

富砂地层格架高分辨率层序地层学研究 及储层甜点预测

——以四川盆地合川地区须家河组为例

钟原^{1,2} 刘宏^{2,3} 谭秀成^{1,2,3} 连承波^{1,2} 廖纪佳² 刘明洁² 胡广² 曹剑⁴

(1.油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学) 成都 610500;2.西南石油大学地球科学与技术学院 成都 610500;
3.中石油碳酸盐岩储层重点实验室沉积—成藏研究室(西南石油大学) 成都 610500;4.南京大学地球科学与工程学院 南京 210023)

摘要 富砂致密砂岩储层的甜点预测是领域研究的一个关键和难点,以四川盆地中部合川地区须家河组二段为例,探索从继承性古地貌控制下的高分辨率层序地层学角度来展开研究。基于须二段沉积前雷口坡组岩溶古地貌恢复,认为继承性发展的岩溶古地貌控制了须二期地层的沉积充填,建立了须二段砂体向周缘地貌高地渐次超覆的地层充填模式。以该模式及高分辨率层序地层学理论为指导,综合利用地震、测井、岩芯等资料,在识别不同级别层序界面和湖泛面类型的基础上,将须二段划分为1个长期基准面旋回,又包括6个中期基准面旋回,自下至上为MSC1—MSC6。其中,MSC1—MSC3整体发育退积式辫状河三角洲,向东南超覆,属于上升半旋回;至MSC4达到最大湖泛面之后,随即进入下降半旋回;MSC4—MSC6发育进积式辫状河三角洲,粒度逐渐向上变粗。以基础资料最为丰富的MSC3为例,在层序格架内建立了“古地貌—层序厚度—砂体厚度—砂体物性—甜点分布”的相关关系,预测了有利储层甜点分布区。这些研究思路方法可供富砂致密砂岩储层研究,特别是井网稀疏、地震资料丰富但分辨率有限的地区研究参考,具体认识可直接应用于区域油气勘探部署。

关键词 致密油气 古地貌 高分辨率层序地层学 基准面旋回 储层甜点 须家河组 合川地区 四川盆地

第一作者简介 钟原 男 1988 出生 博士 储层地质 E-mail: andylan66@126.com

通讯作者 谭秀成 男 教授 E-mail: tanxiucheng70@163.com

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

0 引言

致密油气是指储存聚集于致密—低渗透岩层中的油气,因此寻找到相对优质的储层“甜点”是勘探和研究的关键^[1-3],然而,越来越多的实例显示,致密油气储层的“甜点”受控于沉积相、岩相和成岩作用等多种复杂因素^[4-7],因而关于储层“甜点”的预测也是领域研究的一个难点^[8-9],特别是在纵向上砂岩比例极大,且横向砂体较连续、分布范围较广、成因较单一的“富砂”地层中,大范围的致密砂体分布以及高砂地比使得无论是在沉积相上,还是在地球物理相上都很难找到“甜点”,传统的地质学方法遇到了很大的难题。

地层层序是沉积物形成与演化的基础,因此就理论而言,从地层层序格架入手,可以有助于致密砂岩

储层“甜点”识别^[10]。然而,当前的研究方案,普遍是基于Vail的层序地层学基本原理,包括低位体系域、海侵体系域和高位体系域三分法,主要适用于被动大陆边缘盆地的研究,其基本原则和思路用于陆相地层研究尽管已取得了一定的成效^[11-18],但对于致密砂岩研究,其划分准确性及精度仍较低,并不完全适用^[19-20]。因此,仍需要进一步结合实例来展开研究。

有鉴于此,本文以我国这一领域的油气勘探重点之一——四川盆地中部合川地区上三叠统须家河组第二段(简称须二段)为例,探索从高分辨率层序地层学角度来展开富砂致密砂岩地层的层序格架与储层“甜点”预测研究。研究对象为川中油气矿的重点产能建设区块,主体构造开发效果较好,钻探程度较高,基础资料较丰富,同时整个研究区地震测网较为密集,为展开从层序地层学角度研究富砂致密油气储

层甜点预测提供了难得的条件。前期勘探和研究已经揭示出储层研究的难度:非均质性较强,空间展布和变化趋势不明,因此研究区在主体构造之外,勘探效果并不理想,制约了滚动勘探和开发,但囿于领域研究的难度,这一问题迄今并未取得大的进展。故本次工作的研究结果可直接应用于区域油气勘探部署,另一方面,具体思路方法可供富砂致密砂岩储层研究参考。

1 地质背景

四川盆地合川地区位于盆地中部,区域构造隶属于川中古隆中斜平缓构造区,局部构造位于上三叠统前陆盆地斜坡—隆起带上,总面积约 $3.5 \times 10^3 \text{ km}^2$ (图1)。四川盆地在中晚三叠世(200 Ma)时,随古特提斯洋逐渐闭合,印支板块向扬子板块靠拢,俯冲消减引起海平面下降^[21],至晚三叠世早期,在结束上扬子地块被动大陆边缘盆地海相沉积史的同时,逐渐进入具有挤压构造背景条件的类前陆盆地演化阶段^[22-23]。至本次重点研究的上三叠统须二段沉积时期,对应于国际年代中的晚三叠世诺利克期,属于四

川前陆盆地最早时期的成盆期,此时松潘—甘孜褶皱带东缘已褶皱隆起,具有向东逆冲推覆的特征^[24],地形整体东高西低。

须家河组的沉积根据地震剖面追踪,须一段仅在合川地区西北部局部发育,说明须一段沉积期湖水波及范围在本区仅影响到合川地区西北部,其余地区缺失须一段沉积(图1)。相比而言,须二段地层全区均有分布,为一套温暖潮湿气候条件下的陆源碎屑岩沉积,主要岩性为大套块状砂岩夹黑色页岩和煤沉积,地层厚度为150~250 m(图1),总体表现出西厚东薄的特征。

2 数据和方法

本次工作的基础分析数据主要来自研究区主体构造及外围区的地震、测井、钻井等方面,包括126条覆盖研究区的二维地震测线,共计5 000 km;计300余口探井及开发井测井资料;3口全取芯井岩芯资料(合川149井、合川5井、合川001-69井),基础资料充足。

对于四川盆地须二段的高分辨率层序地层学研

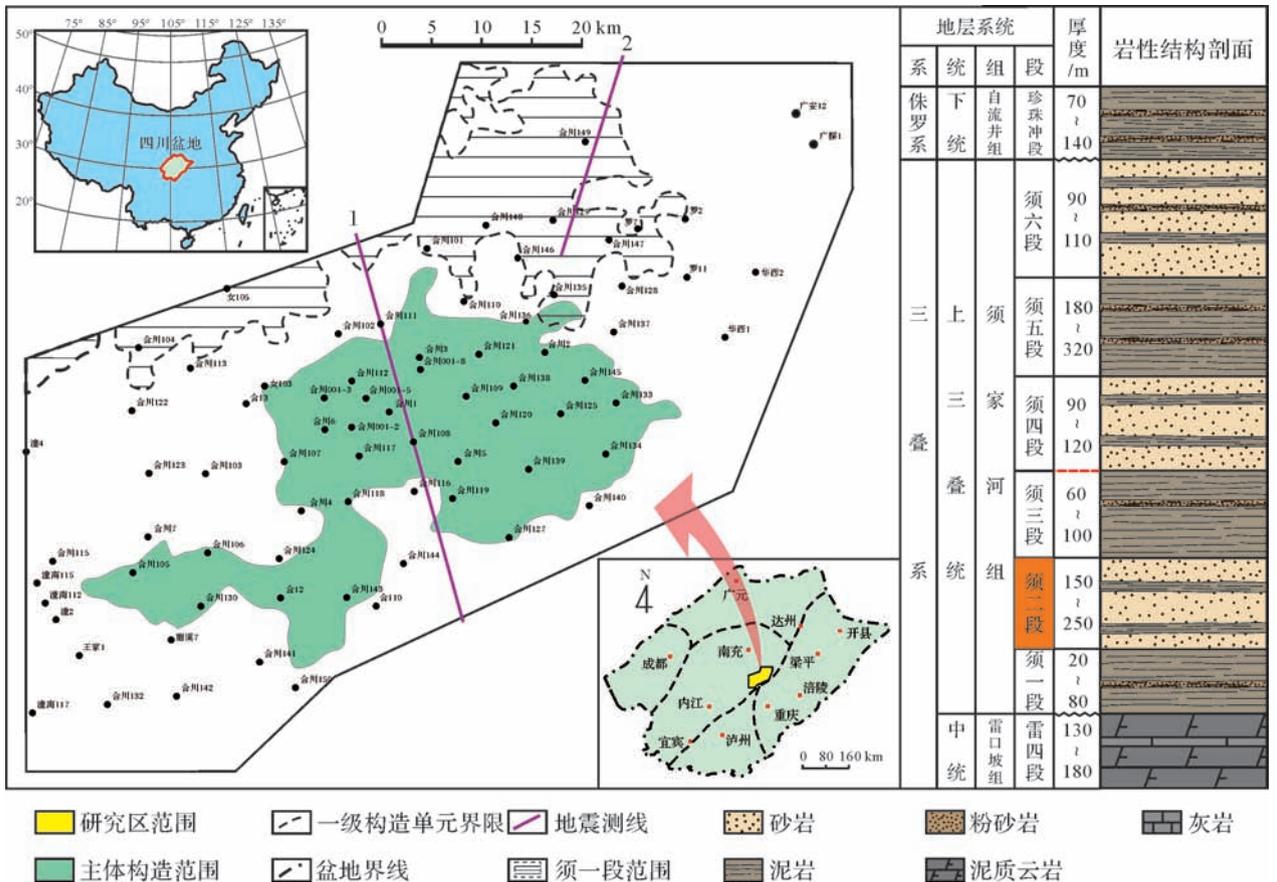


图1 四川盆地区域构造及研究区须家河组地层概况

Fig.1 Sketch geological map showing the Sichuan Basin and generalized stratigraphy of Xujiache Formation

究目前相对较少,并且在研究中对于层序界面的识别及基准面的划分主要依靠岩芯、测井、露头及地震资料^[25-27],而几乎没有考虑到将沉积前古地貌作为重要因素之一来研究地层充填模式及约束层序划分。本次研究首先以沉积学基本原理为指导,采用印模法恢复须二段沉积前中三叠统雷口坡组顶部(简称雷顶)的岩溶古地貌,并结合地震、测井、岩芯等资料分析古地貌对早期地层充填的控制作用,建立古地貌约束下的早期地层充填概念模型。在此基础上,进一步采用高分辨率层序地层学方法开展研究工作,以丰富的井震资料相结合,识别长期基准面旋回(LSC)层序界面;对于中期基准面旋回(MSC)层序界面,则采用分辨率较高的测井曲线与岩芯相结合的方法进行识别。在识别出各级层序界面之后,进行层序划分,建立层序演化模式并分析层序成因。最后,在层序格架内基于古地貌对砂体分布的控制进行储层分布预测,以此为富砂地层致密砂岩气藏勘探和开发提供借鉴和支撑。

3 古地貌控制下的地层充填模式

合川地区虽钻井众多,但主要分布于合川主体构造区(图1),因而难以利用钻孔地层厚度精细刻画须家河组沉积期的宏观古地貌。考虑到须一至须二期沉积是对雷顶岩溶古地貌的“填平补齐”,须三期为盆内湖泛泥质沉积,说明须二顶具有相对等时性^[28],且在地震剖面上雷顶和须二顶界易于追踪和对比(图2),表明可以利用地球物理方法获取雷顶—须二顶的印模地层厚度,进而精细刻画须家河沉积前岩溶古地貌。然而,须一至须二段为砂泥岩地层,并以砂

岩为主,不同井区可能因砂地比不同,其原始地层厚度可能与现今地层厚度存在较大的差异,并且地震地层厚度法的井间砂地比难以准确求取,这给原始地层厚度恢复带来很大困难。鉴于此,本文统计了区内84口直井须一段与须二段的累计厚度,在考虑地层压实率的前提下,利用关振良^[29]提出的压实模拟计算地层古厚度方法,恢复了84口直井的原始地层厚度。结果发现,现今地层厚度与恢复后的原始地层厚度存在良好的线性相关关系(图3),表明区内现今地层厚度变化趋势可近似代表原始沉积地层厚度变化,因而可以运用现今地层厚度近似恢复须家河组沉积前岩溶古地貌。

据此,本次工作以雷顶—须二顶的井震地层厚度变化近似表征须家河组沉积前岩溶古地貌(图4)。从古地貌图可看出,须家河组沉积前的古地形具有平缓向西北倾覆的特征,区内具有次一级的地势起伏,凹凸变化明显,并发育有多条向北西向展布的沟谷系统。结合合川地区在四川盆地晚三叠世沉积前古地质图上的位置^[28],可以判断物源方向主要来自于东南部的江南古陆。

基于以上的古地貌恢复成果(图4),结合横切沟谷的地层、岩性对比剖面 and 地震剖面特征,发现古地貌相对低洼处以粗粒沉积为主(图5A),且可观察到在古地貌相对低洼处地层向两侧高地上超的现象(图5B);相比而言,在地貌高处,以细粒沉积物发育为特征(图5A)。这一沉积现象难以用传统的滩坝沉积模式解释,同时,若解释为三角洲沉积的水下部分,在高地因受到湖浪的叠合改造,高地沉积物也应为分选更好的较粗粒沉积物。因而,从沉积过程来

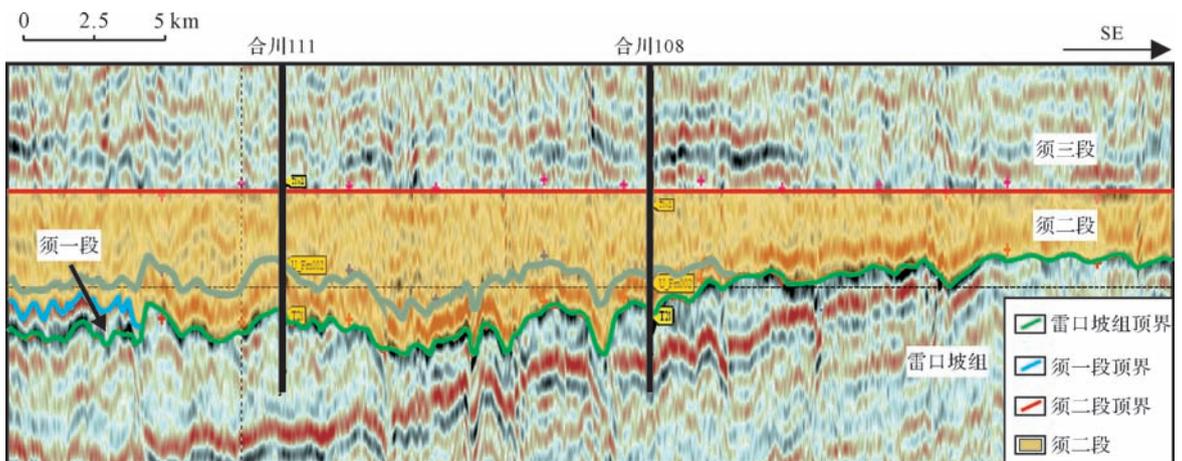


图2 地震测线1剖面(见图1)须二段顶底界特征

Fig.2 Top and bottom boundaries feature of the second member of Xujiahe Formation in seismic section 1(Fig.1)

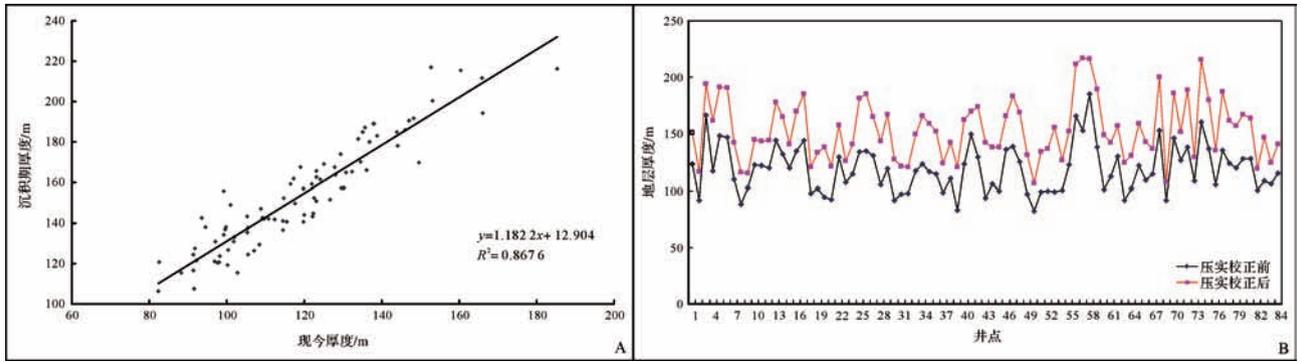


图3 合川地区须一、须二段地层压实校正前后厚度相关图

A.散点图;B.折线图

Fig.3 The correlogram of total strata thickness before and after decompaction correction of the first and second member of Xujiahe Formation in Hechuan area

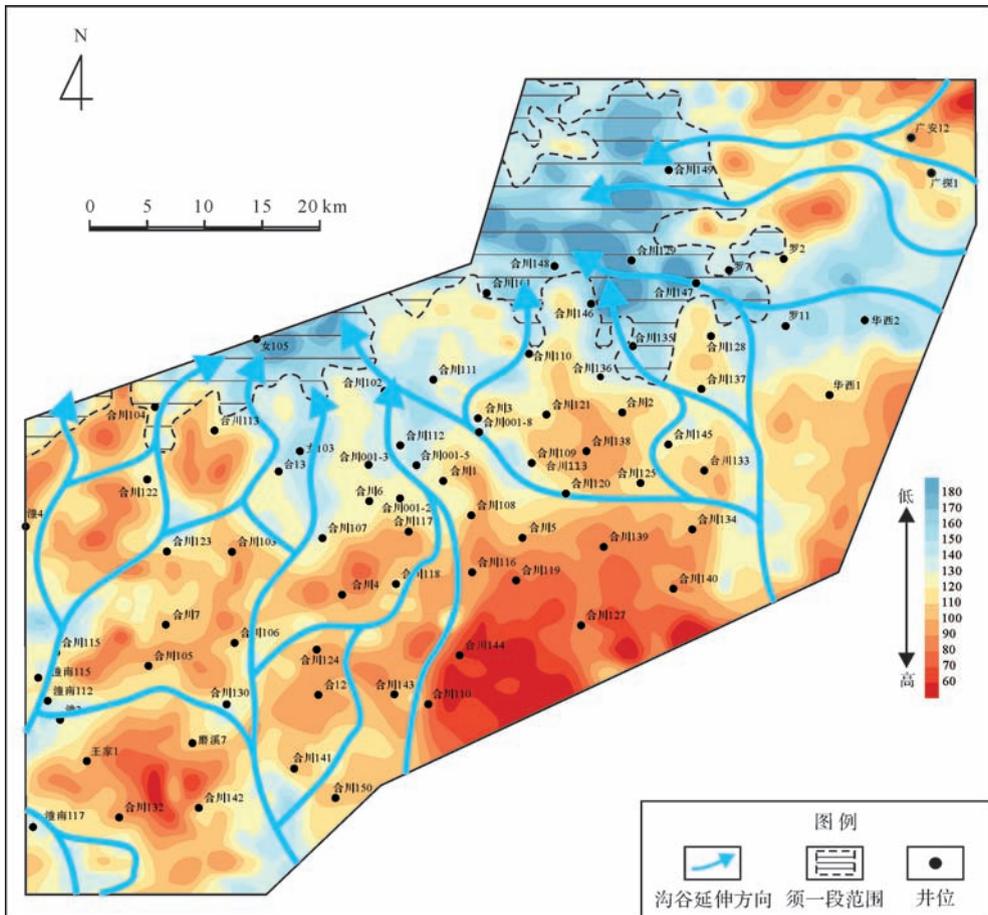


图4 合川地区须家河组沉积前古地貌图

Fig.4 The palaeogeomorphological feature before Xujiahe Formation deposit in Hechuan area

看,更为合理的解释为:地貌低地属于河道粗粒沉积物,而在洪泛期,洪水漫溢出河道,流面变宽,河道两侧相对高地沉积细粒的漫溢沉积物,也可能伴有沼泽和低洼湖泊沉积。综上认为,在这一古地貌控制下,宽浅型湖盆背景下发育的辫状河三角洲,以辫状河三角洲平原发育为特征^[28],结合取芯及测井资料,可以

证实合川地区砂体基本均为分流河道所形成(图6)。

进一步分析发现,岩溶微地貌差异对砂体分配和堆积控制作用极为明显,岩性及岩相的变化正是这种局部微地貌的差异所造成的,由此可建立合川地区须二段沉积初期在古地貌基础上的充填概念模式(图7)。如图7所示,在沉积初期,随着基准面的相对上

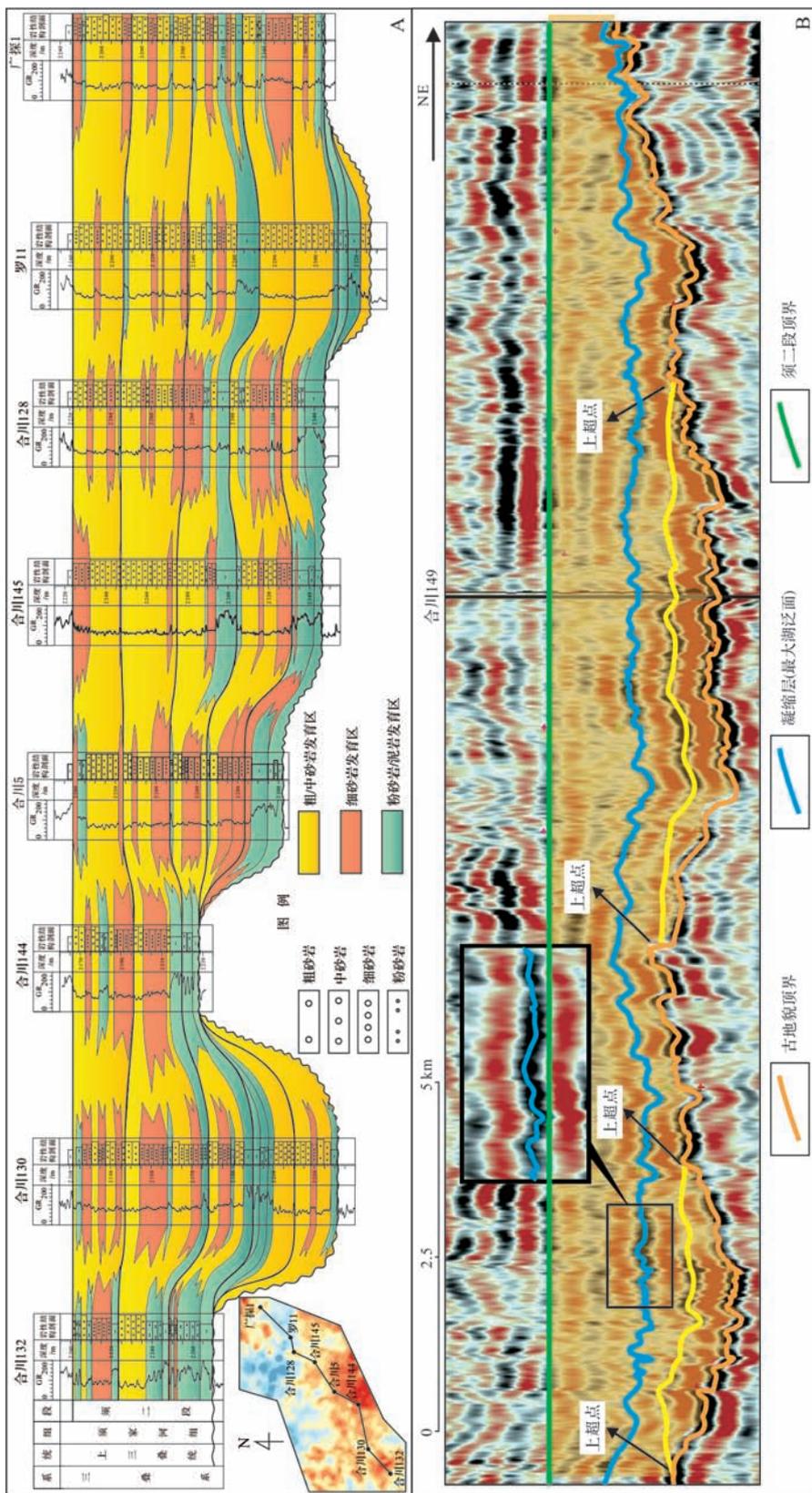


图5 合川地区横切沟谷剖面上古地貌对须家河组地层充填及砂体分布的控制
 A.横切沟谷剖面上沟谷充填粗粒砂质沉积物;B. 2 地震测线剖面(见图1)上沟谷内地层向两侧高地上超
 Fig.5 Palaeogeomorphology controls the Xujiahe Formation filling and sand-body distribution along the crosscut valley section in Hechuan area

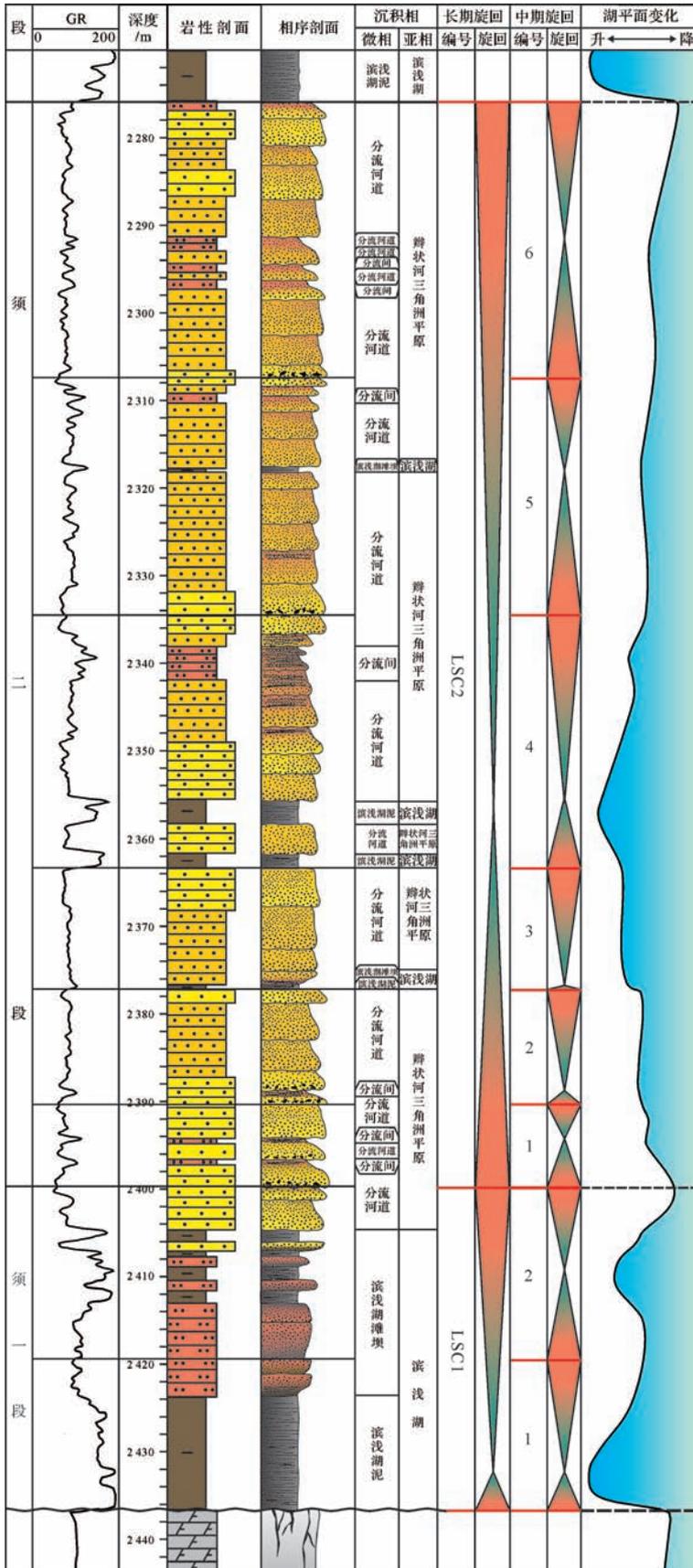


图6 合川149井单井综合柱状图

Fig.6 Single well integrated histogram(Well Hechuan 149)

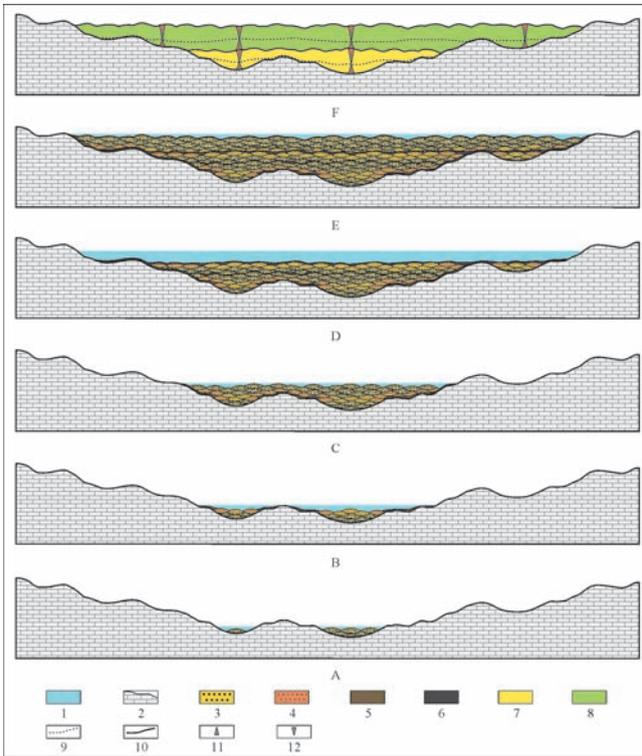


图7 合川地区横切沟谷剖面早期地层充填概念模型

1.水体;2.沉积期地貌;3.粗粒分流河道砂体;4.细粒分流河道砂体;5.分流间细粒沉积物;6.湖泛泥岩;7.第一次基准面升降充填地层;8.第二次基准面升降充填地层;9.最大湖泛面;10.层序界面;11.上升半旋回;12.下降半旋回

Fig.7 Early strata filling conceptual model along the crosscut valley section in Hechuan area

升,在岩溶沟谷及洼地率先沉积粗粒分流河道砂体,将洼地与沟谷逐渐填平(图7A)。在洪泛期,河水漫溢至河道两侧高地,流面变宽、流速下降,使两侧高地沉积了细粒分流间湾/河漫沼泽沉积物,形成沟谷富砂且厚度大、高地富细粒沉积物但厚度小的沉积特征(图7B)。随后基准面下降,继续在沟谷沉积粗粒砂质沉积(图7C);而在下一期基准面上升至最大湖泛期,粗粒物源退积,以发育细粒湖泛泥质沉积物为特征(图7D)。之后,随着基准面相对下降,再次出现沟谷富砂、相邻高地富细粒沉积物的特征(图7E)。这样的基准面升降过程反复发生,且总体处于相对上升阶段时,砂体就会相互叠置,并且沿两侧古地貌高地逐层超覆,地貌逐渐被填平,从而形成了古地貌低部位粗粒砂质沉积物所占厚度及比例较大,高部位细粒砂质及泥质沉积物增多,粗粒砂质沉积物所占厚度及比例较小的特征。同时,古地貌低部位往往较高部位地层厚度大、发育齐全,在古地貌高部位地层较薄,且或多或少具有一定程度的沉积缺失现象(图7F)。

4 高分辨率层序地层特征及演化模式

4.1 层序划分

如上所述,可以看出合川地区须二段富砂地层早期的形成不受湖水波浪作用的直接控制,不发育湖泊作用为主的滩坝砂体,但是湖平面对应的基准面升降变化是层序形成的不可或缺的条件,正是由于基准面频繁的升降变化,才可能导致可容空间大小交替出现,从而地层逐渐向高地超覆并覆盖整个合川地区。因此本次研究基于古地貌对地层充填的控制模式(图7),采用高分辨率层序地层学方法,在识别出不同级次基准面旋回层序界面及湖泛面的基础上,将合川地区须一段、须二段分别划分为2个长期基准面旋回层序LSC1、LSC2,再进一步根据岩芯、测井资料将须二段(LSC2)划分为6个中期基准面旋回,自下至上分别为MSC1-MSC6(图6)。

4.2 层序界面特征

4.2.1 长期基准面旋回层序界面特征

合川地区须一段(LSC1)、须二段(LSC2)的顶底界面地震剖面特征如图2所示,须一段底界为雷口坡组顶部削截面,顶部上超于雷口坡组顶部不整合面之上,须二段底部在北西方向靠近湖盆中心一侧局部表现为与须一段的整合接触,在向东南方向变为与雷口坡组顶部的角度不整合接触,顶部与须三段在研究区表现为整合接触。

在岩性上,层序界面即为不整合面和沉积转换面,此界面代表基准面从下降到上升的转换。合川地区LSC1、LSC2长期基准面旋回界面表现为岩性突变面及由粗碎屑进积式组合向细碎屑退积式组合的转换面。LSC1底界泥岩与下伏雷口坡组顶界灰岩呈突变接触(图8A)。LSC2为辫状河三角洲平原分流河道大套砂岩夹薄层泥岩,其底部层序界面在研究区不同位置表现出不同的特征,在北部古地貌低部位,LSC2底部与LSC1顶部为砂岩冲刷接触,呈渐变过渡(图8B),层序界面表现为侵蚀冲刷面;在南方古地貌高部位,LSC2底部砂岩与雷口坡组顶部碳酸盐岩呈突变接触(图8C),LSC2顶部层序界面之下为粗碎屑砂岩沉积,界面之上为湖平面快速上升形成的细粒退积沉积段,代表了水体由浅到深快速的转变(图8D、图8E)。

4.2.2 中期基准面旋回层序界面特征

LSC2内部更高频的中期基准面旋回层序界面在岩性上主要表现为砂岩与湖泛泥岩的突变接触以及

冲刷面两种形式(图9),也均反映水体由浅到深、由进积式组合向退积式组合的转换。

在电性上,中期基准面旋回层序界面表现为两种形式,一种为GR曲线由齿化漏斗或齿化箱形正向漂移突变为低幅的齿化箱型和漏斗形(图10A),反映了一种水体快速加深、沉积物供应不足、基准面快速上升的特征;另一种为GR曲线由微齿化箱型逐渐过

渡为齿化箱形—钟形(图10B),界面自然过渡,反映水体上升速度缓慢或沉积物供应充足,基准面缓慢上升的特征。

4.3 最大湖泛面

LSC2 最大湖泛面在 seismic 剖面上对应高连续强振幅的反射结构特征(图5B),可以明显追踪到一套俗称为“腰带子”的凝缩层^[30]。在岩性和电性剖面上,

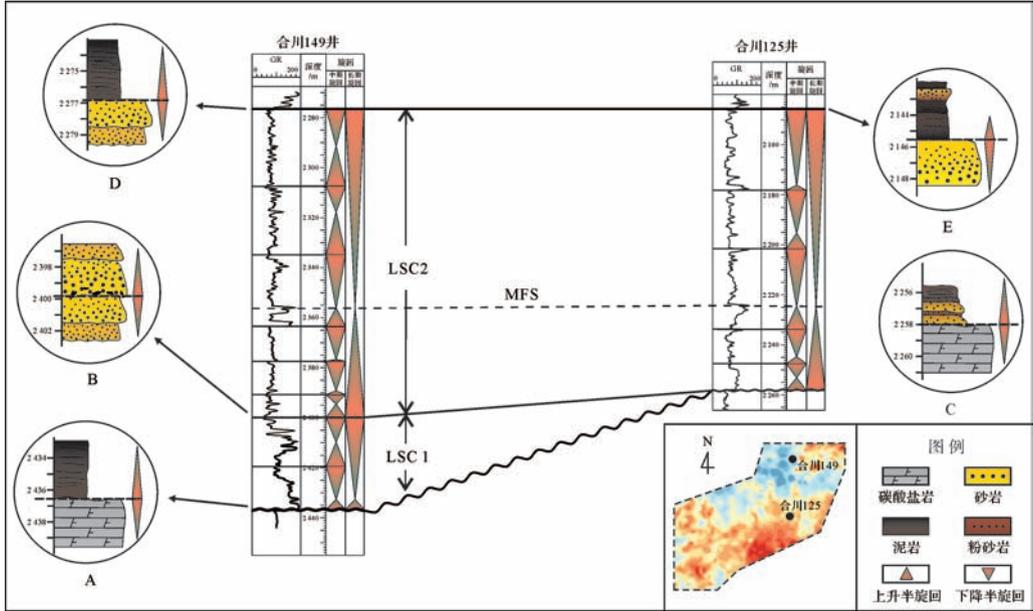


图8 合川地区不同地段 LSC1、LSC2 层序界面的岩性响应特征

A. 界面下为灰岩,界面上为湖泛泥岩; B. 界面下为分流河道砂岩,界面上为分流河道砂岩; C. 界面下为灰岩,界面上为分流河道砂岩; D. 界面下为分流河道砂岩,界面上为湖泛泥岩; E. 界面下为分流河道砂岩,界面上为湖泛泥岩

Fig.8 Lithological response to LSC1 and LSC2 sequence boundaries in different sectors of Hechuan area

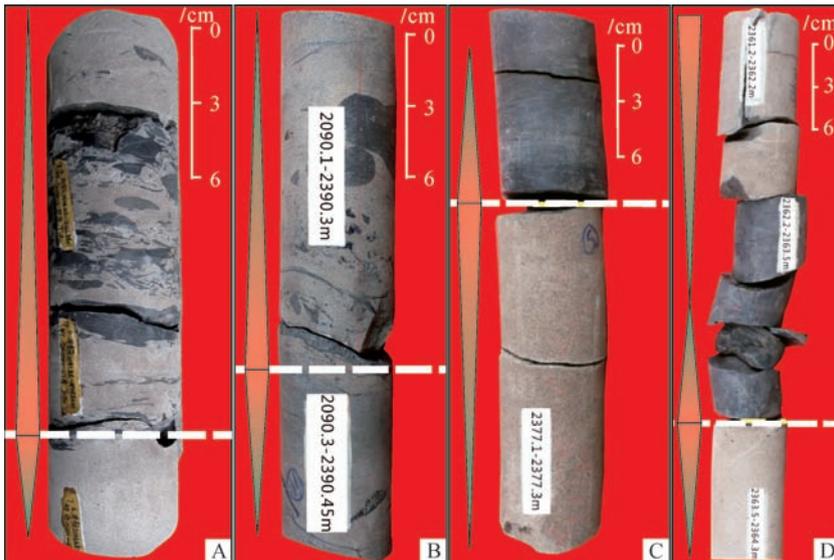


图9 合川地区 LSC2 内部中期旋回层序界面的岩性响应特征

A. 冲刷面及冲刷泥砾,合川 001-69 井,须二段,2 141.56 m; B. 冲刷面及冲刷泥砾,合川 149 井,须二段,2 390.3 m; C. 湖泛泥岩,合川 149 井,须二段,2 377.1 m; D. 湖泛泥岩,合川 149 井,须二段,2 363.5 m。

Fig.9 Lithological response to mid-term base-level cycle sequence boundary of LSC2 in Hechuan area

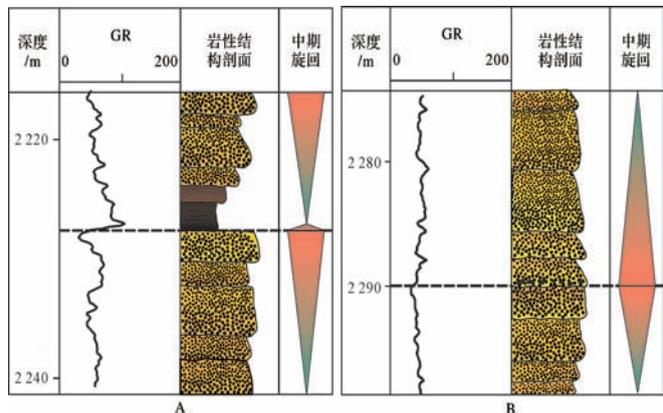


图10 合川地区LSC2内部中期旋回层序界面的电性特征
A.合川102井层序界面典型电性特征;B.罗11井层序界面典型电性特征

Fig.10 Electrical characteristic of mid-term base-level cycle sequence boundary of LSC2 in Hechuan area

对应MSC4初期一套暗色泥岩及GR最大值处,代表基准面上升到最高点;LSC2内部中期基准面旋回最大湖泛面表现为暗色泥岩或粉砂质泥岩,对应GR均为最大值(图6)。

4.4 层序地层特征

在识别基准面旋回层序界面与最大湖泛面特征及单井层序划分的基础上,对合川地区须二段进行连井层序对比,确定层序地层特征及演化模式,以位于工区东部、走向北西—南东向的合川148—合川146—合川136—合川2—合川125—合川134井剖面(图11),以及横跨整个工区、走向北东—南西向的合川132—合川130—合川144—合川5—合川145—合川128—罗11—广探1井剖面(图12)为例进行分析。

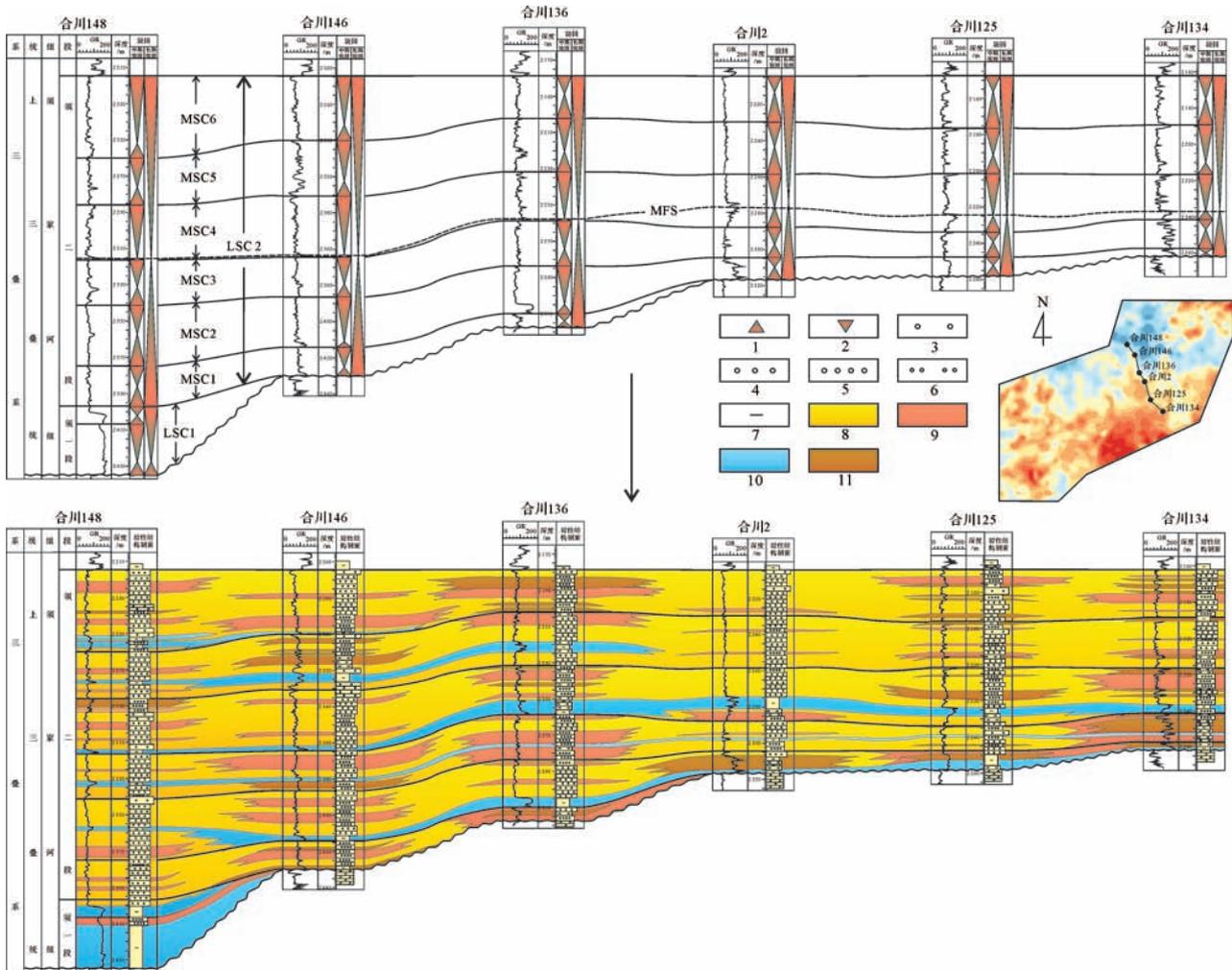


图11 合川地区须二段北西—南东向连井层序对比剖面

- 1.上升半旋回;2.下降半旋回;3.粗砂岩;4.中砂岩;5.细砂岩;6.粉砂岩;7.泥岩;8.辫状河三角洲平原主流河道;9.辫状河三角洲平原次级分流河道;10.滨浅湖;11.分流间/河漫

Fig.11 Sequence correlation section of the second member of Xujiahe Formation along the northwest-southeast direction in Hechuan area

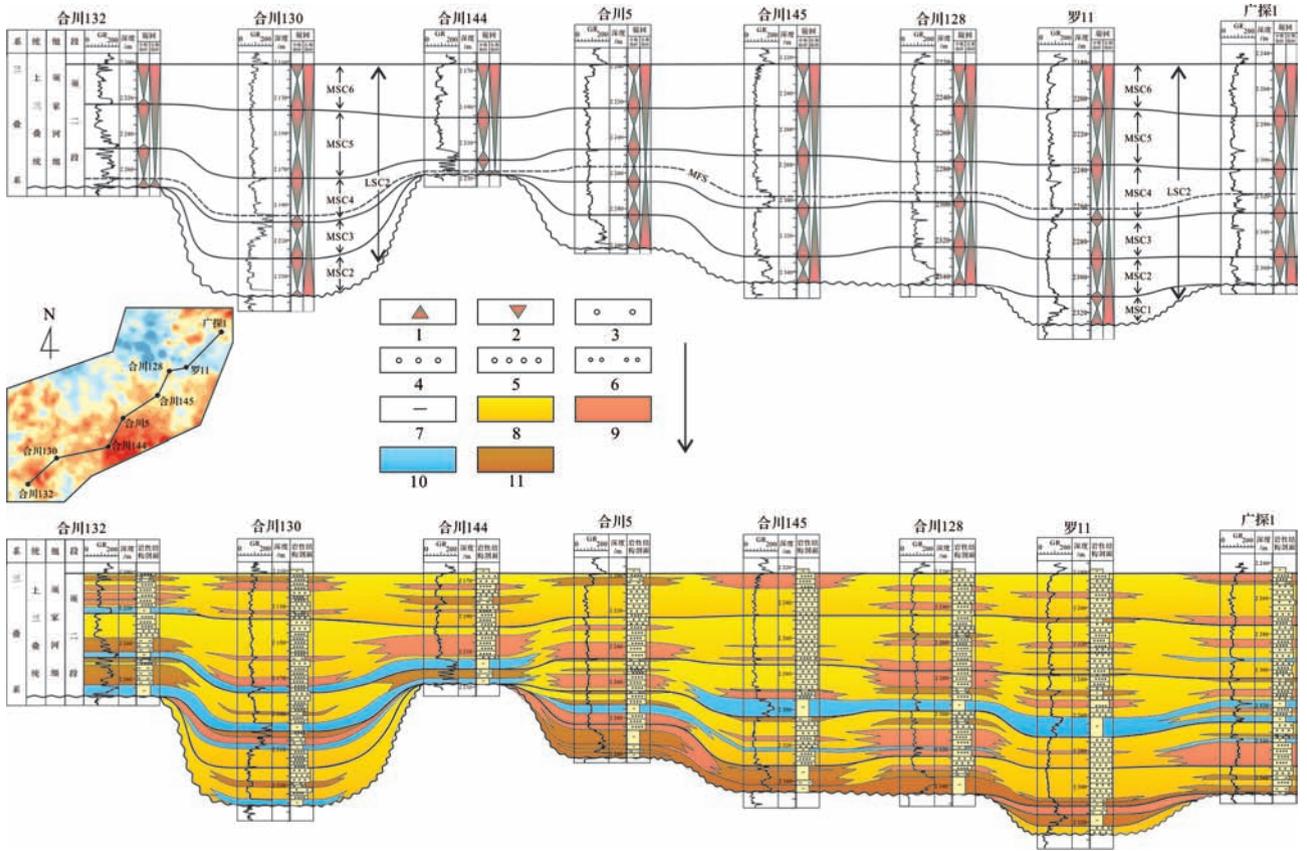


图 12 合川地区须二段北东—南西向连井层序对比剖面

- 1. 上升半旋回; 2. 下降半旋回; 3. 粗砂岩; 4. 中砂岩; 5. 细砂岩; 6. 粉砂岩; 7. 泥岩; 8. 辫状河三角洲平原主流河道; 9. 辫状河三角洲平原次级分流河道; 10. 滨浅湖; 11. 分流间/河漫

Fig.12 Sequence correlation section of the second member of Xujiahe Formation along the northeast-southwest direction in Hechuan area

如图 11 所示,从沿古地貌倾覆方向的连井剖面可以看出, LSC2 总体为一个湖侵到湖退的过程, MSC1、MSC2、MSC3 及 MSC4 早期对应基准面上升半旋回,地层向南东高地逐层超覆; MSC4 后期、MSC5、MSC6 对应基准面下降半旋回。

从横切古地貌沟谷方向的连井剖面(图 12)可以看出,沉积初期 MSC1、MSC2、MSC3 地层向两侧古地貌高地逐层超覆, MSC4 早期达到 LSC2 最大湖泛期, MSC4 沉积后基本将古地貌完全覆盖, MSC5、MSC6 地层厚度变化不大。

4.5 层序地层演化模式

通过以上对合川地区须二段层序地层的研究,建立了该区须二段层序地层演化模式,分别为长期基准面上升期(大致等同于 MSC1、MSC2、MSC3)沉积演化阶段和长期基准面下降期(大致等同于 MSC4、MSC5、MSC6)沉积演化阶段模式(图 13)。

4.5.1 长期基准面上升期沉积演化模式

MSC1 沉积相类型及展布强烈受控于下伏的岩

溶古地貌,在靠近物源的岩溶古地貌低地和峡谷部位主要发育辫状河道及少量的河漫沉积;辫状河道入湖后,进积至浅水湖盆,由于湖盆水体浅,水动力弱,三角洲主要表现为河流作用为主,进而形成向前快速推进的辫状河三角洲,并且以辫状河三角洲平原为主,以分流河道叠置迁移为特色。随着基准面的上升, MSC2 总体上向高地超覆,辫状河三角洲平原面积向高地扩大。到 MSC3 沉积期,沉积相特征及展布仍然受控于岩溶古地貌和基准面的升降,其辫状河三角洲平原面积进一步向西、南、东北高地不断扩大,仅有南部部分高地未沉积。整个长期基准面上升期地层厚度北西厚,向南东高地逐渐减薄,总体向上粒度逐渐变细。

4.5.2 长期基准面下降期沉积演化模式

在 MSC4 沉积早期湖侵达到了最大湖泛面,岩性上可以看到一套较纯的暗色湖侵泥岩,除南部部分高地外,基本覆盖了整个合川地区。在南东方向远离湖盆中心的位置过渡为分流河道所形成的砂质沉积。

最大湖泛沉积之后, LSC2 进入了基准面下降期的发育阶段, MSC5 沉积期工区全部被辫状河三角洲平原所占据, 分流河道广泛发育。MSC6 沉积期物源供给十分充足, 研究区依然以辫状河三角洲平原水上分流河道为主。整个长期基准面下降期发育进积式辫状河三角洲, 粒度逐渐向上变粗。由于是辫状河三角洲平原分流河道快速向前进积, 辫状河三角洲前缘很小, 基本不发育, 在地震剖面上上超现象消失。长期

基准面下降期分流河道分布范围完全覆盖了整个合川地区, 整体厚度依然是北西厚南东薄, 但差距不大。长期基准面下降半旋回沉积后, 须二段填平补齐过程基本完成。

4.6 层序地层成因

研究区须家河期发育前陆盆地, 前陆盆地是大陆岩石圈受上覆逆冲推覆体加载引起挠曲变形而形成的边缘坳陷盆地, 其形成主要与区域上的构造挤压应

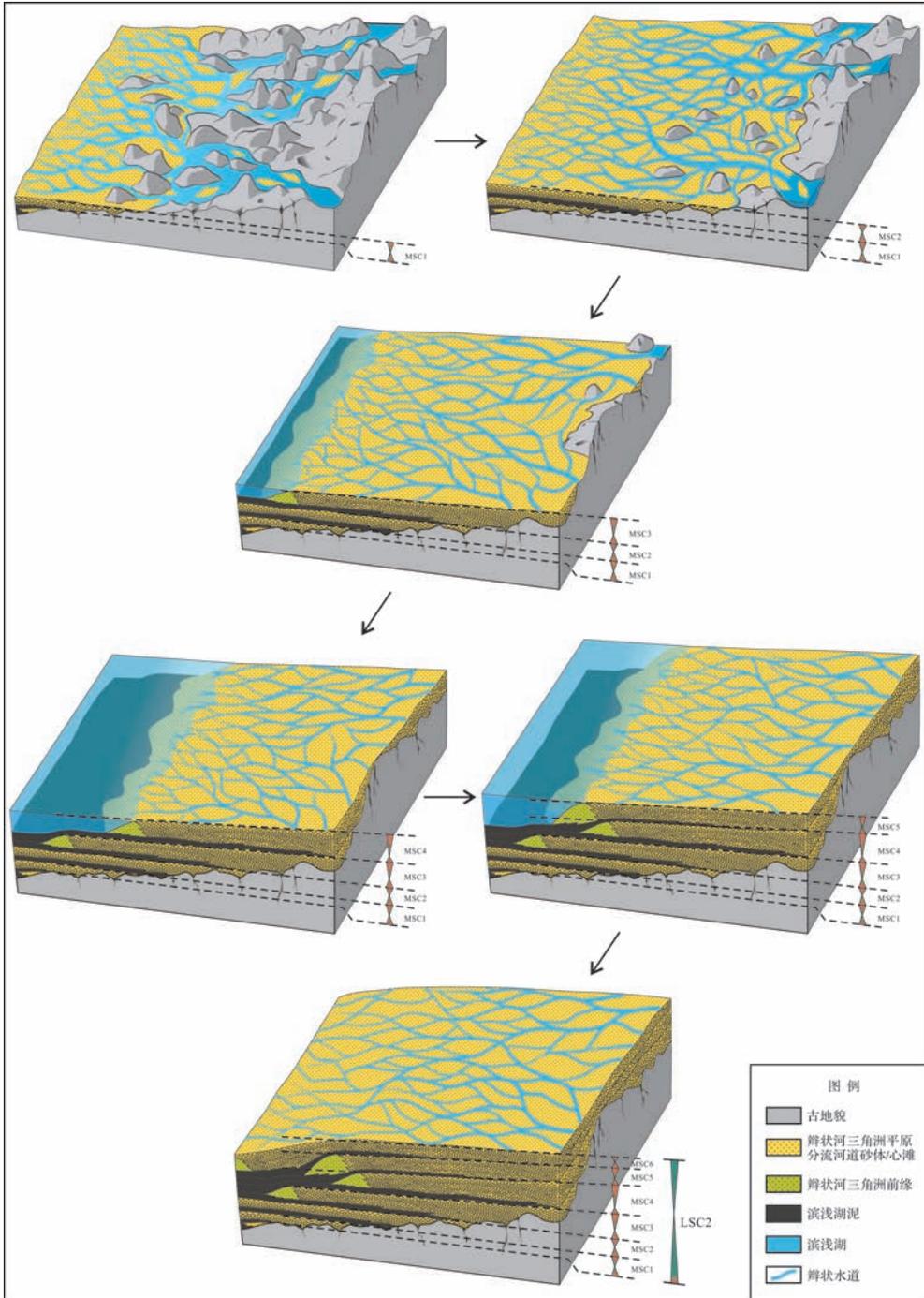


图 13 合川地区须二段层序演化模式

Fig.13 Evolution model of sedimentary sequence of the second member of Xujiahe Formation in Hechuan area

力和地貌载荷引起的挠曲作用有关^[31]。须一段沉积后,由于地壳深部调整作用引起的构造反转使得龙门山开始形成逆掩席体,对岩石圈的骤加载荷导致研究区的岩石圈下拗,岩石圈的刚度决定了下拗以挠曲的方式实现^[32]。须二段早期,龙门山逆掩席体使岩石圈弯曲,引起前缘拗陷,区域性可容空间增大,沉降速率大于沉积速率,湖平面上升,盆地处于欠补偿状态^[33]。合川地区处于前陆斜坡位置,下降幅度较中心小,但趋势一致,因此沉积了一套基准面上升期向上逐渐变细的、以退积式辫状河三角洲为主的地层。须二段晚期,由于构造沉降速率减慢,来自于盆地周缘古老山系及古隆起的剥蚀作用速率超过沉降速率,并且此时的古气候表现为温和干燥的特征^[34-35],湖平面下降,沉积物供应量加大,可容空间减小,沉积物向湖盆中心进积,形成了一套基准面下降期以进积式辫状河三角洲为主的地层。在构造静止期,地壳应力松弛发生回弹上隆,在盆地边缘形成微角度不整合—侵蚀不整合,标志着一次构造事件结束和层序界面的形成。

5 高分辨率层序格架内储层“甜点”分布预测

在以上对层序地层详细研究的基础上,于大工区范围层序格架内对储层分布进行预测。考虑到层序在工区分布的完整性及基础资料的丰富程度,以研究条件最好的 MSC3 层序为例。

如前所述,本次工作的层序划分是基于古地貌控制的基础上实现的,在 MSC3 沉积时,由于依然受到继承性古地貌的影响,在古地貌低部位,层序厚度较大,沉积相对粗粒的骨架砂体,其所占比例及厚度较大;而在古地貌相对高部位,层序厚度较小,整体上细粒砂质、泥质沉积物所占比例较大,粗粒骨架砂体所占比例及厚度较小,即骨架砂体在古地貌上具有“低厚高薄”的特征。因此在 MSC3 层序格架内,以全取芯井观察所建立的测井响应特征对平面上各井点中一粗砂岩骨架砂体进行识别,并统计其累计厚度,根据古地貌—骨架砂体的相关性,绘制出了 MSC3 骨架砂体的厚度等值线图(图 14)。如图 14 所示,骨架

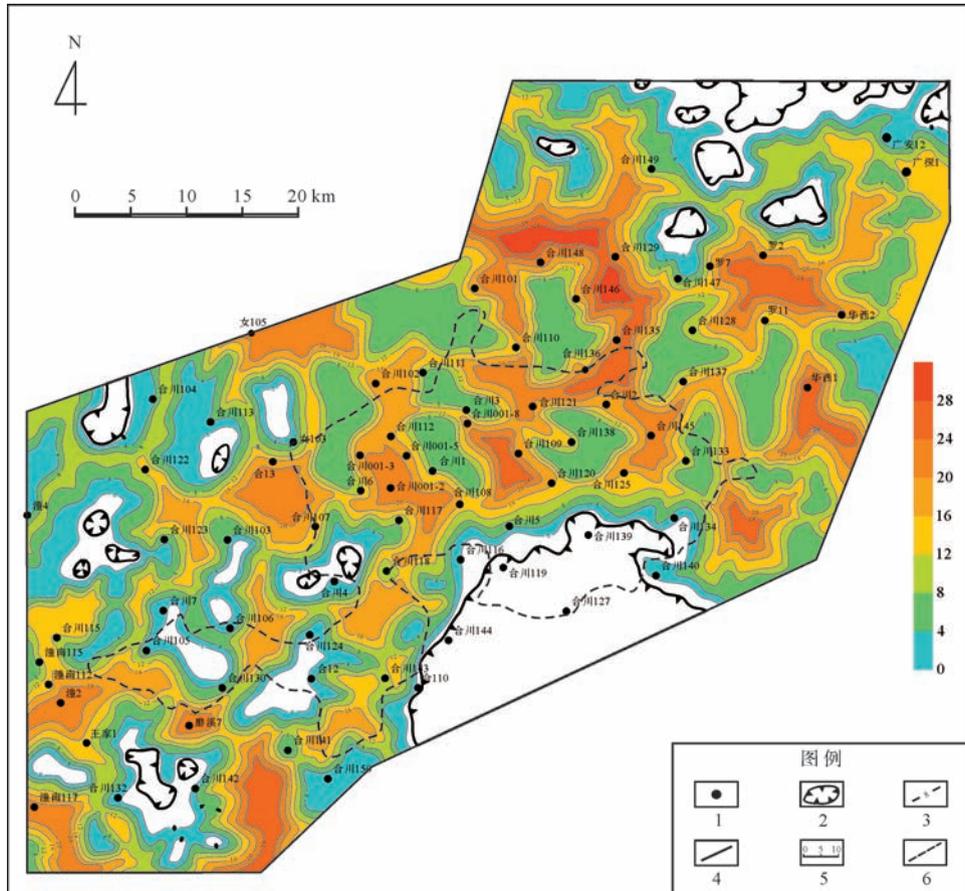


图 14 合川地区须二段 MSC3 骨架砂体厚度等值线图

1. 井位;2. 尖灭线;3. 等值线;4. 研究区边界;5. 比例尺;6. 主体构造区范围

Fig.14 The isopachous map showing skeletal sand-body thickness of MSC3 in the second member of Xujiache Formation, Hechuan area

砂体相对较厚区域分布于古地貌的洼地、沟谷地区，整体呈南北向条带状交织展布。

进一步将各井点储层厚度值进行统计，建立了骨架砂体厚度—储层厚度相关性散点图(图15)，发现二者呈明显正相关性，因此综合以上分析可建立继承性古地貌基础上横切沟谷剖面的储层分布概率模式图(图16)，MSC3在继承性古地貌的影响下，总体具有低部位“层序厚度大—骨架砂体累计厚度大—储层厚度大”的特征，即骨架砂体累计厚度大的区域储层发育概率及累计厚度也相对较高，因此在骨架砂体厚度等值线图的基础上预测了MSC3储层厚度等值线图(图17)，从储层厚度预测图上可看出储层总体亦发育于古地貌相对低洼的地区，展布趋势整体呈条带状交织，厚度较大的区域呈斑块、甜点状分布，

并结合主体构造区丰富的钻井资料证实区内储层的展布趋势与实际吻合程度较高。

对外围构造区储层的预测发现存在较多“甜点”区域，合川148井区以北储层厚度最大，可达12 m以上；在罗2井区与罗11井区之间、合川145井区以东、华西1井区、潼2井区、潼南117井区等区域储层厚度也在10 m以上。

综上所述，这样的方法实现了从大面积分布的砂体中提取物性较好的骨架砂体，同时骨架砂体的展布预测也是基于沉积学原理的分析上实现的，所以在此基础上得到的储层预测结果具有科学的理论支撑，可信度相对较高，可直接应用于区域油气勘探部署。这一研究思路方法可供富砂致密砂岩储层，特别是井网稀疏、地震资料丰富但分辨率有限的地区研究参考。

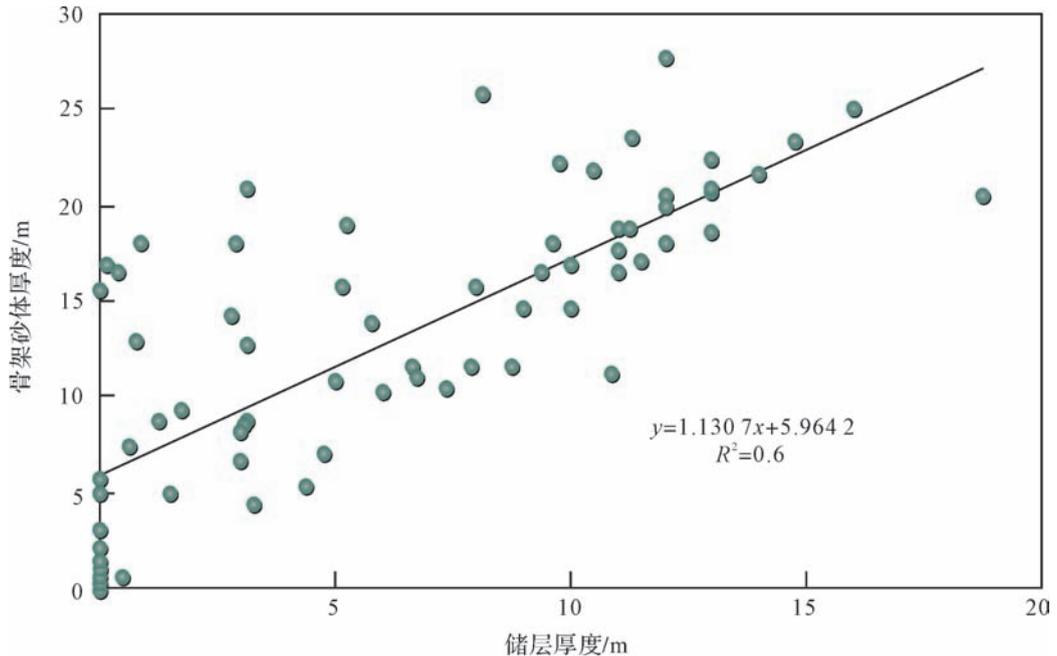


图15 MSC3储层厚度与骨架砂体厚度相关散点图

Fig.15 The correlogram of reservoir thickness and skeletal sand-body thickness of MSC3

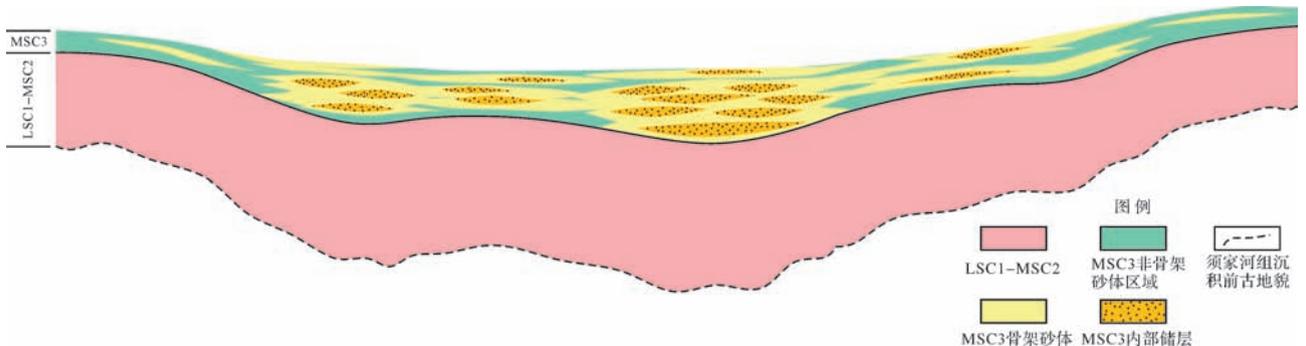


图16 横切沟谷剖面MSC3储层分布概率模式图

Fig.16 The mode pattern of reservoir distribution probability of MSC3 along the crosscut valley section

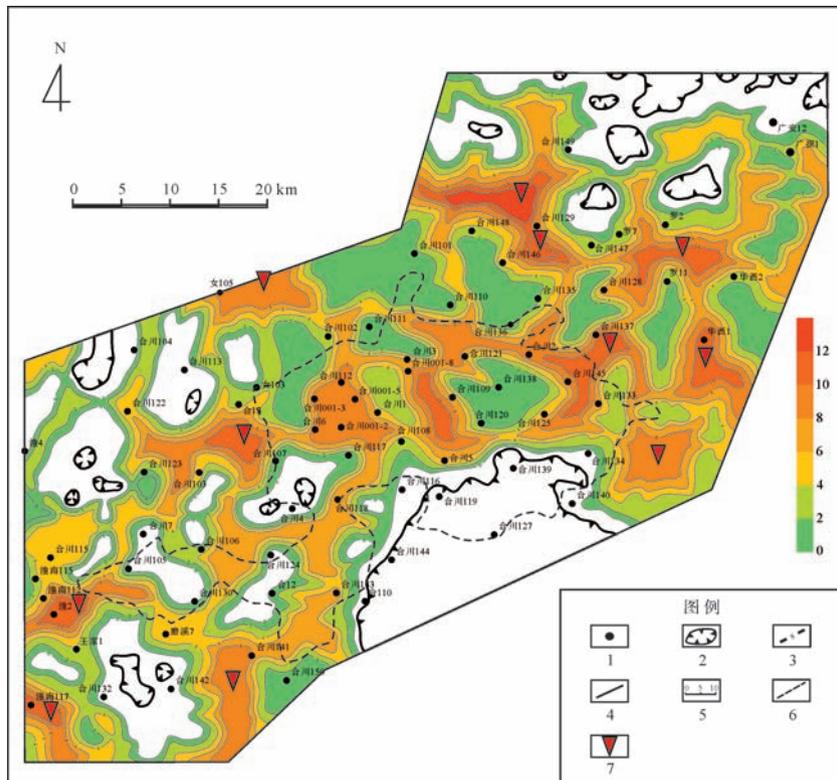


图 17 MSC3 储层厚度等值线图

1.井位;2.尖灭线;3.等值线;4.研究区边界;5.比例尺;6.主体构造区范围;7.储层“甜点”预测区

Fig.17 The isopachous map of MSC3 reservoir

6 结论

以四川盆地中部合川地区须家河组二段为例,探索从基于古地貌控制下的高分辨率层序地层学角度来展开富砂致密砂岩地层层序划分及储层甜点预测研究。

(1) 采用印模法恢复了须家河组沉积前的古地貌,在横切古地貌沟谷方向的连井剖面可观察到古地貌对于砂岩内部具有分异作用,同时在横切沟谷方向地震剖面上可观察到在古地貌相对低洼处地层向两侧高地超覆的现象,由此建立了研究区须二段沉积初期在古地貌基础上的地层充填概念模式。古地貌低部位以发育粗粒砂质沉积物为主,所占厚度及比例较大,高部位细粒砂质及泥质沉积物增多,粗粒砂质沉积物所占厚度及比例较小;同时,古地貌低部位往往较高部位地层厚度大、发育齐全,在古地貌高部位地层较薄,且或多或少具有一定程度的沉积缺失现象。

(2) 在地层充填模式的指导下,采用高分辨率层序地层学方法将合川地区须一段、须二段划分为 2 个长期基准面旋回序 LSC1、LSC2,进一步将 LSC2 自下

至上划分为 6 个中期基准面旋回 MSC1、MSC2、MSC3、MSC4、MSC5、MSC6。

(3) LSC2 上升半旋回由 MSC1、MSC2、MSC3 组成,整体发育退积式辫状河三角洲,向上粒度逐渐变细;在 MSC4 沉积早期,达到了最大湖泛面,下降半旋回由 MSC4、MSC5、MSC6 组成,发育进积式辫状河三角洲,整体粒度向上变粗。MSC6 沉积后,须二段填平补齐过程基本完成。

(4) 在层序格架内,以 MSC3 为例,基于古地貌的控制编制出骨架砂体等厚图,并建立骨架砂体厚度与储层厚度的相关性,实现了储层平面展布预测。储层总体发育于古地貌相对低洼的地区,展布趋势整体呈条带状交织,厚度较大的区域呈斑块、甜点状分布。

参考文献 (References)

1 汪泽成,赵文智,李宗银,等. 基底断裂在四川盆地须家河组天然气成藏中的作用[J]. 石油勘探与开发,2008,35(5):541-547. [Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Li Zongyin, et al. Role of basement faults in gas accumulation of Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 541-547.]

2 郭迎春,庞雄奇,李建华,等. 川西拗陷须家河组须二段隆拗格局变

- 迁及控藏作用[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 29-37. [Guo Yingchun, Pang Xiongqi, Li Jianhua, et al. Evolution of uplift-depression framework in the middle western Sichuan depression and its control on hydrocarbon accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 29-37.]
- 3 赵正望, 李莉, 李楠. 凝缩段识别及对致密砂岩气勘探的启示——以四川盆地须家河组三段和五段为例[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(2): 10-12, 17. [Zhao Zhengwang, Li Li, Li Nan. Identification of condensed section and its implication for exploration of tight sandstone gas: examples from Xujiache 3 and Xujiache 5 Members, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2015, 38(2): 10-12, 17.]
 - 4 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707-714. [Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: An example from gas exploration in the Xujiache Formation of the western Sichuan depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707-714.]
 - 5 盘昌林, 刘树根, 马永生, 等. 川东北须家河组储层特征及主控因素[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 27-34. [Pan Changlin, Liu Shugen, Ma Yongsheng, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Xujiache Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(3): 27-34.]
 - 6 杨威, 谢增业, 金惠, 等. 四川盆地上三叠统须家河组储层评价及天然气成藏机理[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 10-15. [Yang Wei, Xie Zengye, Jin Hui, et al. Reservoir evaluation and pooling mechanism of the Xujiache Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 10-15.]
 - 7 古娜, 田景春, 张翔, 等. 蜀南低陡构造区须家河组储层砂岩致密化成因机制分析[J]. 东北石油大学学报, 2014, 38(5): 7-14, 77. [Gu Na, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Densification mechanism analysis of sandstone densification within Xujiache Formation in low-steep structure in southern Sichuan Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(5): 7-14, 77.]
 - 8 王伟东, 彭军, 段冠一, 等. 致密砂岩气藏储层研究的进展及趋势[J]. 油气地球物理, 2012, 10(4): 33-38. [Wang Weidong, Peng Jun, Duan Guanyi, et al. Development and tendency of the research of tight sandstone gas reservoirs[J]. Petroleum Geophysics, 2012, 10(4): 33-38.]
 - 9 卞从胜, 王红军, 汪泽成, 等. 四川盆地致密砂岩气藏勘探现状与资源潜力评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(7): 74-80. [Bian Congsheng, Wang Hongjun, Wang Zecheng, et al. Exploration status and potential evaluation of tight gas in Sichuan Basin[J]. Engineering Science, 2012, 14(7): 74-80.]
 - 10 金惠, 杨威, 杨跃明, 等. 川西地区须二段高分辨率层序地层研究[J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 48-51. [Jin Hui, Yang Wei, Yang Yueming, et al. High-resolution sequence stratigraphy research on the second member of Xujiache Formation (T3x2) in West Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6): 48-51.]
 - 11 Shanley K W, McCabe P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 544-568.
 - 12 Miall A D. The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 1-582.
 - 13 Posmentier H W, Allen G P. Siliciclastic Sequence Stratigraphy: Concepts and Applications[M]. Tulsa: SEPM, 1999: 1-210.
 - 14 刘招君, 董清水, 王嗣敏, 等. 陆相层序地层学导论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 1-178. [Liu Zhaojun, Dong Qingshui, Wang Simin, et al. Introduction to Continental Sequence Stratigraphy and Application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 1-178.]
 - 15 郭巍, 刘招君, 董惠民, 等. 松辽盆地层序地层特征及油气聚集规律[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(2): 216-221. [Guo Wei, Liu Zhaojun, Dong Huimin, et al. The sequence stratigraphic features and hydrocarbon accumulation of Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(2): 216-221.]
 - 16 王蛟, 姜在兴, 陈世悦. 渤海湾盆地车镇凹陷古近系层序地层与隐蔽油气藏[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 35(2): 163-169. [Wang Jiao, Jiang Zaixing, Chen Shiyue. Sequence stratigraphy and subtle hydrocarbon reservoir of Paleogene in Chezhen sag, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(2): 163-169.]
 - 17 Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. Earth-Science Review, 2009, 92(1/2): 1-33.
 - 18 Catuneanu O. Principles of Sequence Stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1-375.
 - 19 高志勇, 罗平, 郑荣才, 等. 四川磨溪—龙女寺构造香溪群高分辨率层序地层分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2005, 32(6): 597-603. [Gao Zhiyong, Luo Ping, Zheng Rongcai, et al. The high-resolution sequence stratigraphy analysis of the Upper Triassic Xiangxi Formation in the Moxi-Longnusi structure of Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2005, 32(6): 597-603.]
 - 20 高志勇. 河流相沉积中准层序与短期基准面旋回对比研究——以四川中部须家河组为例[J]. 地质学报, 2007, 81(1): 109-118. [Gao Zhiyong. Correlation of parasequence and short-term base level cycles in river facies: A case of the Xujiache Formation in central Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(1): 109-118.]
 - 21 刘殊, 张虹, 曲国胜, 等. 龙门山—米仓山褶皱冲断构造特征研究[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2009: 11. [Liu Shu, Zhang Hong, Qu Guosheng, et al. Study on Structural Characteristics of the Thrust Fold of Longmenshan-Micangshan[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2009: 11.]
 - 22 陈发景, 汪新文, 张光亚, 等. 中国中、新生代前陆盆地的构造特征和地球动力学[J]. 地球科学, 1996, 21(4): 366-372. [Chen Fajing, Wang Xinwen, Zhang Guangya, et al. Tectonic features and geodynamics of Mesozoic and Cenozoic foreland basins in China[J]. Earth Science, 1996, 21(4): 366-372.]
 - 23 戴朝成. 四川类前陆盆地须家河组层序充填样式与油气分布规律

- [J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1817-1828. [Dai Chaocheng. Sequence filling patterns and oil-gas distribution rules of Xujiahe Formation in Sichuan analogous foreland basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(12): 1817-1828.]
- 24 李勇, 曾允孚, 伊海生. 龙门山前陆盆地沉积及构造演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995: 11. [Li Yong, Zeng Yunfu, Yi Haisheng. Sedimentary and Tectonic Evolution of the Longmenshan Foreland Basin, western Sichuan, China[M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1995: 11.]
- 25 郑荣才, 李国晖, 雷光明, 等. 四川盆地须家河组层序分析与地层对比[J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 12-20. [Zheng Rongcai, Li Guohui, Lei Guangming, et al. Sequence analysis and stratigraphic correlation of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(6): 12-20.]
- 26 刘小亮, 王超勇. 川中潼南地区须家河组二段高分辨率层序地层学研究[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(1): 45-50, 125. [Liu Xiaoliang, Wang Chaoyong. High resolution sequence stratigraphy of the second member of Xujiahe Formation in Tongnan area, central Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(1): 45-50, 125.]
- 27 刘建锋, 彭军, 周康, 等. 川中—川南过渡带须家河组二段高分辨率层序地层学研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 199-203. [Liu Jianfeng, Peng Jun, Zhou Kang, et al. High resolution sequence stratigraphy analysis of 2nd member of Xujiahe Formation in middle and south Sichuan transitional zone[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(2): 199-203.]
- 28 Tan Xiucheng, Xia Qingsong, Chen Jingshan, et al. Basin-scale sand deposition in the Upper Triassic Xujiahe Formation of the Sichuan Basin, Southwest China: Sedimentary framework and conceptual model[J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(1): 89-103.
- 29 关振良. 利用压实模拟计算地层古厚度及差异压实量的尝试[J]. 石油实验地质, 1992, 14(2): 152-158. [Guan Zhenliang. An attempt to calculate the primary thickness and the amount of differential compaction in a formation with an application of compaction simulations[J]. Experimental Petroleum Geology, 1992, 14(2): 152-158.]
- 30 郑荣才, 朱如凯, 戴朝成, 等. 川东北类前陆盆地须家河组盆—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.]
- 31 闫小雄, 周立发. 前陆盆地层序地层学研究现状及进展[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(3): 60-64. [Yan Xiaoxiong, Zhou Lifa. Current aspects of sequence stratigraphy of foreland basins[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2001, 21(3): 60-64.]
- 32 刘树根, 童崇光, 罗志立, 等. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化[J]. 天然气工业, 1995, 15(2): 11-15. [Liu Shugen, Tong Chongguang, Luo Zhili, et al. The formation and evolution of Late Triassic foreland basin in west Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(2): 11-15.]
- 33 林畅松, 刘景彦, 胡博. 构造活动盆地沉积层序形成过程模拟——以断陷和前陆盆地为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 868-874. [Lin Changsong, Liu Jingyan, Hu Bo. Computer simulation on the formation of depositional sequences in tectonic active basin: Case study on rift and foreland basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 868-874.]
- 34 徐兆辉, 胡素云, 汪泽成, 等. 古气候恢复及其对沉积的控制作用——以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 235-244. [Xu Zhaohui, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Restoration of paleoclimate and its geological significance: As an example from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 235-244.]
- 35 徐兆辉, 汪泽成, 胡素云, 等. 四川盆地上三叠统须家河组沉积时期古气候[J]. 古地理学报, 2010, 12(4): 415-424. [Xu Zhaohui, Wang Zecheng, Hu Suyun, et al. Paleoclimate during depositional period of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(4): 415-424.]

Using High Resolution Sequence Stratigraphy to Study the Framework of Sand-rich Strata and Predict the Sweet Spots of Reservoir: Taking Xujiahe Formation in Hechuan area, Sichuan Basin as example

ZHONG Yuan^{1,2} LIU Hong^{2,3} TAN XiuCheng^{1,2,3} LIAN ChengBo^{1,2} LIAO JiJia²
LIU MingJie² HU Guang² CAO Jian⁴

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation(Southwest Petroleum University), Chengdu 610500, China;

2. Department of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Branch of Deposition and accumulation, PetroChina Key Laboratory of Carbonate Reservoir
(Southwest Petroleum University), Chengdu 610500, China;

4. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The prediction of the sweet spots of sand-rich tight sandstone reservoir has been both important and difficult in the field. This paper, taking the 2nd member of Xujiahe Formation in Hechuan, Central Sichuan Basin as an example, explores this issue by employing high resolution sequence stratigraphy controlled by successive palaeogeomorphology. Based on the recovery of the karst ancient landform of Leikoupo Formation before the 2nd Member of Xujiahe Formation deposition, it is suggested that the sedimentary filling was controlled by successive karst ancient landform, and the formation filling pattern where the sand bodies in the 2nd Member of Xujiahe Formation overlapped highland on the periphery gradually. With the guidance of this pattern and high-resolution sequence stratigraphy, by identifying sequence boundary and flooding surface types in varying degrees and integrating seismic, logging and core data, the 2nd Member of Xujiahe Formation is divided into 1 long-term base-level cycle which includes 6 mid-term base-level cycles, namely MSC1 to MSC 6. Overall, MSC1 - MSC3 are characterized by the development of retrogradational braided river delta that overlaps southeastwards and is identified as rising semi-cycle; it switches to descending semi-cycle in the maximum flooding surface in MSC4; MSC4 - MSC6 are characterized by the development of progradational braided river delta, with the particle size gradually becoming coarser upwards. Taking MSC3, the most informative cycle, as an example, the correlation between ancient land form, sequence thickness, sand body thickness, sand body physical property and sweet spot distribution is established and the sweet spot distribution areas of favorable reservoirs are predicted. The insights and methods indicated in the paper are of reference value for the study of sand-rich tight sandstone reservoirs, and particularly the study of areas with thinly scattered well network, informative seismic data but limited resolution. Some findings can be directly applied to regional oil & gas exploration and development.

Key words: tight oil and gas; palaeogeomorphology; high resolution sequence stratigraphy; base level cycle; reservoir sweet spot; Xujiahe Formation; Hechuan area; Sichuan Basin