

郑荣才, 李国晖, 常海亮, 等. 四川盆地东部上三叠统须家河组层序-岩相古地理特征[J]. 中国地质, 2015, 42(4): 1024-1036.
Zheng Rongcai, Li Guohui, Chang Hailiang, et al. Sedimentary sequence and paleogeographic characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in eastern Sichuan basin[J]. Geology in China, 2015, 42(4): 1024-1036(in Chinese with English abstract).

四川盆地东部上三叠统须家河组 层序-岩相古地理特征

郑荣才¹ 李国晖² 常海亮¹ 李世临³ 王小娟² 王昌勇¹

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国石油西南油气田分公司
勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 3. 中国石油西南油气田分公司重庆气矿, 重庆 400021)

摘要: 以野外剖面、钻井岩心、测井资料、薄片鉴定和古生物特征分析为基础, 结合区域地质特征和前人研究成果, 对川东垫江地区须家河组沉积-层序特征进行了较为深入的研究和层序界面及洪泛面的识别, 结果表明: 须一段属于有障壁海岸沉积体系, 须二—须六段地层发育湖泊-辫状河三角洲沉积体系; 可将研究区内须家河组划分为于全盆地范围内可追踪对比的、分别相当“须下盆”和“须上盆”的 2 个构造层序及对应于须一至须六段的 6 个长期旋回层序(LSC1~LSC6); 以长期旋回层序界面和洪泛面为等时地层对比标志, 建立了川中隆起—川东南坳陷等时地层格架; 选择各长期旋回层序为等时地层单元编制层序-岩相古地理图, 解析须家河组各时期岩相古地理特征及相带展布规律。研究成果对指导川东地区须家河组油气勘探有重要意义。

关键词: 前陆盆地; 构造格局; 沉积相; 层序地层; 古地理; 上三叠统须家河组; 四川盆地东部
中图分类号: P534.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)04-1024-13

Sedimentary sequence and paleogeographic characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in eastern Sichuan basin

ZHENG Rong-cai¹, LI Guo-hui², CHANG Hai-liang¹,
LI Shi-lin³, WANG Xiao-juan², WANG Chang-yong¹

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Geological Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil and Gas Field Branch Company of CNPC, Chengdu 610051, Sichuan, China; 3. Chongqing Gas District of Southwest Oil and Gas Company of CNPC, Chongqing 400021, China)

Abstract: Based on the data of field sections, thin sections and well logging, combined with the characteristics of petrology, palaeontology and previous research results, the authors hold that the 1st member of Xujiahe Formation in Dianjiang area of eastern Sichuan basin was developed in the barrier coast sedimentary system, and the 2nd to 6th members of Xujiahe formation were

收稿日期: 2014-07-22; 改回日期: 2015-05-12

基金项目: 国家科技重大专项“四川盆地岩性油气藏富集规律与目标评价”(2011ZX05001-005)资助。

作者简介: 郑荣才, 男, 1950年生, 教授, 博士生导师, 沉积学和石油地质学专业; E-mail: zhengrc@cduet.edu.cn。

developed in the lacustrine-braided river delta sedimentary system. Based on the recognition of sequence boundaries and flooding surface, the authors divided the Xujiahe Formation into 3 tectonic sequence cycles (Sup-LSC1—Sup-LSC3), which represent the “remnant bay basin”, “lower Xujiahe basin” and “upper Xujiahe basin” formation periods respectively and can be traced through the whole basin. 6 long-term sequence cycles (LSC1—LSC6) which correspond to the 1st to the 6th members of the Xujiahe Formation respectively were also established. At the same time, using the sequence boundaries of long-term cycle and flooding surface as the marks of isochronous stratigraphic correlation, the authors established the isochronous stratigraphic framework from central Sichuan uplift to southeast Sichuan depression zone. On such a basis, the authors chose each long-term sequence cycle as an isochronous stratigraphic unit, and drew the maps of sequence-based lithofacies and paleogeography of the Xujiahe Formation in the study area. The maps indicate the paleogeography and distribution characteristics of sedimentary facies.

Key words: foreland basin; tectonic framework; sedimentary facies; sequence stratigraphy; paleogeography; Upper Triassic Xujiahe Formation; eastern Sichuan basin

About the first author: ZHENG Rong-cai, male, born in 1950, professor, supervisor of doctor candidates, engages in the study and teaching of sedimentology and petroleum geology; E-mail: zhengrc@cdut.edu.cn.

四川盆地于晚三叠世早期结束周缘前陆盆地海相沉积演化史,于中、晚期进入极其重要的类前陆盆地陆相沉积演化阶段^[1-7],先后发生了晚三叠世须家河期含煤碎屑岩和侏罗纪至早白垩世红层碎屑岩的沉积充填作用。就晚三叠世须家河期的构造-沉积演化特征而言,可将该盆地划分为川西坳陷、川东北坳陷、川东南坳陷及川中隆起4个次级构造单元^[4-7],具备非常特殊的“三坳围一隆”构造-沉积格局(图1-A)。近年来,随着须家河组油气地质和天然气勘探开发工程的深入开展,于川西坳陷、川中隆起等次级构造单元不断发现新气藏而取得重大进展^[8-10],然而包括川东和川东南地区在内的川东南坳陷须家河组的含油气性一直未被重视,随着该构造单元油气勘探程度的不断深入,特别是近期在川东卧龙河等地有多口井在须家河组钻获天然气流,说明川东地区须家河组同样具备一定的油气勘探潜力。鉴于川东南坳陷构造须家河组油气地质基础研究非常薄弱的现状,选择地层保存较为齐全的垫江地区为代表对川东地区须家河组沉积-层序特征进行深入研究,不仅可配合国家重大专项油气地质调查需要和对川东地区须家河组油气勘探提供依据,同时对厘定类前陆盆地须家河期东部的原型盆地边界也具有重要的意义。

1 地质背景

垫江地区大地构造位置隶属川东梳状褶皱带中的川东高陡构造带,为一以高陡背斜为主体的、主干背斜带与大断裂相伴生的北北东-北东向隔挡

式平行褶皱区,自东向西依次发育有方斗山、明月峡、铜锣峡、华蓥山等高陡背斜构造,以及相间发育的大池干、箐口场、黄泥堂、卧龙河、福成寨等低缓背斜构造带(图1-B)。各背斜构造的核部和两翼出露的地层由老到新依次为下三叠统嘉陵江组和中三叠统雷口坡组的碳酸盐岩地层,上三叠统须家河组碎屑岩煤系地层及侏罗系红层。

垫江地区须家河组厚400~500 m,与下伏中三叠统雷口坡组为角度不整合接触,与上覆下侏罗统自流井组为平行不整合接触关系。有关川东地区上三叠统陆相碎屑岩地层的划分、命名和区域对比等问题历来争议很大,有多种命名和划分方案,主要有如下几点意见:①大部分研究者将其命名为须家河组^[6-11];②部分研究者命名为香溪群,但对二者之间的对比关系则没有统一的标准,或认为须一至须六段与香一至香六段依次相当^[12],时代定为晚三叠世诺利-瑞替期,或将其下部划分为须一至须三段,上部划归为香溪群^[13];③也有研究者认为川东地区缺失须一和须二段,以须三段直接超覆在雷口坡组之上为主要特征;④更有甚者提出川东地区缺失须一至须五段,以相当须六段下部的香五段直接超覆在雷口坡组之上^[14],其上由香六段至香八段组成的香溪群相当须六段上部的混乱概念^[15];⑤笔者以在该地区10余条实测地表剖面 and 钻井剖面的沉积-层序分析结果为依据,以张健等提出的须家河组地层划分方案^[12]为基础,提出经层序地层学方法优化的地层综合划分和区域对比方案,同意张健等废除香溪群的意见,将川东地区须家河组划分为可与川

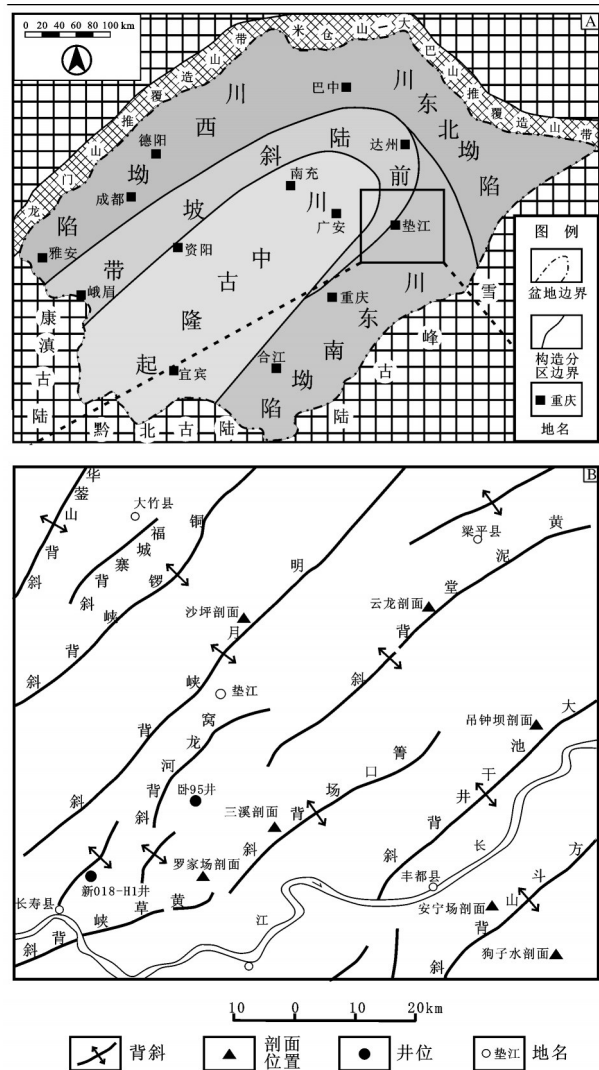


图1 四川前陆盆地构造单元划分(A)与垫江地区区域构造和剖面位置(B)略图

Fig.1 The division of tectonic units of Sichuan Foreland Basin (A) and regional structure framework and profile location of Dian-Jiang area (B)

中、川西、川北及川东北等地区大致对比的须一至须六段6个岩性段(图2), 并认为消除四川盆地范围内须家河组与香溪群混乱对比关系的最好、最简单和最有效的对策是废除香溪群这一岩石地层单位, 统一使用须家河组^[12, 16]。各岩性段特征如下: 须一段为暗色泥岩与泥质粉砂岩薄互层, 在泥岩中首次发现产有舌形贝(*Lingula sp.*)化石(图3-A), 为海-陆过渡相沉积环境的主要标志; 须二段和须四段主要为砂岩, 其中须二段主要为中-细粒砂岩夹少量薄层泥、粉砂岩组合, 须四段砂岩的粒度相对更粗

一些, 主要为中-粗粒砂岩夹少量薄层泥、粉砂岩和炭质泥岩组合, 并以其底部沿大型冲刷面分布有硅质大砾石(图3-B)为显著特征; 须三段和须五段主要为中-细粒砂岩与薄层粉砂岩、暗色泥岩不等厚互层, 夹炭质泥岩和薄煤层、煤线, 产有丰富的 *Dictyophyllum nathorsti*-*Clathropteris meniscioides* 植物化石(图3-C), 为典型含煤细碎屑岩沉积建造和川东地区重要的产煤层位之一; 须六段下部以中粒砂岩为主, 向上变细为中-细粒砂岩, 上部以粉砂岩与暗色泥岩不等厚互层为主, 但大部分地区被强烈剥蚀而保存不完整。

2 沉积相特征

2.1 沉积相标志

2.1.1 岩石学特征

据数百件薄片鉴定资料, 采用砂岩成分-成因分类方案(图4), 垫江地区须家河组以长石岩屑砂岩为主, 少量为岩屑长石砂岩和岩屑砂岩, 局部含少量硅质砾石。砂岩骨架颗粒组分中的石英含量普遍较低, 为55%~75%, 平均64.10%, 以单晶石英为主, 少量多晶石英; 长石含量为10%~20%, 平均13.86%, 以钾长石为主, 少量花岗岩屑也归入长石端元; 岩屑含量普遍较高, 为15%~33%, 平均22.03%, 以泥板岩、千枚岩和少量片岩等硅质岩屑为主, 不含碳酸盐岩屑。在结构特征上, 以中-粗粒为主, 中-细粒次之, 碎屑多呈次棱角状-次圆状, 分选中等-较好, 以点-线接触为主, 部分呈凹凸接触和缝合线接触(图5-A)。杂基含量普遍较低, 一般为2%~4%。常见的胶结物和胶结方式主要为石英次生加大和绿泥石环边的孔隙式胶结(图5-A、B), 次为钙质、褐铁矿胶结和黏土杂基胶结。从总体上看, 垫江地区须家河组砂岩具有富长石和岩屑, 贫石英的低成分成熟度特征, 以花岗岩-浅变质岩杂岩体为母岩区。而结构成熟度中等偏高, 反映快速堆积、环境能量较高, 物质供给稳定充沛的近物源三角洲沉积特征。砂岩孔隙较发育, 以剩余原生粒间孔为主, 保存良好, 次为粒间溶孔、铸模孔和溶裂缝(图5-C), 具备良好储集性和形成油气藏的潜力。

2.1.2 沉积构造标志

垫江地区须家河组沉积构造非常发育, 常见反映中等-较高水动力环境条件的各种原生沉积构

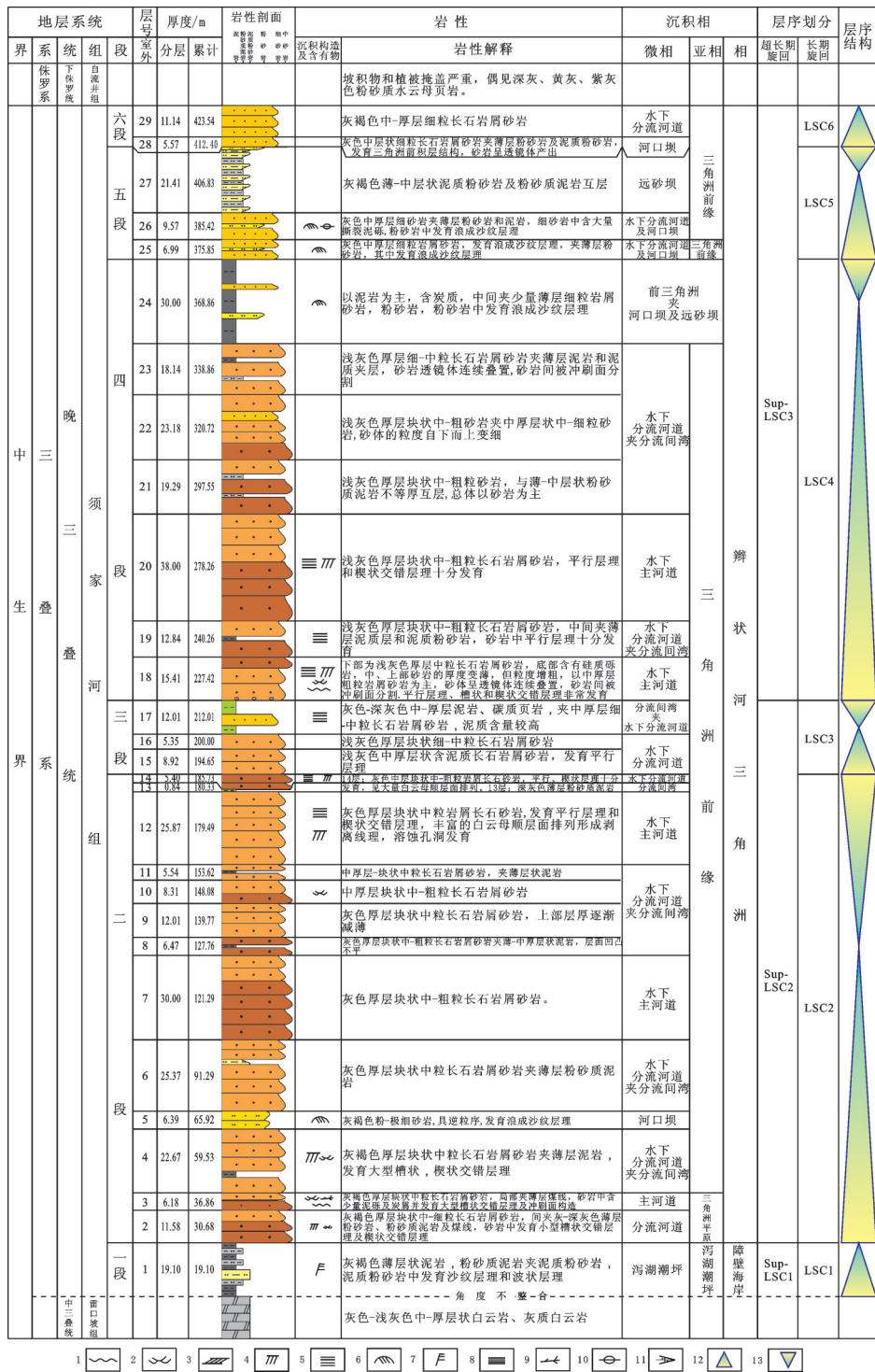


图2 垫江地区须家河组沉积相及层序地层柱状图(三溪剖面)

1—冲刷面; 2—槽状交错层理; 3—板状交错层理; 4—楔状交错层理; 5—平行层理; 6—浪成沙纹层理; 7—沙纹层理; 8—水平层理; 9—炭屑; 10—撕裂泥砾; 11—粉砂质条带; 12—湖侵相域; 13—湖退相域

Fig.2 The sedimentary facies and sequence stratigraphy of Xujiache Formation of Dian-Jiang area (from Sanxi profile section)

1—Surface of scour; 2—Trough cross bedding; 3—Tabular cross-bedding; 4—Wedge cross bedding; 5—Parallel bedding; 6—Wave ripple bedding; 7—Ripple bedding; 8—Horizontal bedding; 9—Charcoal; 10—Tearred boulder clay; 11—Silty band; 12—Transgressive phases; 13—Regressive phases



图3 垫江地区须家河组地层划分的部分标志

Fig.3 Some marks for division of Xujiache Formation in Dianjiang area

A—产于暗色泥岩中的舌形贝化石,化石轴长0.8 cm,沙坪剖面, T_{3x}¹; B—沿 T_{3x}¹底部大砂体底冲刷面分布的大砾石(地层直立),砾石直径达20 cm,磨圆好,成分为浅变质的石英岩,底冲刷面有较大起伏幅度,之下为粉砂质炭质泥岩,沙坪剖面; C—深灰色炭质泥岩中密集的炭化芦木及蕨类化石,新018-H1井, T_{3x}²

A—Lingula sp. produced in dark mudstone, its axial length is 0.8 cm, from Shaping profile, T_{3x}¹; B—Large gravels distributed along the erosion surface at the bottom of the sand body of the lower segment of T_{3x}¹ (the formation is upright), their diameter reaches 20 cm with high psephicity. The composition of gravels is mainly low metamorphic quartzite. The erosion surface has a fluctuant range, with silty carbon mudstone under it, from Shaping profile; C—Carbonized calamites and ferns fossils in centralized distribution in the dark gray carbon mudstone, from Xin 018-H1 well, T_{3x}²

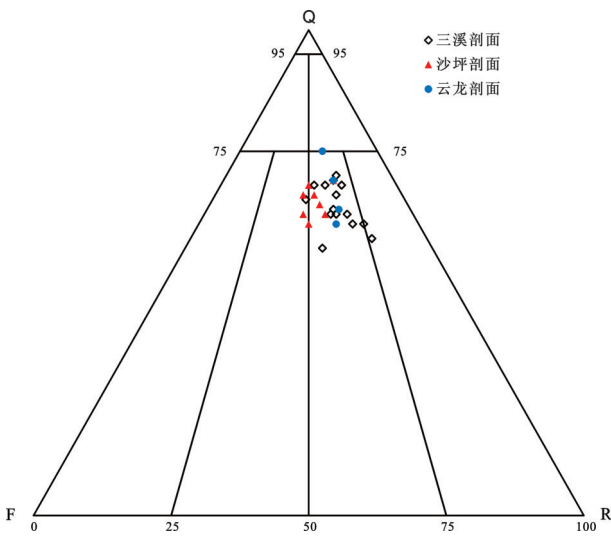


图4 垫江地区须家河组砂岩分类图

Q—石英端元; F—长石端元; R—岩屑端元

Fig.4 Plot of Q, F, R for Xujiache Formation samples in Dianjiang area

Q—Quartz group; F—Feldspar group; R—Debris group

造,如底冲刷构造(图6-A、B),大型槽状(图6-C)、板状(图6-D)和楔状交错层理(图6-E)、平行层理(图6-E)等,反映较弱水动力环境下快速堆积形成的上攀沙纹层理(图6-F)、浅湖环境波浪形成的浪成沙纹层理(图6-G)也很发育,暗色泥岩中广泛发育水平层理,局部出现潮汐形成的条带状、透镜体层理(图6-H),以及反映有较大堆积地形坡度的同沉积期液化滑塌变形构造和包卷层理(图6-I)等。

其中具有河道沉积特征的砂体往往呈被底冲刷面分割的、多个砂体连续叠置的巨厚层状(图6-A~E),反映河道侧向迁移频繁,垂向继承性发展演化的特点,非常有利于储层发育^[17-20]。

2.1.3 古生物标志

区内可作为沉积环境识别的古生物标志主要为植物茎干和叶片化石(图3-C),广泛发育于暗色泥岩中,指示陆相沉积环境。在须一段暗色泥岩中局部产有单瓣外形沿中轴呈上宽下窄的对称舌形,两瓣大小不一的舌形贝化石(图3-A),该化石的发现证明须一段沉积时为半咸水的有障蔽海岸环境。

2.2 沉积相划分方案

根据岩石学、沉积构造、古生物及剖面结构等特征,结合区域地质背景和已有的沉积相和古地理研究成果^[20-23],提出垫江地区须家河组沉积相划分方案(表1),其中须一段为有障壁海岸沉积体系,而须二段—须六段为辫状河三角洲沉积体系,两沉积体系的亚相和微相划分详见表1。

2.3 沉积相特征

垫江地区须家河组发育有海相和陆相2种沉积环境截然不同的沉积体系,其中须一段为海相的有障壁海岸沉积体系,而须二段—须六段为湖泊辫状河三角洲沉积体系。

2.3.1 有障壁海岸沉积体系

须一段在沙坪剖面出露较好,属于有障壁海岸沉积体系,可被划分为泻湖和潮坪2个亚相:泻湖亚

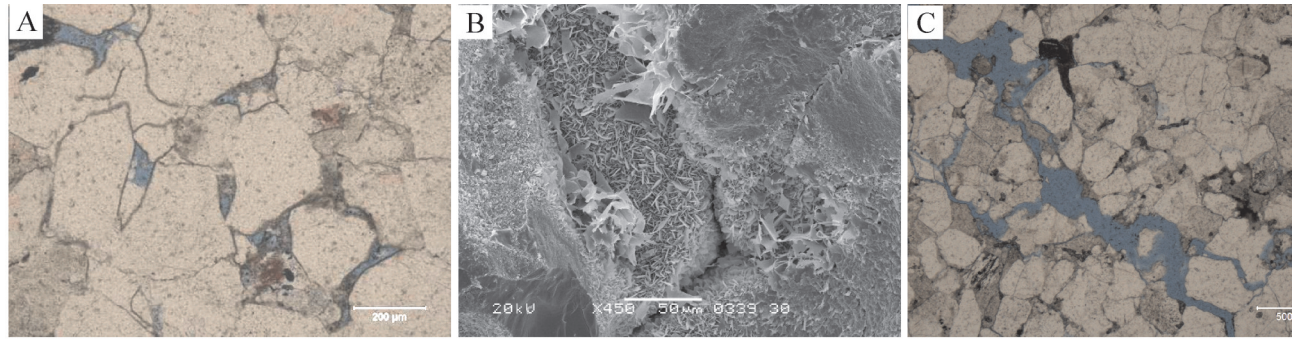


图5 垫江地区须家河组砂岩结构特征和孔隙类型

A—中-粗粒长石岩屑砂岩,碎屑多呈次棱角状-次圆状,分选中等-较好,点-线接触为主,具先发育绿泥石环边,后发育石英次生加大胶结结构,剩余原生粒间孔保存较好,铸体薄片,单偏光,新018-H1井, T_{3x}^4 ; B—叶片状绿泥石呈薄膜状附于颗粒表面形成环边胶结结构,剩余原生粒间孔中充填少量片丝状伊利石, SEM, 新018-H1井, T_{3x}^2 ; C—细-中粒长石岩屑砂岩,发育溶裂缝和粒间溶孔,铸体薄片,单偏光,新018-H1井, T_{3x}^4

Fig.5 The rock texture and pore types of sandstone of Xujiache Formation in Dianjiang area

A—Medium to coarse feldspar lithic sandstone, sorting with angular-subangular, moderate to good sorting, spot-line contact primarily. Chlorite rims formed first, followed by quartz overgrowth cementation texture. Remanent intergranular pores preserved well. Casting thin sections, plainlight, from Xin 018-H1 well, T_{3x}^4 ; B—Lamellar chlorite exhibits film attached to the surface of grain and forms rims cement structure. Little filamentous illite filled in the primary remanent intergranular pores. SEM, from Xin 018-H1 well, T_{3x}^2 ; C—Fine to medium grained feldspar lithic sandstone with dissolved fracture and interparticle dissolution pores. Casting thin sections, plainlight, from Xin 018-H1 well, T_{3x}^4

相由较连续薄层暗色泥岩、粉砂质泥岩组成,暗色泥岩中产舌形贝化石;潮坪亚相为泥质粉砂质、粉砂岩薄互层为主,局部夹薄层粉-细粒砂岩,发育沙纹层理和波状、条带状层理,可细分出泥坪、砂泥混合坪、砂坪和潮道等微相类型。

2.3.2 辫状河三角洲沉积体系

须家河组沉积期垫江地区距离母岩区较近,物源供给充足,具有较大的地形坡降而有利于辫状河三角洲沉积体系的发育,可识别出三角洲平原、前缘、前三角洲3个亚相及众多微相类型。

(1)三角洲平原亚相,主要发育主河道(心滩)、分流河道、分流间洼地(或沼泽)、决口扇4种沉积微相,各沉积微相具有如下特征:①主河道(心滩)微相,主要为大套相互切割的中-粗粒岩屑砂岩透镜体连续叠置组成,砂体内部发育大型槽状和楔形交错层理,几乎不含泥、粉砂岩夹层,下部常含冲刷成因的撕裂状泥砾或硅质小砾石,而底部具冲刷构造,反映砂体形成于水动力条件很强的水道环境中。②分流河道微相,主要为大套灰褐色中-粗粒岩屑砂岩和中-细粒长石岩屑砂岩透镜体连续叠置组成,砂体内大型槽状、楔状交错层理,平行层理和底冲刷构造极为发育,反映砂体形成于较强的水道动力环境中。垂向上砂体呈相互切割的连续叠置状,单砂体之间常夹有富含植物碎片的薄层粉砂质、炭质

泥岩及煤线,反映河道废弃、沼泽化、复活和侧向迁移频繁的交替演化特点。③分流间洼地(或沼泽)及决口扇微相,分流间洼地沉积以深灰色泥岩、炭质泥岩、粉砂质泥岩为主,水平层理和虫孔较为发育,含大量植物茎干、叶片及根迹化石。决口扇沉积以灰色粉-细砂岩为主,含少量深灰色泥岩及粉砂质泥岩,常发育滑塌变形构造或包卷层理。决口扇厚度一般不大,常以夹层形式出现在分流间洼地之中。

(2)三角洲前缘亚相,包括水下主河道、水下分流河道、分流间湾、河口坝及远砂坝5种微相类型,各沉积微相具有不同的岩石组合类型及沉积构造特征。①水下主河道和下水分流河道是辫状河三角洲前缘沉积的主体,前者粒度较粗,主要为大套连续叠置和被底冲刷构造相互切割的中-粗粒砂岩,连续叠置的砂体厚度可达30 m以上,砂体内部几乎不含明显的泥、粉砂岩夹层,砂体内部常发育大型槽状交错层理及楔状交错层理;后者较细,主要为灰色中-粗砂岩和中-细砂岩,垂向上多期河道砂体连续叠置的厚度可达10 m以上,反映较强水动力条件的沉积构造也很发育,如底冲刷构造、槽状、板状和楔状交错层理、平行层理,局部含炭化植物枝干化石。②分流间湾微相,主要为深灰色泥岩及粉砂质泥岩,偶夹少量洪泛期漫溢水下分流河道的粉砂岩及细砂夹层。由于水体相对安静,分流间

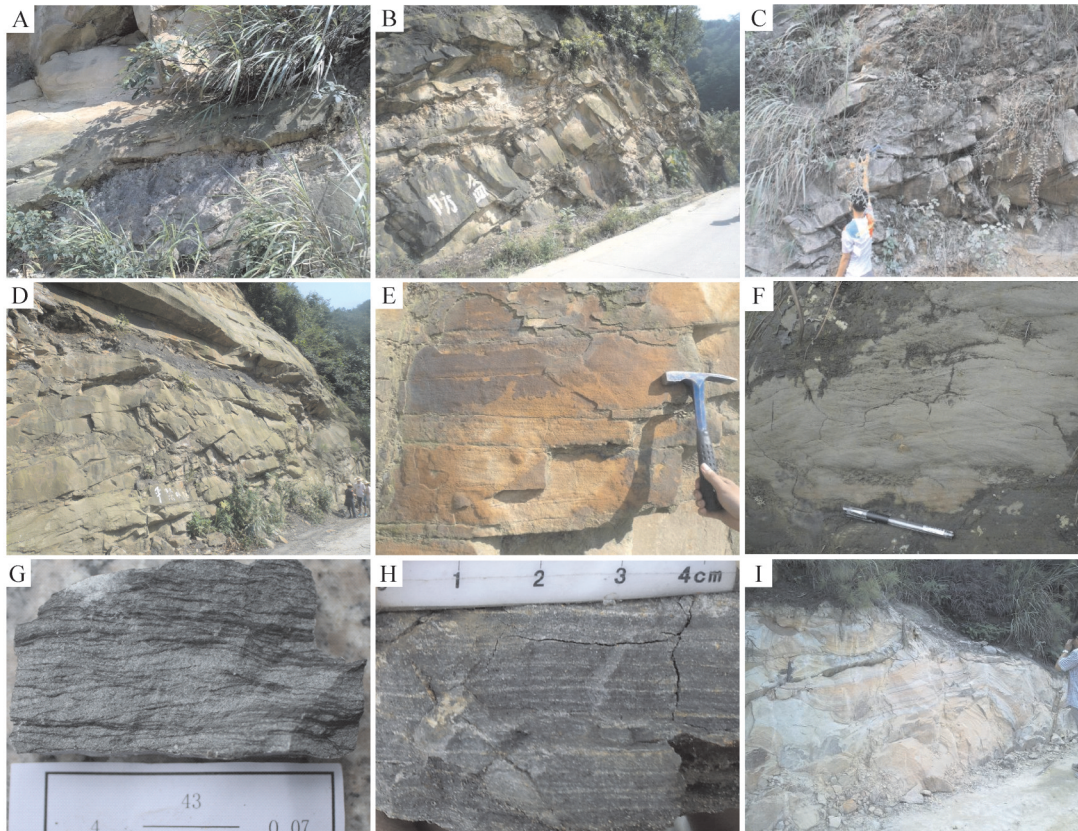


图6 垫江地区须家河组典型沉积构造照片

A—大型底冲刷面, 其上为 T_{3x}^2 底部的分流河道大砂体, 岩性为中-粗粒岩屑砂岩, 其下为 T_{3x}^1 顶部的灰黑色炭质泥岩, 云龙剖面; B—被底冲刷面相互切割透镜状砂体, 砂体内发育大型槽状交错层理, 水下分流河道, 三溪剖面, T_{3x}^2 ; C—灰色中粒岩屑砂岩, 发育大型槽状交错层理, 分流河道, 罗家场剖面, T_{3x}^4 ; D—灰色粗粒岩屑砂岩, 发育大型板状交错层理, 具明显的前积层结构, 水下分流河道, 云龙剖面, T_{3x}^2 ; E—灰色中-粗粒长石岩屑砂岩, 下部发育低角度楔状交错层理, 上部具平行层理, 水下分流河道, 云龙剖面, T_{3x}^4 ; F—灰色粉砂岩, 发育爬升沙纹层理, 河口坝, 义和剖面, T_{3x}^2 ; G—深灰色粉-细粒砂岩, 顺纹层富含碳屑, 发育浪成交错层理, 有湖浪改造作用的浅湖砂坝, 新018-H1井, T_{3x}^5 ; H—黑灰色碳质泥岩, 泥岩中夹薄层粉砂岩构成的韵律性条带状、透镜体层理, 局限海湾潮坪, 罗家场剖面, T_{3x}^1 ; I—灰色粉-细粒砂岩, 发育包卷层理, 河口坝, 沙坪剖面, T_{3x}^3

Fig. 6 The typical sedimentary structure of Xujiahe Formation in Dianjiang area

A—Large surface of scour on which there is distributary channel sand body of the lower part of T_{3x}^2 . The lithology of sandbody is medium to coarse lithic sandstone. Grayish black carbon mudstone at the top of T_{3x}^1 distributed under the sand body. from Yunlong profile; B—Lenticular sand bodies formed by mutually cut scour surface, in which trough cross bedding is developed. Underwater distributary channel, from Sanxi profile, T_{3x}^2 ; C—Gray medium lithic sandstone with large trough cross bedding developed. Distributary channel, from Luojiachang profile section, T_{3x}^4 ; D—Gray coarse lithic sandstone with large tabular cross-bedding and foreset developed. Underwater distributary channel, from Yunlong profile, T_{3x}^2 ; E—Gray medium to coarse feldspar lithic sandstone with low angle wedge cross bedding in the lower part and parallel bedding in the upper part. Underwater distributary channel, from Yunlong profile, T_{3x}^4 ; F—Gray siltstone with climbing-ripple cross-lamination developed. Mouth bar, from Yihe profile, T_{3x}^2 ; G—Charcoal gray silt-fine sandstone, with breeze distributed along the lamina, as well as with wave-cross bedding and shallow lake sandbar transformed by lake wave developed. Mouth bar, from Yihe profile. T_{3x}^5 ; H—Black carbonaceous mudstone with rhythmicity band and lenticular bedding composed of thin siltstone developed. Restricted gulf tidal flat, from Luojiachang profile. T_{3x}^1 ; I—Gray silt-fine sandstone with convolute Bedding developed. Mouth bar, from Shaping profile; T_{3x}^3

湾沉积中常发育水平层理, 局部发育泄水构造、生物扰动构造及少量虫孔, 层面上可见少量炭化植物碎片。分流间湾连续沉积厚度一般 $<2\text{ m}$, 常在水下分流河道沉积间呈夹层出现, 或与水下分流河道沉积呈中-厚层的互层出现。③河口坝及远砂坝微

相, 是判断三角洲沉积环境的重要相标志, 两者为连续沉积的砂体, 前者主要为灰色粉-细砂岩, 呈透镜体产出, 周围为前三三角洲泥的沉积, 发育大量浪成交错层理及同生变形构造, 具逆粒序结构; 后者主要由深灰色泥质粉砂岩与粉砂质泥岩组成, 被湖

表1 垫江地区须家河组沉积相划分方案
Table 1 The division of sedimentary facies of Xujiache Formation in Dianjiang area

段	相	亚相	微相
须二	辫	三角洲	主河道(心滩)、分
段一	状河	平原	流河道、分流间洼地(或
须六	三		沼泽)、决口扇
段	角洲	三角洲	水下主河道、水下
		前缘	分流河道、分流间湾、
			河口坝、远砂坝
		前三角	前三角洲泥
		洲	
须一	有障壁海岸		潟湖、潮坪
段			

浪改造后可形成与三角洲朵体分离的浅湖砂坝,常发育有浪成沙纹层理。

(3)前三角洲亚相,位于三角洲前缘的前方,是湖泊三角洲沉积环境水最深的地方,水体安静,沉积物颗粒较细,以深灰色泥岩和粉砂质泥岩为主,含炭质,发育水平层理,可见少量生物钻孔。

3 层序地层学特征

3.1 界面特征与层序划分

综合沉积层序、岩石类型及组合、沉积厚度变化等特征,前人将四川盆地须家河组划分为绵阳—成都分区、广元—宣汉分区、万县—綦江分区、合川—威远分区^[7,16],这4个地层分区分别与盆地内三拗围—隆构造格局中的川西拗陷、川东北拗陷、川东南拗陷及川中隆起4个次级构造单元的性质及构造—沉积演化有着密切的对应关系^[16]。各构造单元沉积—层序的发育特征各具特色^[21],其中川东南拗陷与川中前陆隆起东侧地层的发育状况很相似,基于此,选取川中隆起带东侧的合川炭坝剖面及研究区内的地表、钻井和测井剖面等资料,以层序界面与洪泛面的识别和等时追踪对比为依据,对须家河组进行高分辨率层序划分、区域对比和建立川中隆起带—川东南拗陷带等时地层格架(图7)。

3.1.1 层序界面与洪泛面

层序界面与洪泛面的识别是层序界面划分的基础,须家河组在川中隆起带—川东南拗陷范围内可识别出3个相当于超长期旋回层序界面的构造不整合界面,自下而上依次为:①须一段与雷口坡组之间的不整合面;②须三段与须四段之间的“安县运动”构造不整合界面^[24-26],以须四段底部发育的大型冲刷面(长寿罗家场剖面为低角度构造不整合)和

含有变质石英岩大砾石(图3-B)为标志;③须六段与自流井组之间的平行不整合界面、即侏罗系与三叠系的分界面。此外,广泛发育于须一至须六段底部和内部的大型冲刷面与岩相转换面,往往为相当三级层序级别的长期旋回层序界面^[26]。

陆相层序分析中最大洪泛面的识别是划分层序和进行区域等时对比的关键^[27],须家河组于各超长期和长期旋回都发育有最大洪泛面,露头剖面中最大洪泛面通常表现为向上加深变细的沉积序列顶部的泥岩段(图2)。测井剖面中则表现为测井曲线单向或脉动性移动达极限低幅值位置后折向增高的转换点位置,对应于高伽玛、低电阻的电性特征。如须二段中上部“腰带子”暗色泥岩段,须三段中上部炭质页岩和煤层,须四段、须五段和须六段中、上部含煤线的黑色页岩均可代表最大洪泛面发育位置,也是进行区域等时对比的重要标志。

以上述3个具有构造不整合性质的界面为界,可将须家河组划分为分别相当须一段的“残余海相盆地”,须二段+须三段的“须下盆”和须四段至须六段的“须上盆”3个构造层序(Sup-LSC1~Sup-LSC3),又以区域性湖侵作用于各岩性段之间形成的大型底冲刷面及岩相突变面为界,以最大洪泛面作为等时对比标志,又可将须家河组划分为与全盆地范围内可追踪对比的6个长期旋回层序^[8](LSC1-LSC6),各层序分别对应于须一段至须六段6个岩性段(图2,表2)。

3.1.2 层序地层格架

以单剖面沉积相分析及层序划分为基础,运用基准面上升和下降二分时间单元分界线、即层序界面和洪泛面为优选的等时地层对比位置,以长期旋回层序为对比骨架,进行等时地层对比和建立等时地层格架(图7)。各剖面6个岩性段的地层虽然均有保存,但厚度存在很大差异,如:炭坝剖面和沙坪剖面须一段厚度明显大于卧龙河构造及三溪剖面;三溪剖面须二段最厚,卧龙河构造次之,炭坝剖面和沙坪剖面相近;4个剖面的须三段厚度相近;须四段厚度呈自炭坝、沙坪和三溪等剖面向卧龙河构造方向减薄变化趋势,其中沙坪剖面须四段最厚;须五段厚度呈自炭坝剖面向卧龙河构造减薄,并且自卧龙河构造又分别向沙坪和三溪方向进一步逐渐减薄的趋势;须六段呈自炭坝剖面向卧龙河构造加

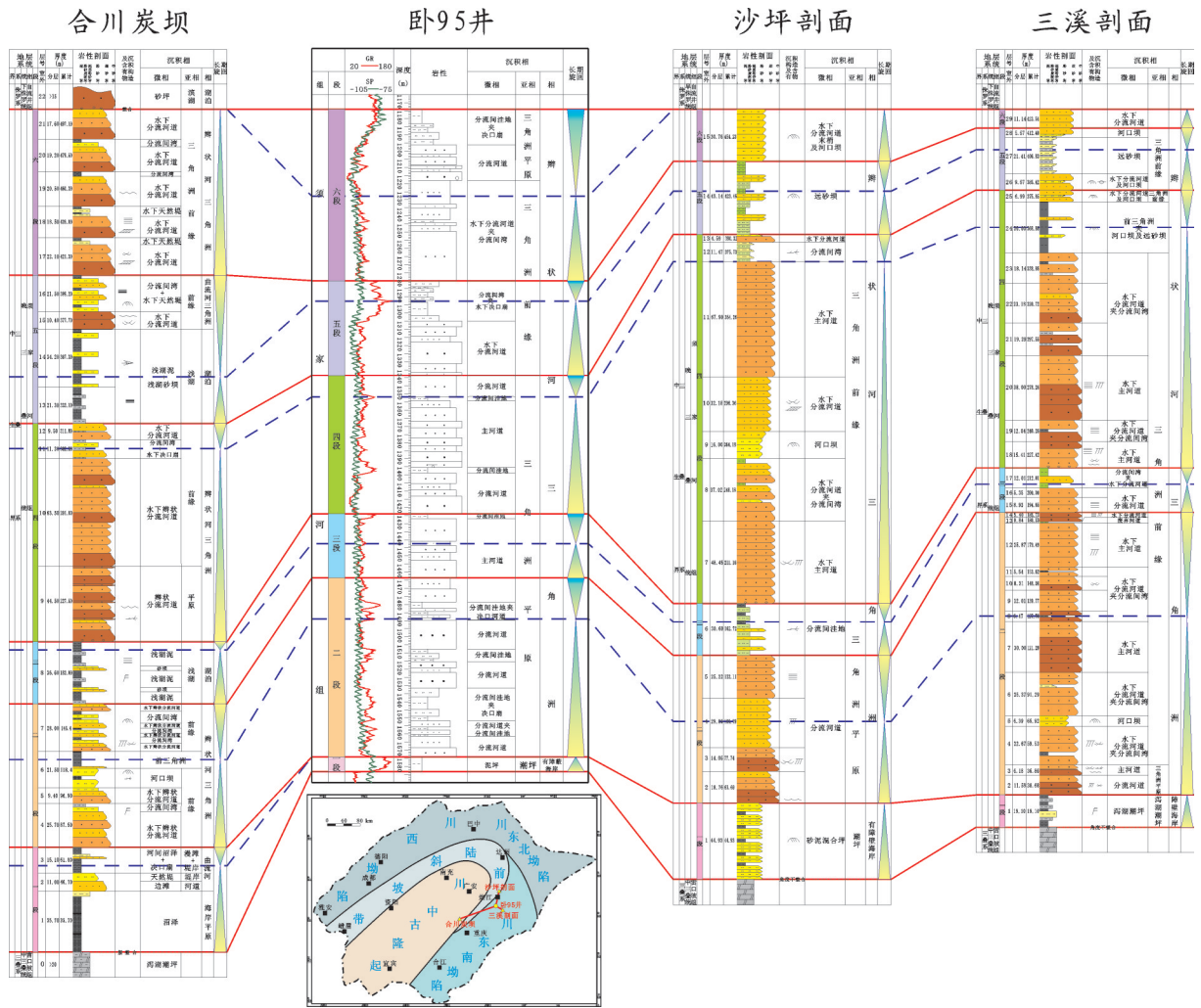


图7 四川盆地东部须家河组区域地层对比和等时地层格架

Fig.7 The regional isochronic correlation and formation framework of Xujiahe Formation of Eastern Sichuan basin

表2 垫江地区须家河组高分辨率层序划分

Table 2 The division of high-resolution sequence of Xujiahe Formation in Dianjiang area

地层系统	组 段	构造活动状况	基准面旋回	
			超长期	长期
须家河组	六段	加速拗陷沉降 (须上盆)	Sup-LSC2	LSC6
	五段		LSC5	
	四段	LSC4		
	三段	稳定拗陷沉降 (须下盆)	Sup-LSC2	LSC3
	二段		LSC2	
	一段		Sup-LSC1	LSC1
(残余海相盆地)				

厚,而自卧龙河构造分别向沙坪和三溪剖面方向迅速减薄的特征。

3.2 各沉积层序-岩相古地理特征

在建立等时地层格架的基础上,选择各长期旋回层序为等时地层单元,采用以高分辨率层序分析为核心的编图技术,编制研究区层序-岩相古地理图(图8),须家河组各时期古地理特征如下:

3.2.1 LSC1层序(须一段)

在该层序沉积期,包括垫江地区在内的川东地区为一个沿川中古隆起(或前陆隆起)北段,自川西海湾向川北延伸后,折向川东继续延伸但逐渐消失的残余海湾盆地。在四川周缘前陆盆地的构造-沉积演化史中^[4],川东地区该层序延续的时间仅相当于川西地区由马鞍塘组和小塘子组组成的Sup-LSC1构造层序的海泛期沉积,范围相对施振生

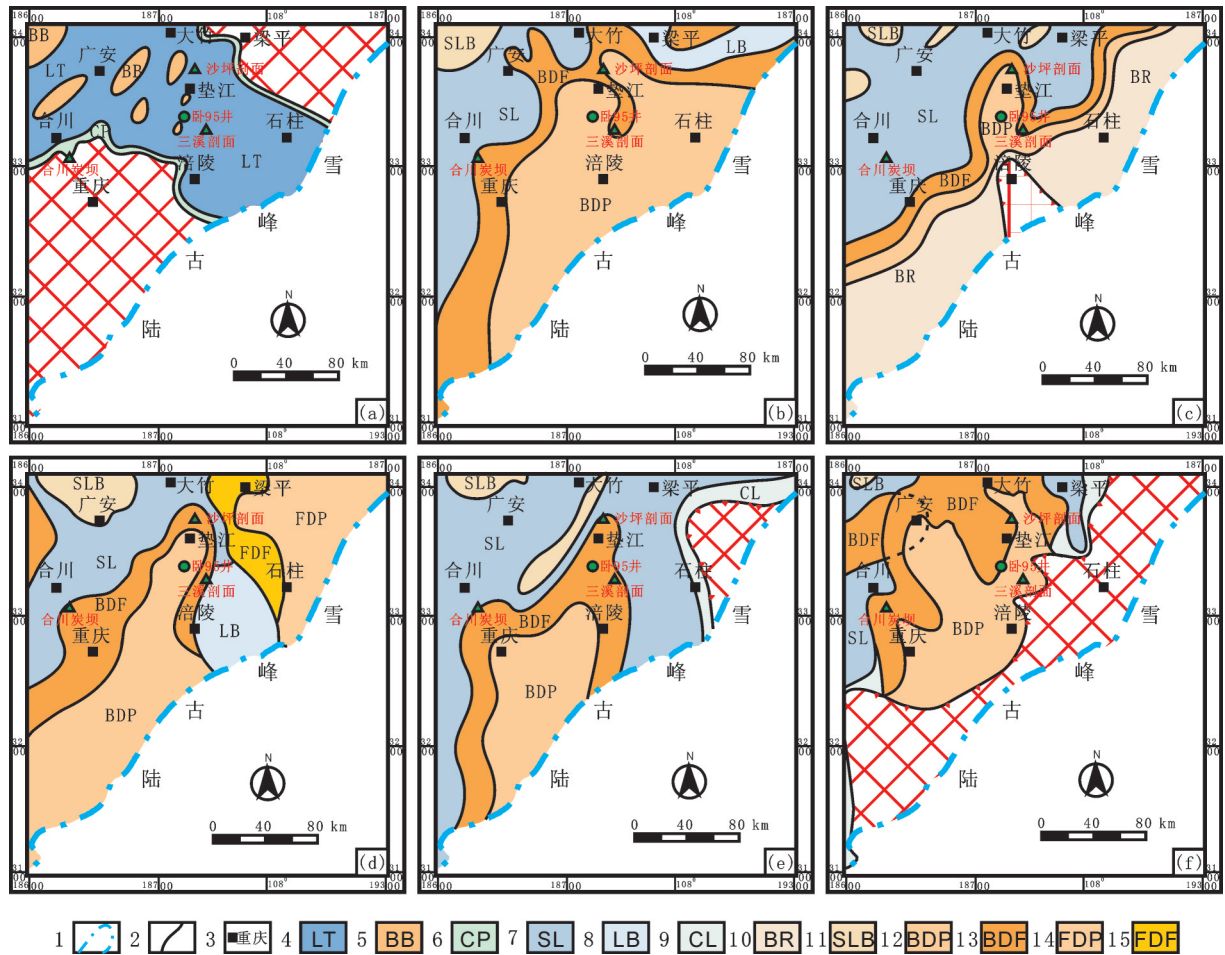


图8 垫江地区须家河组各层序岩相古地理略图

a—LSC1层序(须一段); b—LSC2层序(须二段); c—LSC3层序(须三段); d—LSC4层序(须四段); e—LSC5层序(须五段); f—LSC6层序(须六段)
 1—盆地边界; 2—沉积相边界; 3—地名; 4—潟湖潮坪; 5—障壁砂坝; 6—海岸平原; 7—浅湖; 8—湖湾; 9—滨湖; 10—辫状河; 11—浅湖滩坝;
 12—河流—辫状河三角洲平原; 13—辫状河三角洲前缘; 14—扇三角洲平原; 15—扇三角洲前缘

Fig.8 Sequence-based lithofacies and paleogeography maps of T3x1-T3x6 of Xujiahe Formation in Dianjiang area
 a—LSC1 sequence (in the first member of Xujiahe Formation); b—LSC2 sequence (in the second member of Xujiahe Formation); c—LSC3 sequence (in the third member of Xujiahe Formation); d—LSC4 sequence (in the fourth member of Xujiahe Formation); e—LSC5 sequence (in the fifth member of Xujiahe Formation); f—LSC6 sequence (in the sixth member of Xujiahe Formation)

1—Boundary of basin; 2—Boundary of sedimentary facies; 3—Place name; 4—Lagoon tidal flat; 5—Barrier bar; 6—Coastal plain;
 7—Shallow lake; 8—Lake-bay; 9—Lakeshore; 10—Braided river; 11—Shallow lake bars; 12—Fluvial-braided river delta plain;
 13—Braided delta front; 14—Fan delta plain; 15—Fan delta front

(2012)提出的局限海湾明显向东扩大^[24], 由潟湖、潮坪、障壁砂坝组成有障壁海岸沉积体系。垫江地区主体以发育南东→北西向展布的潟湖-潮坪相带为主, 沿研究区中部发育有零星分布的, 轴向北东的小规模障壁砂坝(图8-a)。

3.2.2 LSC2层序(须二段)

相当须二段的该层序沉积早期海水已完全退出川东地区, 是整个四川盆地由海相沉积为主转向

陆相沉积为主的重要时期, 在四川类前陆盆地的构造-沉积演化史中^[2], 属于俗称“须下盆”的Sup-LSC2构造层序的湖侵体系域, 也是该构造层序砂体最发育的时期, 整个垫江地区沿雪峰古陆前缘发育有自南东向北西强烈进积的大型辫状河三角洲沉积体系, 发育于辫状河三角洲平原至前缘亚相带的水上至水下分流河道砂体延伸距离可达数十千米, 分流河道砂体的连续叠置厚度可达150~200

m。三角洲朵体之间为湖湾,前方为含有浅湖滩坝的湖泊沉积体系(图8-b)。

3.2.3 LSC3 层序(须三段)

该层序包括“须下盆”Sup-LSC2 构造层序湖域范围最大的湖泛期和早期高位体系域,垫江地区以发育相当湖泛期的湖泊沉积体系为主,原来向湖域中心延伸的大规模三角洲朵体,受湖侵扩大影响,大多数三角洲的前缘砂体被湖浪原地改造为湖泊中分散分布的,轴向北东的浅湖滩坝砂体,残存的辫状河三角洲朵体向物源方向大幅度后退,龟缩在雪峰古陆北西侧的边缘地带(图8-c),河道砂体分布范围和厚度也明显缩小和减薄。至Sup-LSC2 构造层序晚期高位体系域,受“安县运动”影响,包括垫江地区在内的整个川东地区有强烈的构造隆升和暴露作用,该层序的晚期和大部分早期高位体系域的沉积先后被不同程度地剥蚀,形成“须下盆”与“须上盆”两构造层序之间的分界面。

3.2.4 LSC4 层序(须四段)

该层序为俗称“须上盆”的Sup-LSC3 构造层序的湖侵体系域,也是该构造层序砂体最发育和沉积物最粗的时期。在垫江地区,自北东向南西沿雪峰古陆北西侧边缘依次发育由扇三角洲和辫状河三角洲沉积体系组成的三角洲裙带,如同LSC2 层序,水上至水下分流河道砂体自南东向北西方向延伸的距离可达数十千米,分流河道砂体的连续叠置厚度可达100~150 m,砂体不仅富含长石和浅变质岩屑组分,而且在该层序的大砂体底部,沿大型底冲刷面分布有磨圆度极好的浅变质岩大砾石,反映垫江地区距离类前陆盆地的东部边界不远,沉积物由花岗岩与浅变质岩组合的雪峰古陆杂岩体近源供给。三角洲朵体之间也为湖湾,而在垫江东部地区以发育湖泊沉积体系为主,与发育于川中古隆起东侧的广安和潼南等辫状河三角洲沉积体系隔湖相望(图8-d)。

3.2.5 LSC5 层序(须五段)

该层序包括“须上盆”Sup-LSC3 构造层序的最大湖泛期和早期高位体系域,也系川东地区须家河期湖域范围最大和最稳定的时期,早期沿雪峰古陆北西侧边缘发育的扇三角洲和辫状河三角洲朵体,于中、晚期较大幅度地向物源方向逐渐退缩、变细、消失而形成统一的湖盆,部分早期向湖域中心延伸

的三角洲砂体在中、晚期大部分被湖浪原地改造为浅湖滩坝砂体(图8-e)。

3.2.6 LSC6 层序(须六段)

该层序代表“须上盆”Sup-LSC3 构造层序的晚期高位体系域,早期因受间歇湖侵扩大和沉积物供给量也随之增大的影响,砂体比较发育,在垫江地区沿雪峰古陆北西侧边缘发育的辫状河三角洲朵体再次发育自南东向北西大幅度延伸和穿越原向湖域中心位置的强烈进积作用,并在广安一带与来自川中隆起带的潼南辫状河三角洲东进朵体发生重叠交汇(图8-f)。晚期受印支运动影响,有大幅度的构造隆升作用,毗邻雪峰古陆北西侧边缘发育的垫江地区东部须六段大部分被剥蚀而缺失,而中、西部的须六段地层仍有所保存,主要为该层序早期沉积的辫状河三角洲朵体,三角洲朵体之上的湖相地层仅在部分地区有少量保存,因而相当该层序早期沉积的须六段在垫江乃至整个川东地区都表现为以砂岩为主,其上以印支构造运动不整合面与侏罗系分界。

4 结 论

通过对垫江地区须家河组的沉积-层序特征分析,得出如下几点重要认识:

(1)采用经层序地层学方法优化的地层划分方案,将包括垫江在内的川东地区须家河组划分为可与川中、川西、川北及川东北等地大致对比的须一至须六段6个岩性段,由须一段泥岩中舌形贝化石和须四段底部浅变质岩大砾石的发现,不仅证明垫江地区在须家河早期(须一段)曾经一度为半咸水有障壁海岸沉积环境,中期也受到“安县运动”的影响,可作为川东地区须家河组与全盆地范围内须家河组对比的依据,同时也可证明垫江地区毗邻四川类前陆盆地的东部边界。

(2)沉积体系研究表明,垫江地区须家河组发育有海相和陆相两套地层,其中须一段属于有障壁海岸沉积体系,须二至须六段属于交替发育的湖泊、辫状河三角洲和扇三角洲沉积体系。

(3)以不同级别的层序界面与洪泛面识别为依据,从垫江地区须家河组中识别出3个具有构造不整合性质的界面,可将须家河组划分为分别相当“残余海相盆地”、“须下盆”和“须上盆”的3个构造

层序(Sup-LSC1~Sup-LSC3),又以区域性湖侵形成的大型冲刷面及岩相突变面为界,以最大洪泛面作为等时对比标志,又可将须家河组划分为于全盆地范围内可追踪对比的6个长期旋回层序(LSC1~LSC6),各长期旋回层序分别对应于须一段至须六段6个岩性段。

(4)以层序界面和洪泛面为等时地层对比位置,长期旋回层序为等时地层对比单元,建立川中隆起带—川东南坳陷带构造层序和长期旋回层序等时地层格架。在此基础上,编制以长期旋回层序为等时地层单元的层序-岩相古地理图,还原了垫江地区须家河组古地貌和演化历史,也为下一步的砂体描述和储层及油气藏预测奠定了基础。

致谢: 审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 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——中国地质大学学报, 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—Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(4): 366-372(in Chinese with English abstract).
- [2] 刘和甫,梁惠社,蔡立国,等. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化[J]. 地质学报, 1994, 68(2): 101-113.
Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Ligu, et al. Structural styles of the Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(2): 101-113 (in Chinese with English abstract).
- [3] 孙肇才. 中国中西部中-新生代前陆类盆地及其含油气性——兼论准噶尔盆地内部结构单元划分[J]. 海相油气地质, 1998, 3(4): 16-30.
Sun Zhaocai. Mesozoic-Cenozoic foreland basins and their hydrocarbon prospect in middle and western parts of China, as well as division of internal texture units in Junggar Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1998, 3(4): 16-30(in Chinese with English abstract).
- [4] 郑荣才,李国辉,戴朝成,等. 四川类前陆盆地-山耦合系统和沉积学响应[J]. 地质学报, 2012, 86(1): 170-180.
Zheng Rongcai, Li Guohui, Dai Chaocheng, et al. Basin-mountain coupling system and its sedimentary response in Sichuan analogous foreland basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 170-180 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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): 1078-1087.
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): 1078-1087(in Chinese with English abstract).
- [6] 郑荣才,朱如凯,翟文亮,等. 川西类前陆盆地晚三叠世须家河期构造演化及层序充填样式[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 246-255.
Zheng Rongcai, Zhu Rukai, Zhai Wenliang, et al. Tectonic evolution and sequence filling patterns in the western Sichuan foreland-like basin in the upper Triassic Xujiahean period[J]. Geology of China, 2008, 35(2): 246-255(in Chinese with English abstract).
- [7] 戴朝成,郑荣才,朱如凯,等. 四川盆地须家河组层序充填样式与油气地质特征[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1817-1828.
Dai Chaocheng, Zheng Rongcai, Zhu Rukai, et al. Sequence filling patterns and oil-gas distribution rules of the Xujiahe Formation in the Sichuan foreland-like basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(12): 1817-1828(in Chinese with English abstract).
- [8] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2010, 31(3): 347-354.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Distribution and further exploration of the large-medium sized gas fields in Sichuan basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 31(3): 347-354(in Chinese with English abstract).
- [9] 曾青高,龚昌明,李俊良,等. 川中地区须家河组气藏勘探成果及潜力分析[J]. 天然气工业, 2009, 29(6): 13-18.
Zeng Qinggao, Gong Changming, Li Junliang, et al. Exploration achievements and potential analysis of gas reservoirs in the Xujiahe Formation, central Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(6): 13-18(in Chinese with English abstract).
- [10] 邹才能,陶士振,张响响,等. 中国低孔渗大气区地质特征、控制因素和成藏机制[J]. 中国科学(D辑), 2009, 39(11): 1607-1624.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhang Xiangxing, et al. Geologic characteristics, controlling factors and hydrocarbon accumulation mechanisms of China's large gas provinces of low porosity and permeability[J]. Science in China (Series D), 2009, 39(11): 1607-1624 (in Chinese).
- [11] 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): 190-196.
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): 190-196 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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): 12-15.
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): 12–15 (in Chinese with English abstract).
- [13] 罗启后. 安县运动对四川盆地中西部上三叠统地层划分对比与油气勘探的意义[J]. *天然气工业*, 2011, 31(6): 21–27.
- Luo Qihou. Significance of the Anxian movement to the stratigraphic division and correlation of the upper Triassic Formations and their hydrocarbon exploration in the western-central Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(6): 21–27 (in Chinese with English abstract).
- [14] 何鲤, 段勇, 罗潇, 等. 川西坳陷上三叠统层序地层划分新方案[J]. *天然气工业*, 2007, 27(2): 6–11.
- He Li, Duan Yong, Luo Xiao, et al. New scheme of sequence stratigraphic division for Upper Triassic in western Sichuan depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(2): 6–11 (in Chinese with English abstract).
- [15] 何鲤, 李梅, 熊亮, 等. 再谈四川盆地上三叠统层序地层划分方案[J]. *天然气工业*, 2011, 31(6): 28–33.
- He Li, Li Mei, Xiong Liang, et al. Re-discussion on the sequence division schemes of Upper Triassic Formations in the Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(6): 28–33 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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 (in Chinese with English abstract).
- [17] 姜在兴, 田继军, 陈桂菊, 等. 川西前陆盆地上三叠统沉积特征[J]. *古地理学报*, 2007, 9(2): 143–154.
- Jiang Zaixing, Tian Jijun, Chen Guiju, et al. Sedimentary characteristics of the Upper Triassic in western Sichuan foreland basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(2): 143–154 (in Chinese with English abstract).
- [18] 魏国齐, 杨威, 金惠, 等. 四川盆地上三叠统有利储层展布与勘探方向[J]. *天然气工业*, 2010, 30(1): 11–14.
- Wei Guoqi, Yang Wei, Jing Hui, et al. Distribution of favorable reservoirs and exploration targets in the Upper Triassic of the Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(1): 11–14 (in Chinese with English abstract).
- [19] 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 Xujiahe Formation in the Sichuan basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(12): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- [20] 钱治家, 钟克修. 川东北地区须家河组沉积相与储层特征[J]. *天然气工业*, 2009, 29(6): 9–12.
- Qian Zhijia, Zhong Kexiu. Sedimentary facies and reservoir features of the Xujiahe Formation in northeastern Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(6): 9–12 (in Chinese with English abstract).
- [21] 郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 等. 四川类前陆盆地须家河组层序-岩相古地理特征[J]. *地质论评*, 2009, 55(4): 484–495.
- Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, et al. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan basin[J]. *Geological Review*, 2009, 55(4): 484–495 (in Chinese with English abstract).
- [22] 郑荣才, 戴朝成, 罗清林, 等. 四川类前陆盆地上三叠统须家河组沉积体系分析[J]. *天然气工业*, 2011, 31(9): 17–24.
- Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Luo Qinglin, et al. Sedimentary system of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan foreland old basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(9): 17–24 (in Chinese with English abstract).
- [23] 施振生, 赵正望, 金惠, 等. 四川盆地上三叠统小塘子组沉积特征及地质意义[J]. *古地理学报*, 2012, 14(4): 477–486.
- Shi Zhensheng, Zhao Zhengwang, Jin Hui, et al. Depositional characteristics and its geological significance of the Upper Triassic Xiaotangzi Formation in Sichuan basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(4): 477–486 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王金琪. 安县构造运动[J]. *石油与天然气地质*, 1990, 11 (3): 223–234.
- Wang Jinqi. Anxian tectonic movement[J]. *Oil & Gas Geology*, 1990, 11 (3): 223–234 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王金琪. 龙门山印支运动主幕辨析——再论安县运动[J]. *四川地质学报*, 2003, 23(2): 65–69.
- Wang Jinqi. Recognition on the main episode of Indo—China movement in the Longmen Mountains—A rereview on the Anxian tectonic movement[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2003, 23(2): 65–69 (in Chinese with English abstract).
- [26] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 249–255.
- Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 249–255 (in Chinese with English abstract).
- [27] 高志勇, 郑荣才, 罗平. 陆相高分辨率层序地层中洪泛面特征研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(1): 47–56.
- Gao Zhiyong, Zheng Rongcai, Luo Ping. A study of the flooding surface in the high-resolution stratigraphic sequence of continental deposit[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2007, 34(1): 47–56 (in Chinese with English abstract).