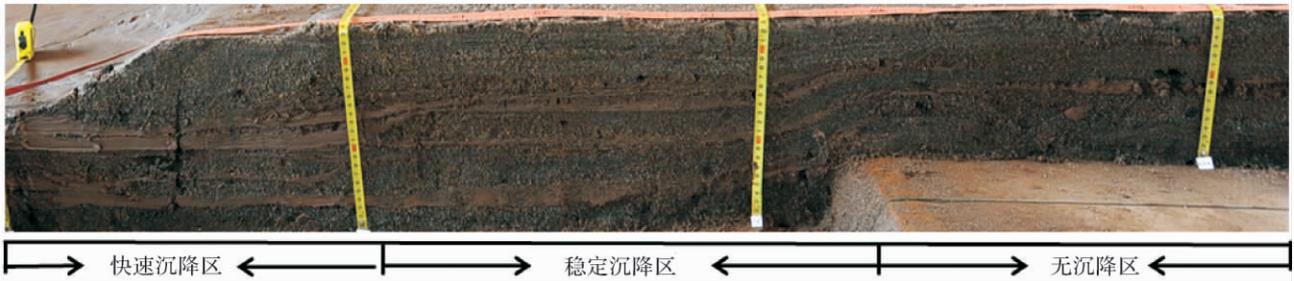


图8 X = 3 m 砂泥层组合纵剖面
Fig. 8 Sand-mud deposition grouping profile at X = 3 m

大三角洲分流河道经决口改道,向地势较低的区域沉积,产生新的朵体堆积近岸湖区。后期的河流流经近岸三角洲朵体时发生过路作用,在向湖一侧卸载形成新的三角洲朵体群,并不断的向湖心迁移,砂体垂向增厚,如此不断的进积形成大面积分布的三角洲复合体,使得砂体连片分布。

剖面观察,发现快速沉降区粗物源供应不足,沉积厚度和砂体发育相对较差,泥质含量较高;稳定沉降区发育一定的泥岩,砂体厚度明显增大,其连续性也有所好转;无沉降区基本处于暴露或浅水状态,整个沉积过程以不断改造,不断建设为主,导致粗粒沉积进一步发育,使得无沉降区砂体连片性增强(图8)。

实验认为可容纳空间随多期河流—三角洲朵体的不断建设和改造发生变化,进而也影响大面积砂体的形成,盆地沉降与沉积速率的匹配保证了砂砾岩得以长期发育。

3.3 不同来水特征的有机组合影响着大面积砂体的展布

在江南古陆缓坡、水浅的背景下,就不同的来水特征对沙体作用的影响,进行观察并得到如下认识。

(1) 来水充分

流量为 4.35 l/s,加沙量为 9.5 g/s 时,河流分支增多,多股水流携带泥沙全方位向湖区推进。由于水流不足以长距离搬运更多的沉积物,故沙质很易在能量较低的河间活跃沉积区沉积,并不断加积,使得河道易频繁迁移,入湖形成多个小朵体,并在侧向和垂向上叠置(图9)。

(2) 来水不足

流量为 0.49 l/s,加沙量为 0.4 g/s 时,河道分支较小,沿着上游河道方向水道少数集中,河道间规模较大,水流以改造作用为主,侵蚀切割水上三角洲砂体表面。沙体沉积作用主要在河流入湖处,不能向更远的方向沉积,湖区以泥岩沉积为主。

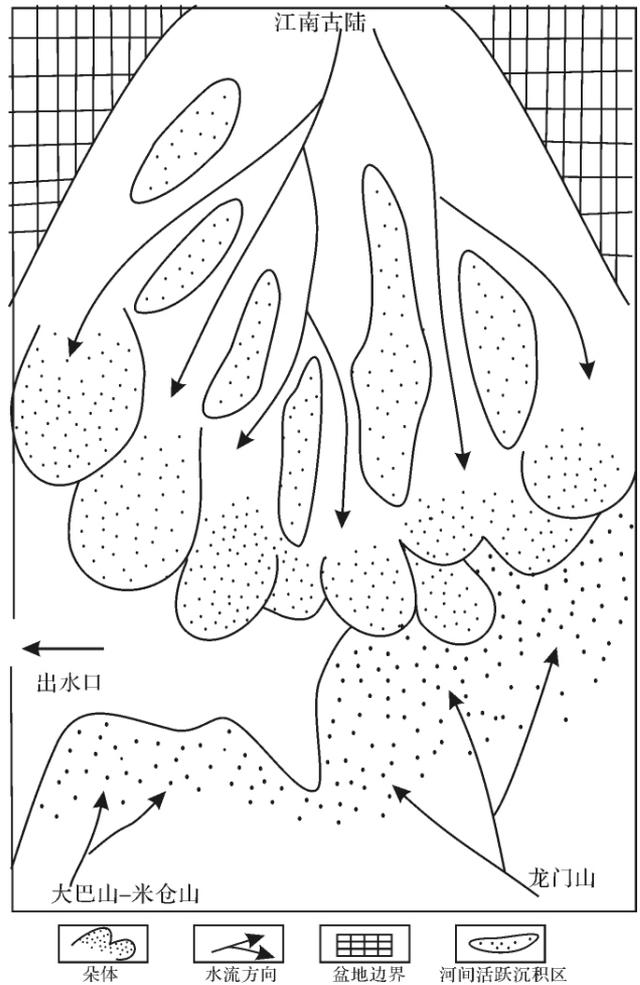


图9 来水充足时三角洲发育模式
Fig. 9 The delta growing model during enough inflow stage

实验认识: 当来水充分时,河道易多股分流,区域过水面积较大,各河道沙体以及入湖沉积的朵体相互叠置,使得砂岩大面积分布。当来水不足时,河道单一,以侵蚀切割为主,对前期沉积的砂体进行改造,可使原本相隔的砂体连通。因此,来水的充分与不足的有机组合可造成大面积砂体连片。

3.4 湖水频繁进退造成多期次砂体平面上相互叠置连片

实验过程观察: 水进时, 湖泊面积不断扩大, 河道向湖延伸距离变短, 携带的沙体入湖因受阻而退积, 期次性明显(图 10)。水退时, 湖泊大面积收缩, 河流下切及侧向侵蚀作用较强, 对前期形成的砂体改造较大, 砂体沉积范围较局限, 发育进积式三角洲(图 11)。

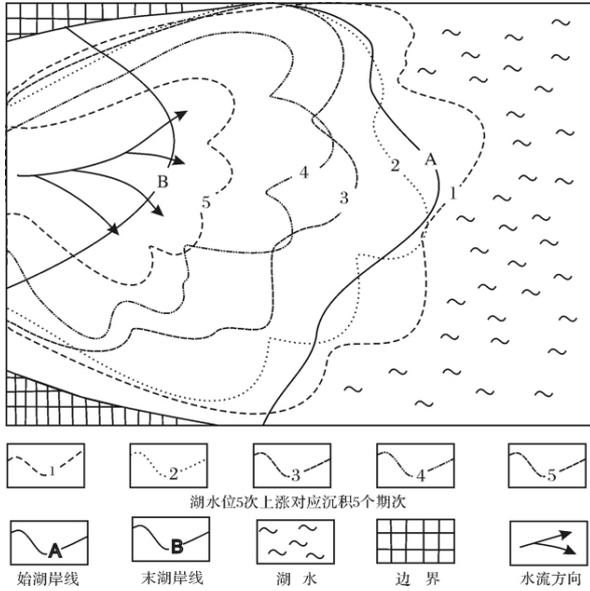


图 10 水进期三角洲发育模式
Fig. 10 Retrograded delta growing model

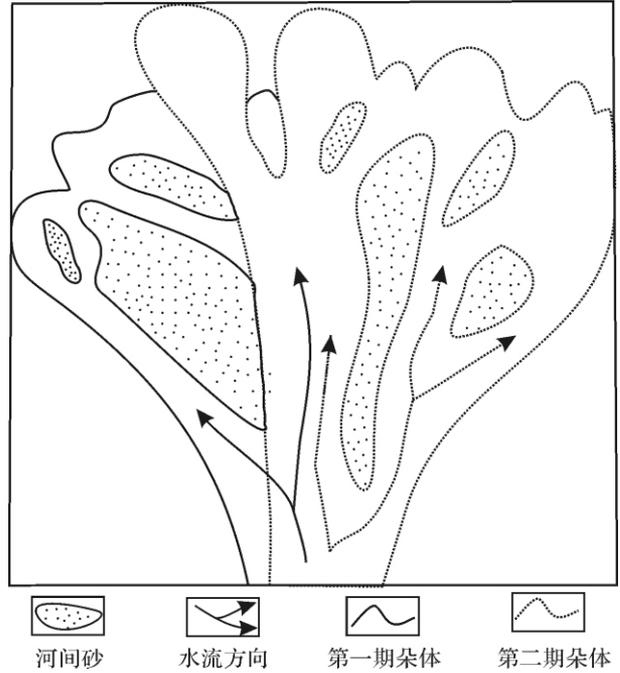


图 11 水退期三角洲发育模式
Fig. 11 Prograded delta growing model

实验 $X = 3.5 \text{ m}$ 的剖面(图 12), 须二段低水位期, 黄色、土黄色地层砂体相连, 须三上蓝色高水位地层明显比下伏须二段地层向湖心距离短, 不易形成整个盆地大面积展布的砂岩。

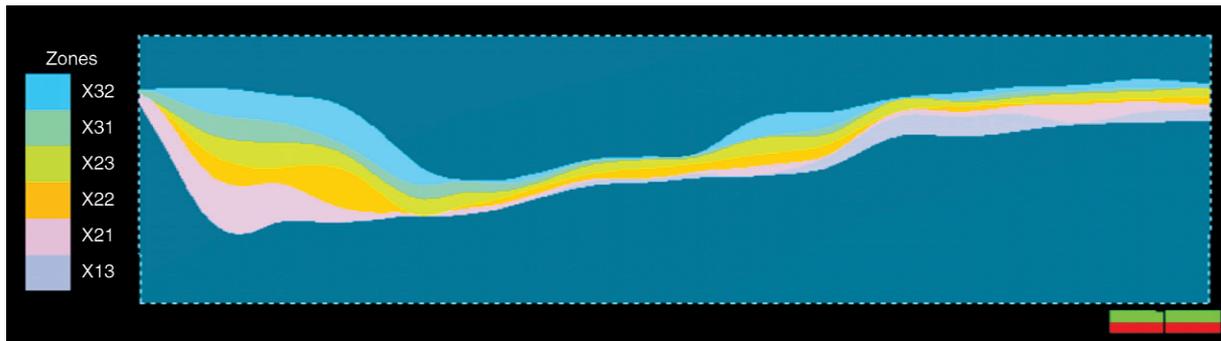


图 12 $X = 3.5 \text{ m}$ 模型纵切片
Fig. 12 YZ model at $X = 3.5 \text{ m}$

认为湖水位进退是砂体大面积展布的条件之一, 频繁进退的湖水导致不同时期的砂岩相互连接形成大面积砂岩, 这些砂岩相叠置形成一个由不同时期的建设和破坏组成的复合砂岩体系。

3.5 沉积体系间交互影响, 扩大了砂岩连片面积

龙门山物源区与米仓山物源区在 $Y = 10 \sim 12 \text{ m}$, $X = 2.5 \sim 3.5 \text{ m}$ 处交汇叠合(图 13), 交汇角约 110° ,

叠合区沉积厚度相对较薄, 泥岩在叠合中部较发育, 向两侧上倾尖灭, 夹于泥岩间的薄砂体连通龙门山和米仓山一大巴山砂体。龙门山物源区与江南古陆物源区在 $Y = 9.5 \text{ m}$, $X = 0.5 \sim 1.5 \text{ m}$ 处以 150° 的交汇角叠合, 两物源的砂体连通, 进一步增大砂岩发育面积, 从而使整个湖盆三物源砂体相连。认为沉积体系的交汇, 扩大了砂体连片的面积。

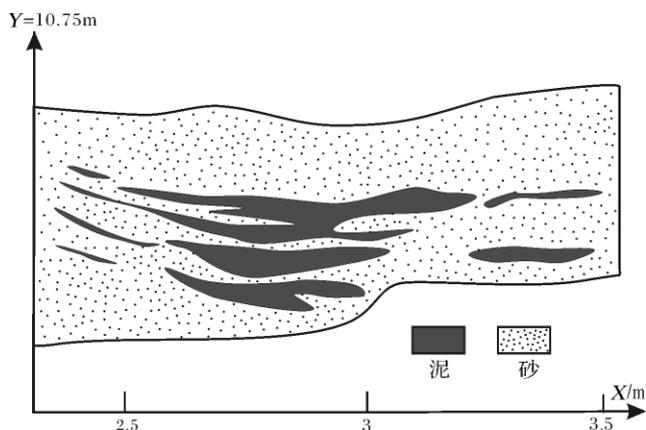


图 13 $Y = 10.75 \text{ m}$ 物源交汇区砂泥层组合横剖面图

Fig. 13 Sand-mud deposition grouping cross section at $Y = 10.75 \text{ m}$ in provenances interjunction

4 结论

(1) 沉积模拟可以解释理论和实际问题,对沉积学上的许多理论和模式在实验室进行验证,针对主要研究问题进行模型设计,通过模拟再现其沉积过程,研究其影响及控制因素、砂体内部结构、砂体展布等特征。

(2) 在无活动底板沉降区,水深约 4 cm 左右、坡降为 4‰ 的缓坡浅水背景下,分流河道频繁变迁,使得整个区域过水面积变大,相应沉积和再改造面积也增大,整体沉积厚度较薄且均一,发育的三角洲宽厚比大于 98:1,有利于形成大面积砂岩。

(3) 不同的来水组合导致砂体连片分布:流量为 4.35 l/s,加沙量为 9.5 g/s 时,多河道分汊,并不断向前推进。流量为 0.49 l/s,加沙量为 0.4 g/s 时,河道单一,以侵蚀改造作用为主。

(4) 伴随着各期构造沉降,可容纳空间增大,使得砂质沉积长期发育,形成一定规模的砂体。

(5) 频繁的湖水位进退,造成多期次砂体在平面上不同程度的延伸,各三角洲砂体在垂向上相互叠置,再加上三角洲朵体在侧向上的拼接,进而组成大面积的砂岩体。湖水位不变时,即同期沉积的砂体一般在湖岸线附近堆积。第六沉积期,湖水位分 5 次按 10 ~ 12 ~ 14 ~ 16 ~ 18 cm 的次序依次上升,三角洲砂体分 5 次向源区方向期次性退积连片。当湖水位从 18 cm 分 4 次降至 12 cm 时,可容空间减小,河流带来的沉积物继续向前地势较低的地方沉积,以前各期叠置的砂体被改造作用明显,导致砂体被不同的席状化。

(6) 模拟实验中龙门山物源与江南古陆物源及大巴山—米仓山两物源彼此交汇,致使湖区三物源砂体彼此相互连通,增大了砂岩连片面积。

参考文献 (References)

- Allen J R L. Fining-upwards cycles in alluvial successions [J]. *Geological Journal*, 1965, 4: 229-246
- Bridge J S. Hydraulic interpretation of grain-sized distributions using a physical model for bedload transport [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1981, 51: 1109-1124
- Best J L. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences [J]. *Sedimentology*, 1988, 35(3): 481-498
- Saunderson H C, Lockett F P J. Flume experiments on bed forms and structures at the dune-plane bed transition [J]. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, 1983, 6: 49-58
- 曹耀华, 赖志云, 刘怀波, 等. 沉积模拟实验的历史现状及发展趋势 [J]. *沉积学报*, 1990, 8(1): 143-146 [Cao Yaohua, Lai Zhiyun, Liu Huaibo, et al. Sedimentary simulation experiments: in the past, current states, and developing trend [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(1): 143-146]
- 胡春宏, 王延贵, 张燕菁. 河流泥沙模拟技术进展与展望 [J]. *水文*, 2006, 26(3): 37-41 [Hu Chunhong, Wang Yangui, Zhang Yanjing. Development and prospects of simulating technology for river sedimentation [J]. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(3): 37-41]
- 谢鉴衡. 河流模拟 [M]. 北京: 水利水电出版社, 1990: 166-228 [Xie Jianheng. *Modelling of River* [M]. Beijing: Water Power Press, 1990: 166-228]
- 武汉水利电力学院. 河流泥沙工程学—下 [M]. 北京: 水利出版社, 1982: 167-265 [Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering. *Load of River Engineering* [M]. Beijing: Water Power Press, 1982: 167-265]
- 屈孟浩. 河工模型试验的自然模型法 [J]. *黄河建设*, 1959, (7): 65-71 [Qu Menghao. Natural model of river modeling [J]. *Yellow River Construction*, 1959, (7): 65-71]
- 李保如. 我国河工动床模型的设计方法 [J]. *水利学报*, 1993, (12): 18-25 [Li Baoru. Physical model design for river sedimentation in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, (12): 18-25]
- 张春生. 碎屑岩沉积模拟技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 41-171 [Zhang Chunsheng. *Clastic Sedimentation Modeling Technology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 41-171]
- 郑荣才, 叶泰然, 翟文亮, 等. 川西坳陷上三叠统须家河组砂体分布预测 [J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(3): 405-417 [Zheng Rongcai, Ye Tairan, Zhai Wenliang, et al. Prediction of sandbody distribution in the upper Triassic Xujiahe Formation, the West Sichuan Depression [J]. *Oil and Gas Geology*, 2008, 29(3): 405-417]
- 张健, 李国辉, 谢继容, 等. 四川盆地上三叠统划分对比研究 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(1): 12-16 [Zhang Jian, Li Guohui, Xie Jirong, et al. Stratigraphic division and correlation of Upper Triassic in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(1): 12-

- 16] sign for river sedimentation in China [J]. *Journal of Hydrodynamics A* ,1991 ,(S1) : 113-122]
- 14 刘金华,张世奇,孙耀庭,等. 川西前陆盆地上三叠统须家河组地层的划分对比及沉积演化 [J]. *地层学杂志*,2007,31(2): 190-197 [Liu Jinhua, Zhang Shiqi, Sun Yaoting, *et al.* Correlation and evolution of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the West Sichuan foreland basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(2): 190-197]
- 15 朱如凯,赵霞,刘柳红,等. 四川盆地须家河组沉积体系与有利储集层分布 [J]. *石油勘探与开发*,2009,36(1): 46-55 [Zhu Rukai, Zhao Xia, Liu Lihong, *et al.* Depositional system and favorable reservoir distribution of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 46-55]
- 16 赵霞飞,吕宗刚,张闻林,等. 四川盆地安岳地区须家河组一近海潮汐沉积 [J]. *天然气工业*,2008,28(4): 14-18 [Zhao Xiafei, Lu zonggang, Zhang Wenlin, *et al.* Paralic tidal deposits in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Anyue Area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(4): 14-18]
- 17 张春生,刘忠保. 现代河湖沉积与模拟实验 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 135-214 [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao. *Modern River and Lake Deposits and Simulated Experiment* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 135-214]
- 18 屈孟浩. 黄河动床河道模型的相似原理及设计方法 [J]. *泥沙研究*,1981,(3): 29-41 [Qu Menghao. Similarity criteria and modeling techniques of movable-bed models for the Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 1981, (3): 29-41]
- 19 李保如. 我国河流泥沙物理模型的设计方法 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*,1991,(S1): 113-122 [Li Baoru. Physical model design for river sedimentation in China [J]. *Journal of Hydrodynamics A* ,1991,(S1): 113-122]
- 20 何文社,方铎,刘有录,等. 黄河包头河段泥沙模型设计 [J]. *泥沙研究*,2000,(4): 69-73 [He Wenshe. Fang Duo, Liu Youlu, *et al.* A physical sediment model design at Baotou reach of the Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2000, (4): 69-73]
- 21 姚文艺,刘海凌,王卫红,等. 河型变化段河工动床模型设计方法研究 [J]. *泥沙研究*,1998,(4): 14-19 [Yao Wenyi, Liu Hailing, Wang Weihong, *et al.* Study on design of movable bed model in a reach with different river patterns [J]. *Journal of Sediment Research*, 1998, (4): 14-19]
- 22 郑荣才,朱如凯,戴朝成,等. 川东北类前陆盆地须家河组—山耦合过程的沉积—层序特征 [J]. *地质学报*,2008,82(8): 1077-1087 [Zheng Rongcai, Zhu Rukai, Dai Chaocheng, *et al.* Depositional sequence features during coupling process between basin and mountain of the Xujiahe Formation of Upper Triassic in the Foreland Basin, NE Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(8): 1077-1087]
- 23 谢继容,李国辉,唐大海. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析 [J]. *天然气勘探与开发*,2006,29(4): 1-13 [Xie Jirong, Li Guohui, Tang Dahai. Analysis on provenance-supply system of Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2006, 29(4): 1-13]
- 24 赖志云,周维. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成及演变的沉积模拟实验 [J]. *沉积学报*,1994,12(2): 37-41 [Lai Zhiyun, Zhou Wei. Experimental formation and development of lobate and birdfoot deltas [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 37-41]

Sedimentary Simulation of Xujiahe Fomation and Depositional Mechanism of Large Area Sandstone

MA Jin-wen^{1 2 5} LIU Zhong-bao² YIN Tai-ju^{1 2} YANG Wei³
SHI Zhen-sheng³ PU Xiu-gang⁴ LIAN Li-xia^{1 2}

(1. Geoscience School in Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023;

2. Key Laboratory of Oil & Gas Resources and Exploration Technology of MOE, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023;

3. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007;

4. Exploration and Development Research Institute of Dagang Oilfield Company, PetroChina, Tianjin 300280;

5. Geological Survey Institute, 3rd Branch of China Metallurgical Geology Bureau, Taiyuan 030002)

Abstract: The wide-spread sandstone in Xujiahe Fomation of the Upper Triassic, Sichuan Foreland Basin, is one of the most important exploration strata. With the exploration development of the gasfield, it needs to clarify the predominant factors that control the widespread sandstone developing to guide the further exploration and production.

To elucidate the depositional mechanism and spacial arrangement of the the widespread sandstone, the sedimentary physical simulation method was adopted to transform the original geological conditions into physical model, on base of investigating the evolution of tectonic, ancient landform and sedimentary system, and so on. And the simulation parameters were taken into consideration and designed to study the mechanism of widespread sandstone through the simulation of flume experiment technology. Three provenances were designed in the experiment to incarnate the

characteristics of sedimentary systems during different stages and at different locations under the multi-source conditions. Six intervals were simulated to playback the sedimentary characteristics, by conducting the experiment which was designed referring to principle of simulation and natural model method. The main controlling factors of widespread sandstone were concluded, by designed such as simulation parameters, such as flow, sediment flux, gradient, subsidence and lake level *et al.* Some preliminary conclusions are obtained as follows:

1. Under the gradual slope conditions, it is in the shallow area-at the depth of 2.3 cm, slope of 4 that distributary channels migrated frequently, where the area water passed became larger gradually. And so did the area where sandbody deposited and was retransformed, which was benefit for widespread sandstone developing. The sandbodies were universally thin and homogeneous. And the width-thickness ratio of the deltas is greater than 98:1.

2. In the experiment, when the flux was 4.35 l/s and sediment content was 9.5 g/s, the channels branched and sandbodies moved forward. While was 0.49 l/s and 0.4 g/s, single channel developed and sandbodies were eroded. So the flux and sediment content of different water association helped widespread sandstone development.

3. With tectonic subsidence and accommodation extending, the sand sediment developed to sandbodies of certain scale.

4. With frequent changes of the lake level, sandbodies of each stage expanded to different directions in the plane and overriding in vertical. Besides, the lobes combined laterally, widespread sandstone was easily developed.

5. In the experiment, convergence of 3 sources showed explain of the development of widespread sandstone. During 6th depositional stage, the lake level rised in ascending order: 10cm-12cm-14cm-16 cm-18cm, when the sandbodies deposited continuously towards the source regions. When the lake level dropped from 18cm to 12cm, the accommodation decreased, the sediment carried by rivers deposited in low-lying location and former sandbodies were reformed obviously, which was benefit to widespread sandstone.

In the depositional process, the channels bifurcated into distributary channels and lateral migrated continuously. The sandbody prograded and retrogradated vertically by fluctuation of lake level and assembled in horizontal and vertical direction. Then widespread sandstone developed.

Key words: large area sandstone; sedimentary simulation; main controls; multi-source