

四川盆地上三叠统沉积储层研究进展与热点分析

施振生¹,朱筱敏²,张亚雄³,金惠¹

[1. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;

3. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083]

摘要:四川盆地上三叠统天然气资源丰富,常规气藏和非常规气藏共存,等时地层格架下的沉积储层控制了天然气资源时空分布和富集。随着天然气勘探不断深入,沉积储层研究不仅体现了重要的科学意义和战略价值,而且取得了显著进展。在建立四川盆地上三叠统层序地层格架基础上,确定了前陆盆地对称型和不完全对称型结构层序地层样式及演化模式。四川盆地马鞍塘组—须家河组三段(须三段)为海相沉积,须家河组四段(须四段)—须家河组六段(须六段)为陆相沉积,但仍受到海侵作用的影响。马鞍塘组主要发育礁滩相、潟湖相、潮坪相和三角洲相,小塘子组主要发育障壁砂坝—潟湖沉积,盆地周缘发育小型三角洲。川西须家河组须二段、须四段和须六段主要发育冲积扇、扇三角洲和辫状河三角洲沉积,须三段主要发育滨海—三角洲沉积,须五段主要发育湖泊—三角洲沉积。晚三叠世四川盆地存在秦岭古陆、大巴山古陆、松潘—甘孜褶皱带(古龙门山)、康滇古陆和江南(雪峰)古陆等5大物源区,不同物源区的物源性质、影响范围和程度均存在巨大差异。整体上,须二段—须三段沉积时期,物源主要来自于盆地北部,其他方向物源影响范围相对较小。须家河组发育致密砂岩储层,压实作用造成本地区砂岩原生孔隙度大幅度减小,Ⅱ期和Ⅲ期石英加大进一步减小原生孔隙,封闭的地下流体环境是储层保持致密化的又一原因。须家河组甜点储层的形成受沉积微相、溶蚀作用,绿泥石衬边和裂缝控制,三角洲前缘水下分支河道砂体为有利沉积微相。近年来,浅水三角洲研究和页岩气勘探开发取得重大进展,四川盆地上三叠统浅水三角洲、细粒沉积学及沉积机理、沉积过程模拟、细粒沉积储层特征及其成因机制是目前研究的热点领域及未来发展方向。

关键词:层序地层;海侵过程;细粒沉积;致密储层;沉积体系;上三叠统;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Advances and trending topics in sedimentary reservoir research of the Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin

Shi Zhensheng¹, Zhu Xiaomin², Zhang Yaxiong³, Jin Hui¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The Upper Triassic in the Sichuan Basin is rich in both conventional and unconventional gases, the temporal and spatial distribution and enrichment of which are controlled by sedimentary reservoirs under an isochronous stratigraphic framework. Exploration activities in the basin have drawn greatly from sedimentary reservoir research and highlighted its scientific and strategic significance. Progresses made in the domain can be summarized as establishment of symmetrical and less symmetrical sequence stratigraphic models and their evolutionary patterns of the foreland basin based on previous Upper Triassic sequence stratigraphic frameworks. The Ma'antang Formation to the third member of Xujiahe Formation are marine deposits, and the fourth to the sixth member of Xujiahe Formation are continental deposits, though still under the effect of sea transgression. The Ma'antang Formation mainly consists of reef-shoal facies, lagoon facies, tidal flat lake and delta facies; the Xiaotangzi Formation mainly consists of barrier sand bar-lagoon facies with small deltas developed around basin. The second, fourth and sixth members of Xujiahe Formation are dominated by alluvial fans, fan deltas and braided river delta facies, the third member consists of coastal-delta facies, and the fifth

收稿日期:2021-02-19;修订日期:2021-06-20。

第一作者简介:施振生(1976—),男,博士,高级工程师,石油地质。E-mail:19777027@qq.com。

通讯作者简介:朱筱敏(1962—),男,教授,博士生导师,沉积储层。E-mail:xmzhu@cup.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05035-001)。

member is mainly composed of lacustrine-delta facies. Five major provenances existed during the Late Triassic in Sichuan Basin, including Qinling ancient land, Dabashan ancient land, Songpan-Ganzi fold belt, Kangdian ancient land, and Jianglan ancient land, with each providing sediment inputs of temporal and spatial differences in terms of nature, scope and extent. Sediments were largely sourced from the north part of the basin during the deposition of the second and third members of Xujiahe Formation. Tight sandstone reservoirs in the Xujiahe Formation are closely linked to compaction which caused great primary porosity loss and the quartz overgrowth in II and III phases that further reduced the primary porosity. The closed underground fluid environment also made its contribution to the formation of tight reservoirs. Sweet spots in the formation were controlled by microfacies, dissolution, chlorite lining, and fractures, and thus making the underwater branch channels at delta fronts the most promising targets for tight gas discovery. With major progresses in shallow water delta research and shale gas exploration in recent years, shallow water deltas, fine-grain sedimentology and deposition mechanisms, sedimentary process simulation and fine-grained reservoir characterization of the Upper Triassic in Sichuan Basin, have become the trending topics and future research directions.

Key words: sequence stratigraphy, transgressive process, fine-grained deposits, tight reservoir, depositional system, Upper Triassic, Sichuan Basin

四川盆地为一个典型的叠合沉积盆地,主要充填了前寒武系-中-新生界海-陆相沉积地层,其中上三叠统分布面积广,可供勘探面积约 $16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。四川盆地上三叠统天然气勘探始于20世纪50年代^[1],第四次资源评价结果表明,上三叠统天然气资源量约 $2.59 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。截至2020年底,已获天然气探明地质储量约 $7220 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源探明率27.8%,剩余资源量高达 $1.87 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。目前在已发现的构造岩性复合型气藏、岩性气藏、地层气藏和构造气藏4大类常规气藏和水溶气藏及毛细管压力封堵气藏2类非常规气藏中^[2],沉积相及储层特征是天然气聚集成藏的关键控制因素。

四川盆地上三叠统形成于晚三叠世印支期,构造活动频繁、沉积类型多样,沉积储层研究不仅可以解析印支运动的演化历史,还可极大丰富深时沉积学及储层地质学研究内容。盆地物源研究为弄清四川盆地及周缘板块构造活动提供了重要手段和盆-山耦合信息^[3],层序地层学研究为前陆盆地层序地层样式提供了重要素材^[4],砂体类型及特征研究为探讨浅水三角洲内部构型及形成主控因素提供了基础^[5]。沉积储层研究在四川盆地上三叠统天然气工业可持续发展中具有重要的战略地位。近年来,大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲概念的提出和湖盆中心大面积砂体的发现^[6],上三叠统小塘子组、须家河组三段(须三段)、须五段源内成藏概念的提出大大拓展了勘探领域^[7],小塘子组障壁砂坝砂体的发现拓展了天然气的勘探方向和开发策略^[8]。页岩气勘探开发已经取得重大进展,四川盆地上三叠统小塘子组、须三段和须五段页岩大面积发育,势将成为下一步的重要勘探方向^[9]。

随着油气勘探的快速发展,发现浅水三角洲^[10-12]、细粒沉积学及沉积机理^[13]、沉积过程模拟^[14]、细粒沉积储层特征及成因^[15]等研究将会影响上三叠统天然气高效勘探开发。显然,总结四川盆地上三叠统层序、沉积储层研究成果对于完善沉积学理论、拓展勘探领域、指明下步勘探方向具有重要的科学意义和战略价值。故本文通过系统调研并结合作者近期研究工作,阐明了四川盆地上三叠统层序、沉积储层研究现状及进展,结合沉积储层学科的研究热点和研究方向,探讨了影响四川盆地上三叠统须家河组天然气成功勘探的科学和生产热点问题。

1 地质背景

四川盆地位于中国西南部,东北有大巴山,东南有大娄山,西南为大凉山,西侧为邛崃山、龙门山,北侧为米仓山(图1)。盆内多低山丘陵,海拔为300~600 m。以龙泉山、华蓥山为界,大体可以把盆地分为3部分,盆地西部为成都平原,中部多低山丘陵,东部为平行岭谷。

四川盆地为发育于前震旦系变质岩基底之上的大型叠合盆地,经历了从元古宙到中生代早期漫长的海相克拉通盆地和中新生代前陆盆地演化过程^[16]。盆地形成演化经历4个阶段,即中-新元古代扬子地台基底形成阶段,震旦纪-中三叠世被动大陆边缘阶段,晚三叠世前陆盆地形成阶段和侏罗纪-第四纪前陆盆地阶段^[17-18]。四川盆地三叠系自下而上充填飞仙关组、嘉陵江组、雷口坡组、天井山组、马鞍塘组、小塘子组和须家河组^[19]。飞仙关组和嘉陵江组属于下三叠

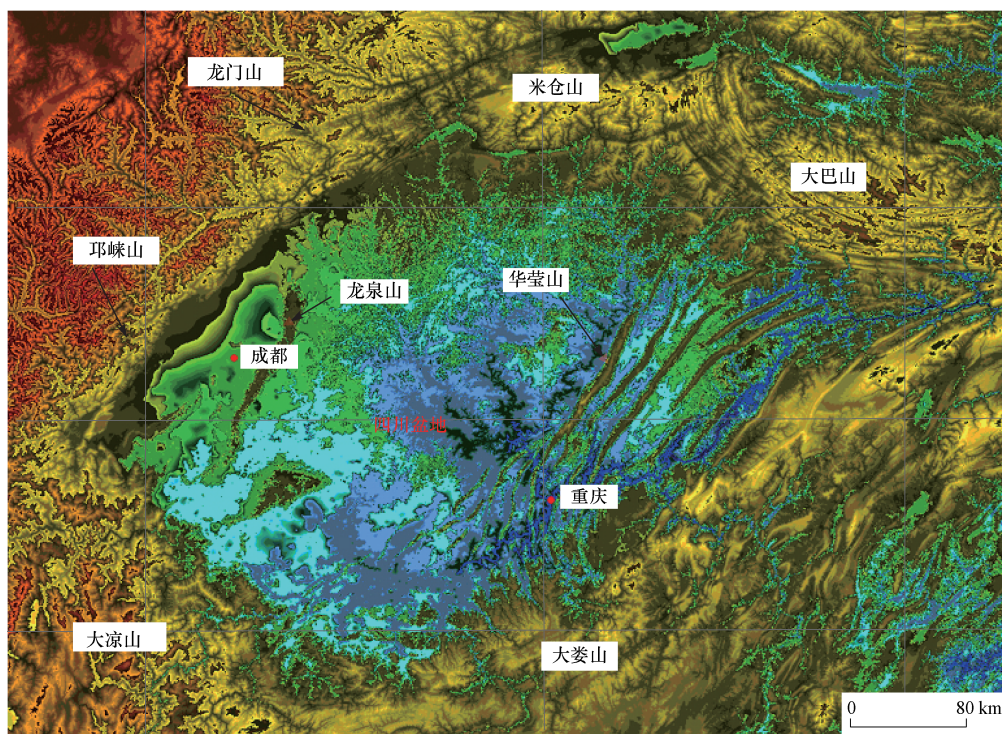


图1 四川盆地地理位置、周缘山脉的分布及盆内地貌特征

Fig. 1 Map showing the location of the Sichuan Basin with inner morphological features and the distribution of surrounding mountain ranges

统,雷口坡组 and 天井山组属于中三叠统,马鞍塘组、小塘子组和须家河组属于上三叠统(图2)。马鞍塘组主要分布于盆地西部,平行不整合覆盖于中三叠统雷口坡组 and 天井山组之上,与上覆小塘子组 and 须家河组为连续沉积。马鞍塘组和小塘子组仅发育于川西北龙门山向盆地方向的前陆盆地中,分布面积约 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$,厚度 $0 \sim 350 \text{ m}$,由西至东,地层逐渐减薄,沉积中心川西地区厚度均大于 200 m ,川中地区厚度 $0 \sim 200 \text{ m}$ 。马鞍塘组发育硅质海绵礁—鲕滩沉积,是重要的油气勘探开发领域^[20]。川中—川西地区小塘子组发育障壁砂坝砂体,储集条件良好,也是未来油气勘探的重要方向^[8]。须家河组发育6个段,即须一段、须二段、须三段、须四段、须五段和须六段,须一段由于在盆地内与马鞍塘组和小塘子组为同一套地层,故不再划分为须家河组。盆内须二段与下伏小塘子组、须六段与上伏侏罗系以及段与段之间均为整合接触。须二段、须四段和须六段下部均以砂岩为主,间夹少量薄煤层、煤线或炭质泥岩、粉砂质泥岩(如川西北须家河、川南永安场剖面);须三段和须五段以煤系为主夹砂岩层。因受印支晚期运动的影响,须六段在部分地区沉积较薄或仅为剥蚀残余,甚至被剥蚀殆尽。须家河组在全盆地均有分布,地层厚度为 $200 \sim 4\,000 \text{ m}$,自西向东逐渐减薄,川西地区大于 600 m ,川中地区 $300 \sim 600 \text{ m}$,川东地区 $200 \sim 300 \text{ m}$,沉积中心位于川西地区。

2 主要研究进展

2.1 层序地层格架

依据层序地层学主流学派理论和多种地质、地球物理资料,可以搭建四川盆地上三叠统等时地层格架。目前主要有3种层序地层划分方案(表1)。第一种方案根据川西地区地震、露头 and 钻井资料将上三叠统划分为3个构造层序、7个体系域(或沉积层序),其中,马鞍塘组—小塘子组、须二段—须三段、须四段—须六段分别构成1个构造层序^[21-23]。这3个构造层序对应晚三叠世四川盆地3个构造演化阶段。每个构造层序可进一步划分为1个盆地扩张体系域和1个盆地收缩体系域。下部构造层序1(TS1)形成于印支运动第I幕,中部构造层序2(TS2)形成于逆冲推覆作用为主的龙门山造山带锥形形成阶段,上部构造层序3(TS3)对应川西前陆盆地发展阶段。第二种层序划分方案主要根据川中地区地震、露头 and 钻井资料将上三叠统须家河组划分为2个超长期基准面旋回层序(SLSC)、5个长期基准面旋回层序(LSC)和17个中期基准面旋回层序(MSC)。其中,须二段—须三段构成超长期基准面旋回1,须四段—须六段构成超长期基准面旋回2,须二段、须三段、须四段、须五段、须六段分别构成1个

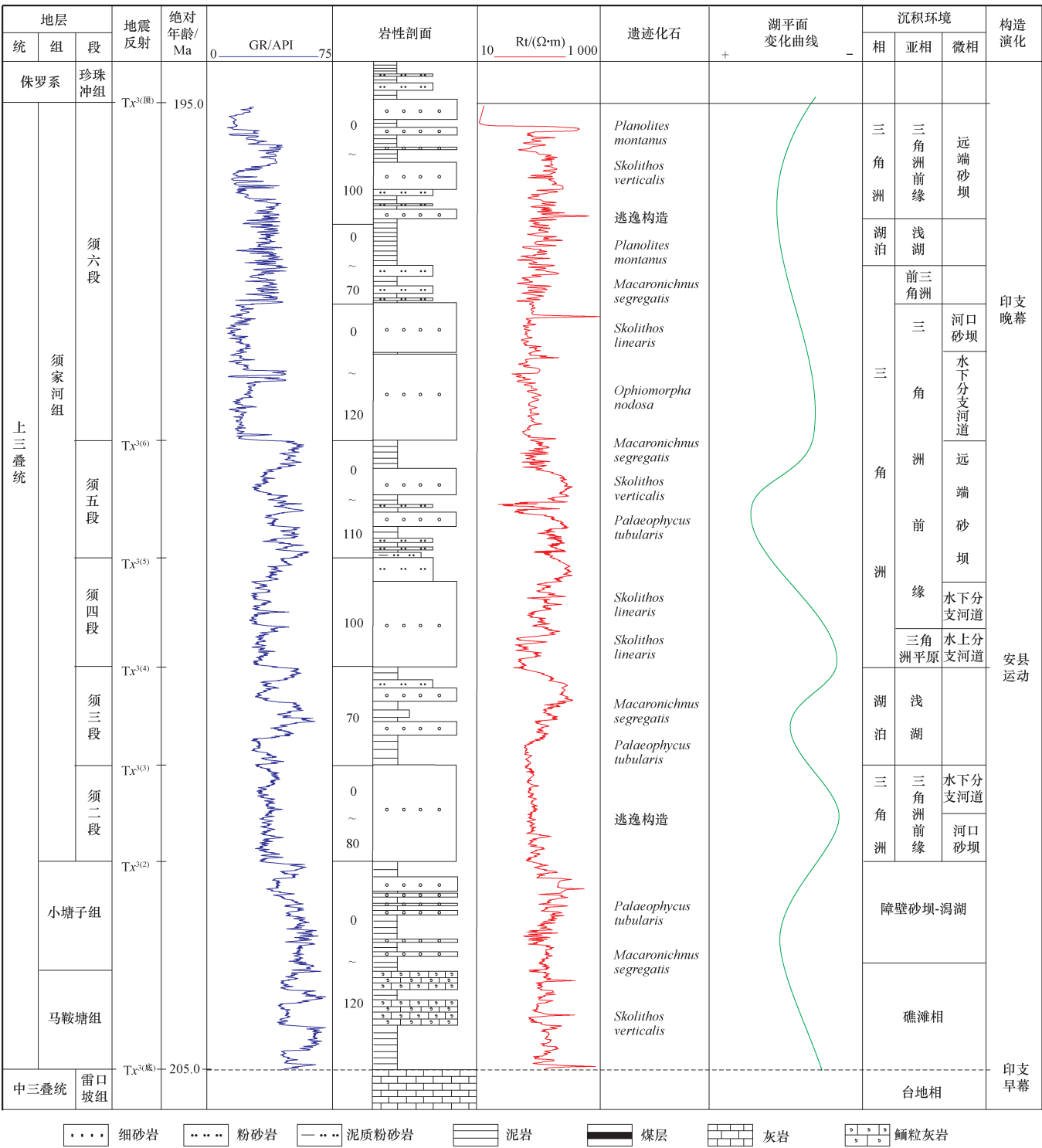


图 2 四川盆地上三叠统马鞍塘组、小塘子组和须家河组地层综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of the Upper Triassic Ma'antang, Xiaotangzi and Xujiahe formations, Sichuan Basin

长期基准面旋回^[4,24-25]。该方案认为“安县运动”是晚三叠世四川盆地内最重要的构造运动,以“安县运动”为界,可将四川盆地划分为“须下盆”和“须上盆”2个演化阶段^[26]。超长期基准面旋回 1 形成于“须下盆”演化阶段,超长期基准面旋回 2 形成于“须上盆”演化阶段。须二段、须四段和须六段为构造活动强烈

时期沉积,须三段和须五段为构造活动间歇休眠期沉积。超长期基准面旋回 1 反映了相对稳定和均衡的盆-山耦合过程。该阶段物源供给和可容纳空间增长率基本持平,上升和下降半旋回相域厚度近于相等。超长期基准面旋回 2 反映了非均衡盆-山耦合特点,碎屑物供给量骤然增多且远大于可容纳空间增长率,

表 1 四川盆地上三叠统不同层序地层划分方案对比

Table 1 Sequence stratigraphy division schemes for the Upper Triassic in the Sichuan Basin

地层				界面特征	层序地层划分方案							本文建议	
系	统	组	段		方案一		方案二			方案三			
下侏罗统				区域性不整合	BW								
三 <													

注:BW. 基准面下降;BE. 基准面上升;Mfs. 最大洪泛面;SLSC. 超长期基准面旋回;LSC. 长期基准面旋回;MSC. 中期基准面旋回;LST. 低位体系域;TST. 水进体系域;HST. 高位体系域

盆内仍以发育上升与下降半旋回相域沉积厚度近于相等的对称型层序结构和充填样式为主。第三种层序划分方案将上三叠统划分为 4 个三级层序,分别对应于马鞍塘组—小塘子组、须二段—须三段、须四段—须五段和须六段^[27-28]。该方案认为须二段、须四段、须六段下部的厚层砂质沉积为低位体系域(LST)沉积产物,而须三段、须五段和须六段中部的泥质沉积为水进(TST)和高位体系域(HST)产物。作者认为,上述 3 种层序地层划分方案本质上基本一致,不同学者由于研究区域和具体层位不同造成局部差异。本文倾向于将上三叠统划分为 3 个构造层序、7 个体系域(或沉积层序),即马鞍塘组和小塘子组为构造层序 1,须二段—须三段为构造层序 2,须四段—须六段为构造层序 3(表 1)。

四川盆地上三叠统层序地层样式与盆地结构密切相关。一部分学者认为,前陆盆地结构分为逆冲推覆带、前渊拗陷带、前陆隆起带,层序充填样式以冲断带和拗陷带发育湖侵体系域与高位体系域不完全对称型结构为主,盆地其余地区以发育两者近于对称型结构为主。构造活动期盆内发育冲积扇—扇三角洲—辫状河三角洲—湖泊相沉积体系,而构造平静期发育湖泊—三角洲沉积体系^[4]。本文认为,四川前陆盆地上三叠统发育“早期海相层序”和“晚期陆相层序”,地层演化呈现

“对冲式”结构,可分为“须下盆”和“须上盆”2 个阶段。

2.2 沉积体系类型和分布

四川盆地上三叠统马鞍塘组、小塘子组、须家河组发育多种沉积体系类型。马鞍塘组由南向北依次发育礁滩相、潟湖相、潮坪相和三角洲相(图 3a),礁滩相主要平行西北部的龙门山造山带分布^[20,29],潮坪相和潟湖相主要分布于盆地中部,而三角洲相主要分布于盆地西北部和中部^[30]。小塘子组川中和川南地区发育障壁砂坝—潟湖沉积^[21],川西拗陷北部和南部发育辫状河三角洲、曲流河三角洲等沉积(图 3b)^[31]。须三段和须五段主要发育扇三角洲、辫状河三角洲、曲流河三角洲和湖泊(潮坪)4 类沉积体系(图 3c)。扇三角洲和辫状河三角洲主要分布于川西拗陷龙门山前缘带^[32],曲流河三角洲主要分布于川中和川东地区^[5],湖泊(潮坪)沉积主要发育于川中和川西过渡带,中间夹有大量浅湖滩坝沉积^[5]。

然而,关于四川盆地川中地区上三叠统须二段、须四段和须六段的沉积体系类型的认识存在多种观点。第一种观点认为川中地区须二段、须四段和须六段砂体为三角洲前缘水进河床与河口砂坝至滨湖滩、坝砂体,该类砂体是水进期间沉积物充填河湖(或海)交汇

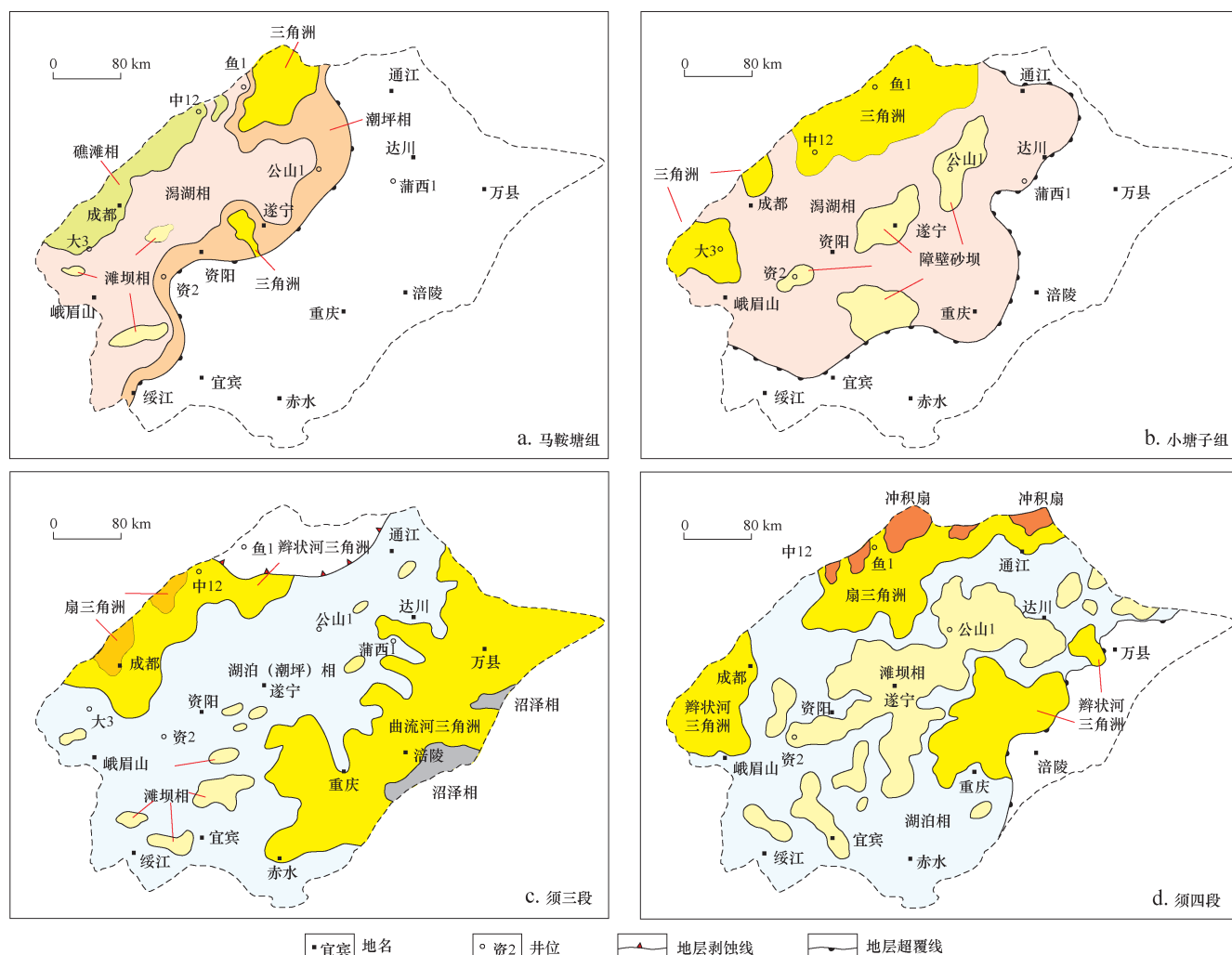


图3 四川盆地上三叠统马鞍塘组、小塘子组和须家河组沉积相分布

Fig.3 Sedimentary facies of the Upper Triassic Ma'antang (a), Xiaotangzi (b), and Xujiache formations (c, d), Sichuan Basin

地带的河道所形成^[33]。三角洲平原分支河道砂、前缘河口坝砂和水进河床砂反复叠加,加上河道侧向迁移摆动与各个三角洲体相互拼接连片,从而造成砂体大面积分布^[34]。第二种观点认为,须二段、须四段和须六段四川盆地周缘发育冲积扇、扇三角洲和辫状河三角洲沉积,川中地区砂体为经冲积扇、河流搬运入湖的碎屑物质经波浪和湖流反复簸洗、改造和再分配形成的沿岸和近岸的滩坝砂体,滩坝砂体后发育滨岸含煤沼泽^[35-36]。第三种观点认为须二段、须四段和须六段从近冲断带物源区的盆缘至前缘坳陷带中心区,依次发育冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲及湖泊-沼泽等沉积体系,而在前陆隆起带的近物源区至前隆斜坡带至前缘坳陷带中心区,依次分布河流、湖泊三角洲及湖泊-沼泽沉积体系^[5,31-32]。第四种观点认为须二段至须六段为碎屑浅海环境,除盆地边缘除了发育三角洲相以外,盆地内川中地区以近海潮汐沉积为主^[37-39]。其中,须二段属潮控河口湾环境,包括冲积河道、潮汐、

河流水道、高流态砂坪、潮汐沙坝、泥坪和盐沼等相。须四段属潮控三角洲环境,包括三角洲平原河道、分流河口潮汐沙坝、三角洲前缘与前三三角洲、泥坪与盐沼等相。本文倾向于第二种观点,即须二段、须四段和须六段四川盆地周缘发育冲积扇、扇三角洲和辫状河三角洲沉积,川中地区发育滩坝砂体(图3c),滩坝砂体后发育滨岸含煤沼泽。龙门山造山带晚三叠世构造隆升的分段性及其层序充填响应控制着各类沉积体系的形成与分布^[40]。

四川盆地上三叠统沉积体系类型及演化是周缘板块构造活动的结果。中、晚三叠世之交的强烈构造运动,结束了中、上扬子地区自伊迪卡拉纪以来的稳定古构造背景,形成一个从残留海相盆地到具有前陆性质的陆相磨拉石盆地的演化序列^[19]。以安县运动为界,四川盆地晚三叠世可分为“须下盆”(马鞍塘组—须三段)和“须上盆”(须四段—须六段)两个演化阶段^[26,41]。“须下盆”演化阶段,四川盆地西部为松潘—

甘孜海槽,四川盆地大部分地区受相邻板块碰撞影响隆升为陆,形成中三叠统雷口坡组与上三叠统马鞍塘组之间的构造不整合。该时期龙门山、川西和川中地区都属于前陆隆起带的组成部分。随后,前陆隆起向西南方向迁移,构造不整合面上自西向东依次发育了马鞍塘组和小塘子组。马鞍塘组形成时期,由于造山楔构造负载导致前陆盆地强烈的挠曲构造沉降,物源供给少,从而导致硅质海绵生物礁丘发育^[20,42],相对海平面上升速率变化导致碳酸盐缓坡和海绵礁的形成和淹没^[42]。小塘子组形成时期,物源供给增加,波浪、潮汐和沿岸流相互作用造成川中地区障壁砂坝—潟湖沉积体系大面积形成^[30]。须二段和须三段形成时期,受松潘—甘孜褶皱带向东南推进的构造侵位影响,龙门山率先进入逆冲推覆状态和主体露出水面,部分隆升幅度较大的地区构成了北东向分布的岛链和可供物源的造山带雏形。该时期由于来自于北部(秦岭)和东北部,以及康滇和川中古陆物源的影响,三角洲砂体大面积形成,西部的岛链和造山带也可能提供少量物源^[26]。“须上盆”形成阶段,受更强烈的逆冲推覆和大幅度隆升影响(安县运动),龙门山造山带正式形成^[43]。该阶段由于构造相对强烈,物源供给充分,故河流和三角洲砂体广泛发育,平缓的地形、充足的物源供给和频繁的水体进退,造成四川盆地砂体大面积分布^[27]。整体上,上三叠统形成时期,受幕式构造运动、古气候和基准面的控制^[5],须三段和须五段以泥质沉积为主,须二段、须四段和须六段以砂质沉积为主(图3)。

2.3 海侵问题

四川盆地上三叠统是否存在海侵,学术界一直争议不断。2008年前,主流观点认为,四川盆地除了马鞍塘组和小塘子组为海湾中形成的海陆交互相沉积外,须二段—须六段均为陆相沉积^[35,44],至于上三叠统中大量出现的海绿石、菱铁矿结核、海相生物化石、风暴岩等可能与海侵影响或局部地区发育海相沉积有关^[35,45]。例如,张福存等(1976)根据微量元素硼的分析认为,须二段沉积时期,四川盆地与西部的松潘—甘孜海相通,川西中坝地区为海相沉积,从中坝到川中八角场有淡化趋势^[45]。罗启后(2015)认为四川盆地须家河组须二段—须六段为“滨海湖泊”沉积,古特提斯海水自盆地西南部偶有倒灌入湖引起湖水咸化造成大量海相生物化石和海绿石的形成,海侵影响的范围包括川西和川中地区^[34]。近年来,一些学者明确提出上三叠统须家河组为海相或海陆过渡相沉积。赵霞飞等(2013,2018)根据岩心和野外露头剖面中大量出现的

双粘土层结构和双向交错层理等判断川中大部分地区须家河组为近海潮汐沉积,潮汐作用来源于盆地西南部,盆地边缘存在三角洲沉积^[37-38]。罗启后(2011)认为马鞍塘组—须家河组须三段可能为海相沉积,须四段—须六段则为陆相沉积^[33]。施振生等(2012)指出四川盆地上三叠统马鞍塘组—须三段为海相沉积,须四段—须六段沉积时期,由于龙门山南段的隆升,四川盆地与外海逐渐失去联系,但川西和川中地区仍受到海侵作用的影响^[45]。张敏等(2013)和蔡杰等(2013)认为,上三叠统沉积时期,四川盆地一直受到海侵作用的影响^[46-47]。

四川盆地上三叠统海相沉积存在构造学、古生物学、岩石学、有机地球化学等证据。构造学方面,近年来研究表明,晚三叠世马鞍塘组和小塘子组形成时期,四川盆地与西部的松潘—甘孜海完全相通,四川盆地内部为残留海盆沉积^[19]。须二段—须六段沉积时期,龙门山北段是由西北向东南逐渐推覆的,龙门山南段尚未抬升或尚未完全抬升,四川盆地与外海依旧相通^[3,8,27,48-49]。在古生物学方面^[50],咸水—半咸水生物 *Unionites yunnanophorus*, *Myophoriopsis*, *Permophorus*, *Modiolus* 等属既出现于马鞍塘组和小塘子组,也延续到之上地层。须二段—须六段主要发育半咸水—淡水生物组合 *Modiolus weiyuanensis*—*Unionites emeiensis*。张璐瑾(1984)指出须家河组发育滨海相动物化石,其“最重要特征是存在生长于半咸水的动物化石”^[51]。岩石学证据包括沉积构造、粘土矿物组成和硼钾比。上三叠统发育大量潮汐成因沉积构造,包括羽状和双向交错层理、双粘土层结构、皱褶层和全涡流构造^[37-39],脉状层理、波状层理和透镜状层理也十分普遍^[44]。上三叠统发育大量伊利石和绿泥石,表明盆地受到盐碱性古水介质的影响。硼钾比分析表明,上三叠统古水体盐度远远大于正常淡水湖泊水体盐度(平均值为0.5‰)^[52]。在有机地球化学证据方面,上三叠统气源岩中正构烷烃存在明显的双峰态分布特征,菌、藻类生源化合物丰富,Pr/Ph 比值较低(平均0.60), β -和 γ -胡萝卜烷及其降解系列十分发育,甲基甾烷与甲藻甾烷十分发育、含量丰富,芳烃馏分中含硫芳烃相对丰度较高,“三芴”系列组成既不同于典型的盐湖相源岩,也与常规的沼泽相源岩存在明显差异^[46]。

本文倾向认为,四川盆地上三叠统马鞍塘组—须三段为海相沉积,须四段—须六段沉积时期,总体为陆相沉积,但川西和川中地区仍受到海侵作用的影响。总体说来,四川盆地上三叠统海侵的古生物学方面证

据相对不足,下一步需要在盆地中选择关键露头剖面,开展系统的古生物学研究,建立古生物学研究“铁柱子”。

2.4 事件沉积

四川盆地上三叠统所发现的事件沉积主要有风暴沉积和震积沉积。事件沉积研究可以提供地史时期气候变化和地震的长周期记录,可为龙门山地震带的确立与活动提供背景材料。

风暴沉积主要发现于川西和川中地区须二段和须四段,川东地区尚未发现。李华启等(2003)在四川盆地西部上三叠统须二段岩心中发现了典型的风暴沉积,包括渠模构造(或口袋构造)、冲刷面和截切构造、风暴滞积层段、丘状交错层理、包卷层理、浪成层理、倒“小”字状构造、生物扰动构造等。其垂向沉积序列可以划分出 Sa, Sb, Sc, Sd, Se 等 5 段^[53]。陈辉等(2008)在四川盆地中部须二段和须四段岩心中发现了典型的风暴沉积,典型构造包括底面构造(冲刷面、渠模)、变形构造(负荷构造、球状构造、枕状构造、包卷层理和火焰构造等)、滞留沉积、丘状交错层理、生物扰动构造和粒序层理^[54]。川西和川中地区风暴沉积常呈夹层状发育于三角洲前缘砂体中。

震积沉积主要发现于龙门山前缘带和川西地区,它常呈夹层状发育于小塘子组和须家河组三角洲砂岩中,纵向构成典型的震积沉积序列。戴朝成等(2008)首次在须家河组识别出微裂缝、微褶皱、微断层、液化角砾岩、液化砂岩脉和球-枕等软沉积变形构造,建立了震积岩的垂向演化序列^[55]。乔秀夫等(2012, 2016)在小塘子组发现了与地震触发成因的液化变形(液化角砾岩、滴状体与底辟)和水塑性变形(卷曲变形与拉伸软布丁构造)及与重力作用相变形构造(负载、球-枕、枕状层)^[56-57]。须家河组软沉积物变形有与重力作用相关的变形构造(负载、球-枕、枕状层)、地震触发成因的液化变形(液化滴状体、液化均一层、液化底辟)及塑性变形(液化卷曲变形、软布丁)等,这些沉积物变形是龙门山地区晚三叠世构造运动的响应,它们是印支期松潘-甘孜地体与扬子板块断开、碰撞、逆冲走滑伴生的地震事件的记录。

总体说来,四川盆地上三叠统的事件沉积研究目前仍处于起步阶段,尚需解决以下几个关键问题:①不同事件沉积模式及特征差异性;②不同事件沉积的平面分布及纵向演化规律;③印支期与软沉积变形同期的硬岩层脆性变形,如粒序断层、地裂缝、古裂隙等研究;④事件沉积与周围板块活动之间的关系等。

2.5 “源-汇”系统

一直以来,学者们通过砂岩骨架颗粒成分、岩屑成分、轻重矿物组合、砾岩组分及分布、古流向分析、碎屑锆山 U-Pb 年代学分析等手段对四川盆地上三叠统“源-汇”系统开展了沉积盆地演化、充填及沉积物搬运过程研究,取得了丰硕成果^[3-11]。

关于四川盆地上三叠统的物源区分布,目前认为存在秦岭古陆、大巴山古陆、松潘-甘孜褶皱带(古龙门山)、康滇古陆和江南(雪峰)古陆 5 大物源区^[49, 58-59]。秦岭古陆和大巴山古陆为古陆物源,物源组分较复杂,以变质岩为主,以岩浆岩、沉积岩为辅;松潘-甘孜褶皱带(古龙门山)为大洋环境下的再旋回造山带沉积,物源组分以沉积岩和浅变质岩为主,偶见岩浆岩^[59];康滇古陆为古陆物源,物源以变质岩(变质程度高)和沉积岩为主;江南(雪峰)古陆为古陆物源,物源组分以浅变质岩和沉积岩为主。

5 大物源区不同沉积时期的影响范围和程度存在差异。马鞍塘组和小塘子组发育时期,主要物源来自秦岭古陆^[60],由于地形相对较缓,川西北部由北向南形成大型曲流河三角洲砂体(图 3a)。小塘子组发育时期,康滇古陆和龙门山古岛链也提供少量物源^[1, 3, 58],川西南部和川西中部形成由西北向东南方向展布的曲流河三角洲砂体(图 3b),其中川西中部龙门山前缘地区以再旋回造山带物源为主^[61],物源方向来自松潘-甘孜褶皱带^[62-63]。须家河组须二段和须三段沉积时期,川西北部物源主要来自于松潘-甘孜褶皱带,少量来自于扬子板块西缘^[59],龙门山北段前缘形成大型由北向南展布的冲积扇-扇三角洲-辫状河三角洲砂体(图 3c, d),岩石类型以浅变质岩和沉积岩为主,属于再旋回造山带物源^[64]。川西南部以古陆物源为主^[61],其主要来自于康滇古陆,少量来自于龙门山岛链^[64],在龙门山南段前缘形成大型由西向东展布的辫状河三角洲砂体。该地区岩石类型以酸性岩浆岩为主,既有大陆板块类型物源,又有再旋回造山带物源,但以大陆板块类型物源为主^[3]。川东及川中北部物源受大巴山古陆控制,以辫状河三角洲砂体为体,砂体规模相对较小,岩石类型以变质岩和沉积岩为主;川东南部及蜀南地区物源受江南(雪峰)古陆控制^[65],发育大型浅水型三角洲砂体,岩石组分以酸性岩和低变质岩为主,高级变质岩和沉积岩含量较少,属于大陆板块性质物源^[3]。该时期龙门山北段已经隆升,亦构成一个重要物源区^[1, 23, 49, 61, 66]。整体上,须二段—须三段沉积时期,物源主要来自于盆地北部,其他方向物源影

响范围相对较小。须四段和须六段发育时期,川西北段仍以再旋回造山带物源为主,扇三角洲—辫状河三角洲砂体发育,其物源区主要来自于松潘—甘孜褶皱带(古龙门山)^[67]。川西南部受康滇古陆物源和松潘—甘孜褶皱带(古龙门山)物源的共同影响^[23],岩石组分表现为大陆板块物源减少、再旋回造山带物源增加。该时期大巴山古陆物源及江南古陆物源影响范围增大,由于地形较缓,大型浅水三角洲发育,影响并控制着川东和川中大部分地区的沉积^[66]。

四川盆地须家河组物源区的分布、物源性质及物源方向等是该时期华南板块和华北板块相互作用的结果。晚三叠世,扬子板块向松潘—甘孜方向挤压,形成古龙门山褶皱带,从而影响了盆内不同地区物源的方向、性质及规模,对应形成不同类型和不同规模的沉积体系。受不同物源控制,盆地不同位置的三角洲类型差异,其中,盆地西部和西北部主要发育冲积扇和扇三角洲沉积体系,而盆地南部和东南部则发育辫状河三角洲沉积体系。

2.6 致密储层特征及形成机理

四川盆地上三叠统致密砂岩储层岩石学特征表现为低成分成熟度、低胶结物含量和结构成熟度中等的“两低一中”特征,总体储层物性较差,属低孔低渗和特低孔特低渗储层,局部发育有少量中孔低渗储层。成分成熟度一般在0.32~2.45,最高可达6.14。胶结物含量一般为5%~6%,最高可达15%。储层分选性较好至中等,颗粒支撑,磨圆度为次圆。具有整体物性偏低、喉道狭窄且连通性差的特点。其平均孔隙度为4.77%,最小孔隙度0.10%,最大18.27%;平均渗透率为 $0.19 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小渗透率低于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大可达 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[68]。储集空间以粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔为主,孔径介于0.001~100 μm ,主要介于0.01~10 μm ^[69]。

上三叠统须家河组储层质量存在着时空差异性。须二段川中—蜀南地区物性相对较好,孔隙度为8%~10%的样品所占比例大,川西北部地区和川西南地区物性较差,孔隙度为4%~8%,川西南地区储层整体较致密,物性较差。须二段川中地区物性最好,一般都大于7%,蜀南地区次之,一般在6%~10%,川西南地区物性相对较差,在4%~8%。须家河组须六段川中的潼南、安岳地区物性最好,孔隙度大于10%,川西南地区物性较差,一般在4%~6%^[70]。川西北部地区,相对优质储层主要分布于扇三角洲前缘水下分支河道沉积,储层埋藏深度大,整体致密;川中地区相对优质储

层主要分布于辫状河三角洲前缘水下分支河道,储层埋藏深度相对较小,物性相对较好。

上三叠统须家河组致密砂岩储层经历了多种成岩作用,主要包括机械压实和压溶作用、胶结作用、自生石英、自生方解石、自生白云石、自生绿泥石等自生矿物析出作用、溶蚀作用和裂缝化作用等一系列成岩反应^[71]。成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间发生复杂的物质交换,从而控制次生孔隙的形成^[72]。川西地区和川中地区成岩演化序列呈现明显差异。川西地区成岩演化序列表现为压实作用—第Ⅰ期裂缝—第Ⅰ期伊利石胶结—第Ⅰ期方解石胶结—第Ⅱ期石英加大、硅质充填—长石、岩屑溶蚀—绿泥石胶结或者伊利石胶结—第Ⅱ期方解石胶结—长石溶蚀作用—第Ⅱ期破裂作用—第Ⅲ期石英加大、硅质充填—第Ⅲ期碳酸盐胶结—碳酸盐交代长石和石英—第Ⅲ期构造破裂—晚期方解石和石英胶结成岩^[73]。川中地区成岩演化序列表现为早期方解石(泥晶菱铁矿)—石英Ⅰ期加大—绿泥石薄膜—长石、岩屑溶解—绿泥石孔隙衬边—石英Ⅱ期加大(加大、剩余粒间孔、粒间溶孔充填石英)—溶蚀作用—石英Ⅲ期加大(粒间溶孔、粒内溶孔中充填石英)—连晶(含铁方解石)—白云石—铁(方解石)白云石——后期溶蚀作用—石英、方解石脉形成^[68]。总体上,压实作用造成川西和川中地区砂岩原生孔隙度大幅度减小,石英Ⅱ期和Ⅲ期次生加大进一步减小原生孔隙,封闭的地下流体环境是储层保持致密化的又一原因^[68]。

川中地区上三叠统须家河组甜点储层的形成受沉积微相、溶蚀作用、绿泥石衬边和裂缝控制^[70]。不仅在宏观上控制了储层成因类型、沉积厚度、规模及时空展布特征,同时也在微观上控制了沉积物原始组分、粒度、成熟度、分选、磨圆、杂基含量等特征。须家河组三角洲砂体发育,川中地区物源主要受江南古陆控制,三角洲前缘水下分流河道和河口砂坝储层物性最好,其平均孔隙度一般在8%以上,平均渗透率为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。溶蚀作用是改善须家河组砂岩物性最重要的建设性成岩作用^[74],主要表现为长石、岩屑等碎屑和填隙物(杂基、胶结物和原生矿物)的溶蚀,埋深约2 500 m。铸体薄片统计发现,溶蚀作用提供的孔隙度平均为2%,最高可达5%,溶蚀孔隙占总孔隙的比例可达40%以上。早期形成的绿泥石可以抑制自生石英的生长,使原生粒间孔得以保存。同时,衬边的绿泥石可以分隔孔隙水与石英颗粒的表面来阻止自生石英胶结物在碎屑石英的表面成核,进而抑制自生石英的生长^[75]。构造作用形成的裂缝和微裂缝既可以增加储集空间和提高渗

透率,也是孔隙水运移的重要通道,同时促使溶蚀作用加快进行。上三叠统须家河组由于三角洲前缘水下分流河道和河口砂坝砂体分布面积较小,溶蚀作用和绿泥石衬边发育有限,裂缝分布主要受构造控制,从而造成储层总体表现为“厚砂薄储”特征。川西地区相对优质储层主要发育于扇三角洲前缘水下分支河道沉积,其形成主要与有利沉积环境、原生孔隙保存条件、溶蚀作用、孔隙保存的渗透性屏障以及烃类注入对孔隙的保护等有关^[71]。

川中上三叠统须家河组储层总体表现为“厚砂薄储”特征,须家河组气藏具有大面积含气、流注程度低、局部富集高产及气水关系复杂等特点,呈现“源储交互叠置、孔缝网状输导、近源高效聚集”以及大面积“连续型”成藏机制,致密砂岩气的运移充注动力主要来源于源岩的生烃超压,运移方式主要为低速非达西渗流和扩散作用,聚集方式主要表现为“动力圈闭”,成藏具有以小压差驱动、相对大孔隙空间储集的特点^[69]。

3 热点分析和展望

3.1 加强浅水三角洲研究,阐明大面积富砂机制

三角洲研究历史悠久,其因蕴藏巨大的油气储量和产量而一直成为油气勘探开发的热点^[76-78]。三角洲的类型、外部形态和内部构型对油气勘探和开发具有重要影响,制约着勘探开发部署思路,影响着油气采收率^[79-80]。三角洲的形成受多种因素的控制,包括河流作用、蓄水体密度与河水密度的差异、蓄水体的水动力作用、河口区海底地形、蓄水体的构造特征和湖平面(海平面)变化等^[81]。前人基于不同控制因素对三角洲进行了系统的类型划分,不同类型三角洲外部形态和内部构型存在差异^[6,82-83]。

近年来,浅水三角洲引起了国内外学者的关注,并成为学术界研究的热点^[84-85]。中国的浅水三角洲研究始于20世纪80年代^[86],20世纪90年代,学术界主要关注浅水三角洲的砂体形态及控制因素^[87-88],认为其前缘主要砂体形态可分为坨状、枝状、过渡状及席状,其形成受湖平面升降变化、古气候、古地形和河流作用等控制。21世纪以来,浅水三角洲的研究集中于形成动力学、有利形成地质背景、形成机制及沉积模式等^[89-91],通常认为其形成于构造相对稳定、地形平缓、盆地整体缓慢沉降、水体较浅、古气候适宜、湖平面频繁多变、物源充足的环境。浅水三角洲主要发育平原和前缘亚相,以分流河道砂体为骨架砂,河口坝沉积不太发育,单层砂体薄而广布,复合

砂体厚度大、面积广^[90]。

四川盆地上三叠统砂体大面积分布,砂体成因类型一直是学术界争议的焦点。一些学者认为,四川盆地上三叠统大面积砂体为浅水三角洲成因^[92-93],发育少物源供给浅水三角洲沉积模式和多物源供给浅水辫状河三角洲沉积模式,可划分出上三角洲平原、下三角洲平原、三角洲前缘及前三角洲4种亚相。邹才能等(2015)认为四川盆地上三叠统砂体成因于潮湿气候背景下的敞流型湖盆浅水三角洲,由于洪水期和枯水期交替,造成湖盆中心牵引流河道砂体发育^[94]。

关于四川盆地上三叠统浅水三角洲的研究,应该进一步关注下列问题:①不同构造带不同层位浅水三角洲的沉积微相组成与内部构型;②不同构造带不同层位浅水三角洲的形成背景与制约条件;③不同构造带不同层位浅水三角洲的形成过程与富砂机理;④不同构造带不同层位浅水三角洲的平面展布与时空演化规律。这几个方面问题的解决,不仅能极大推动四川盆地上三叠统的勘探开发工作,也对丰富前陆盆地三角洲沉积学理论、探讨不同类型盆地三角洲的特征及形成机理具有重要意义。

3.2 开展细粒沉积机理及储层“甜点”预测研究

3.2.1 富有机质页岩发育模式

四川盆地上三叠统马鞍塘组、小塘子组下部、须三段、须五段和须六段中部细粒沉积大面积发育。细粒沉积记录了沉积时期的大量地质信息,是恢复晚三叠世四川盆地古构造、古气候和古水体性质的关键^[95]。另外,细粒沉积中蕴藏大量页岩气,是下一步勘探开发的潜在目标^[10]。

近年来,细粒沉积的研究方法、研究技术手段、岩石学特征及分类方案、沉积动力学及沉积机理等方面研究均取得重要进展。研究方法不仅有传统的露头解剖、岩心描述、分析化验,而且还包括计算机数值模拟和水槽实验模拟等。研究技术手段包括薄片鉴定、粒径分析、高压压汞、粒子计数器、覆压孔渗、微米CT、纳米CT、核磁共振、X衍射全岩分析、X衍射荧光分析、FE-SEM、FIB-SEM、原子力显微镜、感应磁强计、X射线成像和SEM-CL等。细粒沉积存在外源和内源两类组分。外源组分主要来自母岩(土壤)的物理和化学风化,少量来自火山灰和陆源有机质;内源组分来自上覆水体,包括水体或沉积物/水界面附近生活生物的碎片、透光带水体产生的有机碳等^[96]。细粒沉积可以呈单颗粒、絮凝颗粒、泥岩内碎屑、岩屑、有机-矿物集合体(“海洋雪”)及浮游动物粪球粒等形式搬运,搬

运动存在风力、低密度流、重力流和底流等多种搬运动力^[14],并最终垂直沉降和侧向加积方式发生堆积。细粒沉积可发育水平层理、交错层理、韵律层理、年纹层、块状层理等沉积构造^[97]。海相细粒沉积存在海侵、门槛和洋流上涌3种沉积模式^[98],富有机质页岩的形成受高初级生产力、有利于有机质保存、聚积和转化的沉积条件等控制^[99]。

四川盆地上三叠统未来应系统开展细粒沉积物颜色、成分、结构、构造、有机碳含量和化石等标志研究,建立细粒沉积岩相分类方案,明确不同类型细粒沉积岩平面及纵向分布规律,并建立细粒沉积微相模式。在此基础上,根据晚三叠世四川盆地古构造背景,系统分析细粒沉积形成的古水体氧化—还原条件、古气候、古盐度和古水动力,弄清细粒沉积过程和成因机理,建立湖盆细粒沉积富有机质页岩发育模式,以指导非常规天然气勘探开发。

3.2.2 细粒沉积“甜点”储层预测研究

中国页岩气按其形成环境,可划分为海相、海陆过渡相和陆相3种类型^[100]。近年来,海相和陆相页岩气勘探开发取得了重大突破,比如四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组2019年页岩气产量达到 $153.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。

中国海相页岩主要矿物成分有石英、粘土矿物、碳酸盐矿物,次要矿物成分为长石和黄铁矿。页岩发育水平层理、韵律层理和块状层理、递变层理以及交错层理等。根据纹层结构,细粒沉积水平层理可细分为条带状粉砂型、递变型、砂泥递变型和砂泥互层型4种类型^[97];根据矿物组分和有机质含量,页岩可划分为硅质页岩、钙质页岩、粘土质页岩、混合页岩等^[101];根据TOC含量,页岩可划分为富有机质页岩、含有机质页岩、贫有机质页岩等。页岩中纳米孔隙发育,以有机孔、无机孔和微裂缝孔隙为主,有机孔所占比例超过50%。页岩发育顺层缝和非顺层缝。顺层缝多为层面滑移缝、页理缝和构造雁列缝,非顺层缝主要为剪切缝和拉张缝^[102]。四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组龙一¹⁽¹⁾小层具有高TOC含量、高脆性矿物含量、高孔隙度、高水平渗透率等特征,为页岩气“甜点段”,川南威远地区、长宁地区、焦石坝地区、昭通地区、泸州地区均有广泛分布。

四川盆地上三叠统小塘子组、须三段和须五段细粒沉积发育。目前,要加强小塘子组、须三段和须五段页岩的岩相类型及其时空分布、沉积模式、储层孔隙类型和成因以及甜点区分布预测研究。应选取典型露头剖面或关键取心井,开展精细的层序划分和对比,建立

页岩地层划分对比格架。进而通过全剖面连续切样和大薄片制样,明确页岩细粒沉积岩相类型及其时空分布,阐明细粒沉积形成机制,明确纹层和微裂缝类型、特征(孔缝网系统)及纵向展布规律,预测有利岩相类型及时空分布。通过系统的XRD全岩和粘土分析、TOC含量、含气性、岩石力学性质等分析,明确页岩“六性”特征及其匹配关系;通过FIB-SEM及CO₂和N₂联合吸附、高压压汞、SEM等多种方法技术研究,确定页岩孔隙类型及孔隙结构。在此基础上,通过成岩模拟及薄片分析,确定细粒沉积成岩作用类型和成岩演化序列。最后,综合页岩矿物组分、纹层、孔隙及微裂缝等研究成果,建立四川盆地上三叠统黑色页岩沉积发育模式,明确页岩储层“甜点”特征及分布规律。

3.3 通过沉积过程模拟,揭示不同粒级沉积物形成过程和成因机制

目前,沉积过程模拟已成为沉积学研究的重要内容^[11],它配分自然界真实的沉积体系时空尺度,提取控制沉积体系发展的关键因素,建立实验模型与原型之间对应关系(地质概念模型),从而再现沉积过程和结果。沉积过程模拟不仅可以再现沉积物剥蚀、搬运及沉积作用过程,还可以预测不同沉积体系的展布特征、时空演化和砂体变迁。沉积过程模拟存在水槽实验模拟和计算机数值模拟两种方式。水槽实验模拟具有真实、准确、形象、直观的特点^[12];计算机数值模拟不受实验条件和人为干扰等因素的制约,但在开展模拟之前,必须清楚各个关键参数及其数学表征方法,并建立相应的几何模型。因此,将来的沉积过程研究应以前期水槽模拟为基础,明确各关键参数及其变化规律,进而达到数值模拟与前期物理模拟相互渗透、交互揭示多种粒级沉积形成机制。

四川盆地上三叠统须二段、须四段和须六段以粗碎屑沉积为主,三角洲砂体大面积分布,马鞍塘组、小塘子组下部、须三段、须五段以细粒沉积为主,泥页岩大面积分布。未来沉积过程研究应该关注下列科学问题:①不同层段物质粒度差异的成因机制;②不同构造位置三角洲砂体的成因类型、成因机制、时空分布及相互制约关系;③细粒沉积中发育大量沉积构造,不同沉积构造反映的沉积水动力条件和沉积成因机制。因此,有必要基于水槽实验模拟和计算机数值模拟,通过设定不同的构造活动强度、物源方位、地形坡度、构造沉降量、湖水水位变化、沙泥级配等模拟参数,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,开展沉积过程模拟^[103-104]。

4 结 论

1) 四川盆地上三叠统存在有3种层序地层划分方案。第一种方案将上三叠统划分为3个构造层序、7个体系域(或沉积层序),第二种划分方案将上三叠统划分为2个超长期和6个长期基准面旋回层序,第三种划分方案将上三叠统划分为4个三级层序。结合构造演化特征,建立了前陆盆地对称型和基本对称型结构的层序地层样式。

2) 四川盆地上三叠统马鞍塘组发育礁滩相、潟湖相、潮坪相和三角洲相,川中和川南地区小塘子组发育障壁砂坝-潟湖相,须三段和须五段主要发育河流、扇三角洲、辫状河三角洲、缓坡型曲流河三角洲和湖泊沉积体系,须二段、须四段和须六段主要存在水进三角洲、滩坝、湖泊-三角洲和近海潮汐沉积。另外,上三叠统不同层段中夹有风暴沉积和震积沉积。

3) 构造学、古生物学、岩石学、有机地球化学等证据表明,四川盆地上三叠统马鞍塘组—须三段为海相沉积,须四段—须六段为陆相沉积,但仍受到海侵作用的影响。

4) 四川盆地上三叠统存在秦岭古陆、大巴山古陆、松潘-甘孜褶皱带(古龙门山)、康滇古陆和江南(雪峰)古陆5大物源区,不同物源区的物源性质、影响范围和程度存在时空差异。物源区的形成和分布受周缘板块构造活动控制,不同物源区砂岩储层的矿物组成、物性、孔隙类型及孔隙结构、砂体类型、致密储层成藏作用过程及沉积成岩演化序列存在差异。

5) 四川盆地上三叠统浅水三角洲沉积、细粒沉积学及沉积机理、沉积过程模拟、细粒沉积储层形成机制研究不仅是沉积储层研究热点领域,也是未来主要发展方向。

参 考 文 献

- [1] 郭正吾,邓康龄,韩永辉,等.四川盆地形成与演化[M].北京:地质出版社,1996.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. Formation and evolution of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- [2] 李伟,邹才能,杨金利,等.四川盆地上三叠统须家河组气藏类型与富集高产主控因素[M].沉积学报,2010,28(5):1037-1045.
Li Wei, Zou Caineng, Yang Jinli, et al. Types and controlling factors of accumulation and high productivity in the Upper Triassic Xujiahe Formation gas reservoirs, Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 1037-1045.
- [3] 施振生,杨威,谢增业,等.四川盆地晚三叠世碎屑组分对源区分析及印支运动的指示[J].地质学报,2010,84(3):387-397.
Shi Zhensheng, Yang Wei, Xie Zengye, et al. Upper Triassic clastic composition in Sichuan Basin, southwest China: Implication for provenance analysis and the Indosinian orogeny [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(3): 387-397.
- [4] 戴朝成,郑荣才,朱如凯,等.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 Zhaocheng, 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.
- [5] 施振生,邱振,董大忠,等.古构造、古气候和古基准面对三角洲前缘砂体类型的控制—以四川盆地上三叠统为例[J].地质科学,2017,52(1):270-284.
Shi Zhensheng, Qiu Zhen, Dong Dazhong, et al. Controls of paleotectonics, paleoclimate and base level fluctuation on the type and structure of delta front: A case study of the Upper Triassic in the Sichuan Basin, China [J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(1): 270-284.
- [6] 邹才能,赵文智,张兴阳,等.大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J].地质学报,2008,82(6):813-825.
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 813-825.
- [7] 赵文智,卞从胜,徐春春,等.四川盆地须家河组须一、三和五段天然气源内成藏潜力与有利区评价[J].石油勘探与开发,2011,38(4):385-393.
Zhao Wenzhi, Bian Congsheng, Xu Chunchun, et al. Assessment on gas accumulation potential and favorable plays within the Xu-1, 3, and 5 Members of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(4): 385-393.
- [8] 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.
- [9] 黄金亮,董大忠,李建忠,等.陆相页岩储层特征及其影响因素:以四川盆地上三叠统须家河组页岩为例[J].地质前缘,2016,23(2):158-166.
Huang Jinliang, Dong Dazhong, Li Jianzhong, et al. Reservoir characteristics and its influence on continental shale: An example from Triassic Xujiahe Formation shale, Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 158-166.
- [10] 陈洪德,侯明才,陈安清,等.中国古地理学研究进展与关键科学问题[J].沉积学报,2017,35(5):888-901.
Chen Hongde, Hou Mingcai, Chen Anqing, et al. Advances and the Major Scientific Issues of the Paleogeography in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 888-901.
- [11] 朱筱敏,谈明轩,董艳蕾,等.当今沉积学研究热点讨论—第20届国际沉积学大会评述[J].沉积学报,2019,37(1):1-16.
Zhu Xiaomin, Tan Mingxuan, Dong Yanlei, et al. Current hot topics of sedimentology: Comment on the 20th international sedimentologi-

- cal congress [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(1): 1–16.
- [12] 朱筱敏, 董艳蕾, 刘成林, 等. 中国含油气盆地沉积研究主要科学问题与发展分析 [J]. *地质前缘*, 2021, 28(1): 1–11.
Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Liu Chenglin, et al. Major challenges and development in Chinese sedimentological research on petroliferous basins. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(1): 1–11.
- [13] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望 [J]. *沉积学报*, 2020, 38(1): 1–29.
Qiu Zhen, Zou Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: Connotation and prospect [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(1): 1–29.
- [14] Schieber J. Mud re-distribution in epicontinental basins-Exploring likely processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 119–133.
- [15] 邹才能, 杨智, 孙莎莎, 等. “进源找油”: 论四川盆地页岩油气 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(7): 903–920.
Zou Caineng, Yang Zhi, Sun Shasha, et al. “Exploration petroleum inside source kitchen”: Shale oil and gas in Sichuan Basin [J]. *Science China Earth Science*, 2020, 63: 934–953.
- [16] 邓康龄, 何鲤, 秦大有, 等. 四川盆地西部晚三叠世早期地层及其沉积环境 [J]. *石油与天然气地质*, 1982, 3(3): 204–210.
[Deng Kangling, He Li, Qin Dayou, et al. The earlier Late Triassic sequence and its sedimentary environment in western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1982, 3(3): 204–210.]
- [17] Li Y, Allen P A, Densmore A L. Geological evolution of the Longmen Shan foreland basin (western Sichuan, China) during the Late Triassic Indosinian Orogeny [J]. *Basin Research*, 2003, 15: 117–136.
- [18] 刘树根, 杨荣军, 吴熙纯, 等. 四川盆地西部晚三叠世海相碳酸盐岩~碎屑岩的转换过程 [J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 556–565.
Liu Shugen, Yang Rongjun, Wu Xichun, et al. The Late Triassic transition from marine carbonate rock to clastics in the western Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 556–565.
- [19] 梅冥相. 中上扬子印支运动的地层学效应及晚三叠世沉积盆地格局 [J]. *地质前缘*, 2010, 17(4): 99–111.
Mei Mingxiang. Stratigraphic impact of the Indo-China Movement and its related evolution of sedimentary-basin pattern of the late Triassic in the middle-upper Yangtze Region, south China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 99–111.
- [20] 吴熙纯. 川西北晚三叠世卡尼期硅质海绵礁—鲕滩组合的沉积相分析 [J]. *古地理学报*, 2009, 11(2): 125–142.
Wu Xichun. Sedimentary facies analysis of the Late Triassic Carnian siliceous sponge reef-oolite bank complex in northwestern Sichuan province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(2): 125–142.
- [21] 金惠, 施振生, 杨威, 等. 川中地区上三叠统小塘子组障壁砂坝及其成因分析 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 19–28.
Jin Hui, Shi Zhensheng, Yang Wei, et al. Barrier island and its genesis analysis of Xiaotangzi Formation of Upper Triassic in central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 19–28.
- [22] 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.
- [23] 林良彪, 陈洪德, 侯明才. 须家河组砂岩组分特征与龙门山推覆体的形成演化 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(4): 28–30.
Lin Liangbiao, Chen Hongde, Hou Mingcai. Characteristics of sandstone composition of Xujiahe Formation and evolution of Longmenshan thrust nappe. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(4): 28–30.
- [24] 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, Li Guohui, 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.
- [25] 王昌勇, 郑荣才, 李爽, 等. 四川盆地东部上三叠统须家河组地层划分与对比—以卧新双地区为例 [J]. *地层学杂志*, 2017, 41(1): 94–102.
Wang Changyong, Zheng Rongcai, Li Shuang, et al. Stratigraphic subdivision and correlation of the Early Triassic Xujiahe Formation, east Sichuan Basin: A case study of the Woxinshuang area [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2017, 41(1): 94–102.
- [26] 王金琪. 龙门山印支运动主幕辨析—再论安县构造运动 [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 re-view on the Anxian tectonic movement [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2003, 23(2): 65–69.
- [27] 施振生, 杨威. 四川盆地上三叠统砂体大面积分布的成因 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(6): 1058–1069.
Shi Zhensheng, Yang Wei. Genesis of widespread sandbodies of Upper Triassic in Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(6): 477–486.
- [28] 孟昊, 钟大康, 李卓沛, 等. 川西拗陷中段上三叠统须家河组须五段层序格架与沉积相 [J]. *地层学杂志*, 2016, 40(3): 278–289.
Meng Hao, Zhong Dakang, Li Zhuopei, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary facies of the fifth member of Upper Triassic Xujiahe Formation of the middle part of the west Sichuan depression, south China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2016, 40(3): 278–289.
- [29] 金鑫, 姬国锋, 时志强, 等. 川西北上三叠统卡尼阶马鞍塘组中部硅质海绵礁 [J]. *古生物学报*, 2015, 54(3): 396–403.
Jin Xin, Ji Guofeng, Shi Zhiqiang, et al. Siliceous sponge reefs of the Ma’antang Formation (Upper Triassic) in northwestern Sichuan [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2015, 54(3): 396–403.
- [30] 施振生, 王志宏, 郝翠果, 等. 四川盆地上三叠统马鞍塘组沉积相 [J]. *古地理学报*, 2015, 17(6): 771–786.
Shi Zhensheng, Wang Zhihong, Hao Cuiguo, et al. Sedimentary facies of the Upper Triassic Ma’antang Formation in Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(6): 771–786.
- [31] 施振生, 杨威, 金惠, 等. 川中—川南地区上三叠统沉积相研究 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 211–220.
Shi Zhensheng, Yang Wei, Jin Hui, et al. Study on sedimentary facies of the Upper Triassic in central and south Sichuan province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 211–220.
- [32] 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 [J]. *天然气工业*, 2011, 31(9): 16–24.
Zheng Rongcai, Dai Zhaocheng, Luo Qinglin, et al. Sedimentary sys-

- tem of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan foreland basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(9): 16–24.
- [33] 罗启后. 对四川盆地上三叠统沉积相的一些认识和思考[J]. *天然气工业*, 2011, 31(9): 12–15.
- Luo Qihou. Understanding of the Upper Triassic sedimentary facies in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(9): 12–15.
- [34] 罗启后. 再论水进型三角洲—兼论四川盆地须家河组巨厚砂层成因[J]. *沉积学报*, 2015, 33(5): 845–854.
- Luo Qihou. Further discussion on water-transgression delta: Genesis of great thickness large distributed sandstone of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 845–854.
- [35] 侯方浩, 蒋裕强, 方少仙, 等. 四川盆地上三叠统香溪组二段和四段砂岩沉积模式[J]. *石油学报*, 2005, 26(2): 30–37.
- Hou Fanghao, Jiang Yuqiang, Fang Shaoxian, et al. Sedimentary model of sandstone in second and fourth members of Xiangxi Formation in the Upper Triassic of Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 26(2): 30–37.
- [36] 蒋裕强, 陶艳忠, 沈妍斐, 等. 对大川中地区上三叠统须家河组二、四、六段砂岩沉积相的再认识[J]. *天然气工业*, 2011, 31(9): 39–50.
- Jiang Yuqiang, Tao Yanzhong, Shen Yanfei, et al. A new understanding of sedimentary facies of sandstones in the 2nd, 4th, and 6th members of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Large-scale middle Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(9): 39–50.
- [37] 赵霞飞, 胡东风, 张闻林, 等. 四川盆地元坝地区上三叠统须家河组的潮控河口湾与潮控三角洲沉积[J]. *地质学报*, 2013, 87(11): 1748–1762.
- Zhao Xiafei, Hu Dongfeng, Zhang Wenlin, et al. Tide-dominated estuarine and deltaic deposition of the Upper-Triassic Xujiahe Formation in the Yuanba area, Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(11): 1748–1762.
- [38] 赵霞飞, 刘树根, 彭靖淞, 等. 川西龙门山前上三叠统小塘子组沉积环境、构造含意与含气远景[J]. *地质学报*, 2018, 92(3): 604–617.
- Zhao Xiafei, Liu Shugen, Peng Jingsong, et al. Sedimentary environment, tectonic implication and exploration perspective of the Upper Triassic Xiaotangzi Formation in front of Longmenshan in western Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(3): 29–38.
- [39] 赵霞飞, 赵拓宇, 张闻林. 潮汐韵律岩研究进展及对须家河组沉积相的启示[J]. *天然气勘探与开发*, 2019, 42(2): 29–38.
- Zhao Xiafei, Zhao Tuoyu, Zhang Wenlin. An introduction to the developments of tidal rhythmites studies and its implication to the natural gas exploration of Xujiahe Formation [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2019, 42(2): 29–38.
- [40] 陈洪德, 徐胜林, 林良彪, 等. 龙门山造山带晚三叠世构造隆升的分段性及层序充填响应[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 622–630.
- Chen Hongde, Xu Shenglin, Lin Liangbiao, et al. Segmental uplift of Longmenshan orogen and sequence filling characteristic of western Sichuan foreland-like basin, Late Triassic [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 622–630.
- [41] 郑荣才, 李国晖, 戴朝成, 等. 四川类前陆盆地盆—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 analogues foreland basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(1): 170–180.
- [42] 李勇, 苏德辰, 董顺利, 等. 晚三叠世龙门山前陆盆地早期(卡尼期)碳酸盐缓坡和海绵礁的淹没过程与动力机制[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3460–3470.
- Li Yong, Su Dechen, Dong Shunli, et al. Dynamic of drowning of the carbonate ramp and sponge build-up in the early stage (Carnian) of Longmen Shan foreland basin, Late Triassic, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3460–3470.
- [43] 王金琪. 再论印支期龙门山的形成和发展[J]. *天然气工业*, 2012, 32(1): 12–21.
- Wang Jinqi. More discussion on the formation and development of the Longmen Shan Thrust-Nappe structure in the Indosinian Movement [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(1): 12–21.
- [44] 施振生, 谢武仁, 马石玉, 等. 四川盆地上三叠统须家河组四段—六段海侵沉积记录[J]. *古地理学报*, 2012, 14(5): 583–595.
- Shi Zhensheng, Xie Wuren, Ma Shiyu, et al. Transgression sedimentary records of the Members 4–6 of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(5): 583–595.
- [45] 张福存, 罗兴思, 万楹. 川西北、川中过渡带须家河组与白田坝地层微量元素分层对比小结[M]. 成都: 四川石油管理局地质综合研究大队, 1976, 1–187.
- Zhang Fucun, Luo Xingsi, Wang Ying. Summary of trace element correlation of the Xujiahe Formation and Baitianba Formation in transition area of northwestern and central Sichuan Basin [M]. Chengdu: Geological comprehensive research group of Sichuan Petroleum Administration Bureau, 1–187.
- [46] 张敏, 黄光辉, 李洪波, 等. 四川盆地上三叠统须家河组气源岩分子地球化学特征—海侵事件的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(1): 72–80.
- Zhang Ming, Huang Guanghui, Li Hongbo, et al. Molecular geochemical characteristics of gas source rocks from the Upper Triassic Xujiahe Formation indicate transgression events in the Sichuan Basin. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(1): 72–80.
- [47] 蔡杰, 张敏. 四川盆地上三叠统须家河组煤系气源岩芳烃地球化学特征[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(3): 325–330.
- Cai Jie, Zhang Min. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of coal-bearing gas source rocks from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(3): 325–330.
- [48] 贾东, 陈竹新, 贾承造, 等. 龙门山褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(3): 462–469.
- Jia Dong, Chen Zhuxin, Jia Chengzao, et al. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and development of the western Sichuan foreland basin, central China [J]. *Geological Journal of China University*, 2003, 9(3): 462–469.
- [49] 邓康龄. 龙门山构造带印支期构造递进变形与变形时序[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(4): 485–490.
- Deng Kangling. Indosinian progressive deformation and its chronogenesis in Longmenshan structural belt [J]. *Oil & Gas Geology*,

- 2007, 28(4): 485–490.
- [50] 四川盆地陆相中生代地层古生物编写组. 四川盆地陆相中生代地层古生物[M]. 成都: 四川人民出版社, 1982, 1–120.
Compilation Group of Stratigraphy and Paleontology of Continental Mesozoic Sichuan Basin. Stratigraphy and Paleontology of Continental Mesozoic Sichuan Basin [M]. Chengdu: Sichuan People Press, 1982, 1–120.
- [51] 张璐瑾. 川中晚三叠世孢粉[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 1–80.
Zhang Lujin. Late Triassic spores and pollen from central Sichuan [M]. Beijing: Science Press, 1984, 1–80.
- [52] 戴朝成, 任军平, 饶强, 等. 四川盆地川中地区须家河组古盐度特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2018, 24(3): 390–400.
Dai Chaocheng, Ren Junping, Rao Qiang, et al. Paleosalinity of the Xujiahe Formation in central Sichuan Basin and its geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 2018, 24(3): 390–400.
- [53] 李华启, 姜在兴, 邢焕清, 等. 四川盆地西部上三叠统须家河组二段风暴岩沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 81–86.
Li Huaqi, Jiang Zaixing, Xing Huanqing, et al. Characteristics of storm deposits in Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 81–86.
- [54] 陈辉, 田景春, 蒋裕强, 等. 川中地区须二、四段湖相风暴岩沉积特征及其意义[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 581–584.
Chen Hui, Tian Jingchun, Jiang Yuqiang, et al. Lacustrine tempestite sediment feature and significance in Second and Fourth Members of Xujiahe Formation, Upper Triassic in middle of Sichuan Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(5): 581–584.
- [55] 戴朝成, 郑荣才, 朱如凯, 等. 四川类前陆盆地须家河组震积岩的发现及其研究意义[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 172–180.
Dai Chaocheng, Zheng Rongcai, Zhu Rukai, et al. The discovery and significance of seismites from Xujiahe Formation in Sichuan analogous foreland basin. Advances in Earth Science, 2009, 24(2): 172–180.
- [56] 乔秀夫, 郭宪璞, 李海兵, 等. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动[J]. 地质学报, 2012, 86(1): 132–156.
Qiao Xiufu, Guo Xianpu, Li Haibing, et al. Soft-sediment deformation in the Late Triassic and the Indosinian tectonic movement in Longmenshan [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(1): 132–156.
- [57] 乔秀夫, 姜牧, 李海兵, 等. 龙门山中、新生界软沉积物变形及构造演化[J]. 地学前缘, 2016, 23(6): 80–106.
Qiao Xiufu, Jiang Mu, Li Haibing, et al. Soft-sediment deformation structures and their implications for tectonic evolution from Mesozoic to Cenozoic in the Longmen Shan [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(6): 80–106.
- [58] 李勇, 贺佩, 颜照坤, 等. 晚三叠世龙门山前陆盆地动力学分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 37(4): 401–411.
Li Yong, He Pei, Yan Zhaokun, et al. Dynamics of Late Triassic Longmenshan foreland basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(4): 401–411.
- [59] 陈斌, 李勇, 王伟明, 等. 晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组物源及构造背景分析[J]. 地质学报, 2016, 90(5): 857–872.
Chen Bin, Li Yong, Wang Weiming, et al. The Provenance and tectonic setting of Late Triassic Xujiahe Formation in the Longmenshan foreland basin, SW China [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(5): 857–872.
- [60] 陈扬, 刘树根, 李智武, 等. 川西前陆盆地晚三叠世早期物源与龙门山的有限隆升—碎屑锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 315–323.
Chen Yang, Liu Shugen, Li Zhiwu, et al. LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb geochronology approaches to the sediment provenance of the western Sichuan foreland basin and limited uplift of the Longmen Mountains during the early stage of Late Triassic [J]. Geotectonica Metallogenia, 2011, 35(2): 315–323.
- [61] 林良彪, 陈洪德, 翟常博, 等. 四川盆地西部须家河组砂岩组分及其古地理探讨[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 511–517.
Lin Liangbiao, Chen Hongde, Zhai Changbo, et al. Sandstone compositions and paleogeographic evolution of the Upper Triassic Xujiahe formation in the western Sichuan Basin, China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(6): 511–517.
- [62] Luo Liang, Qi Jiafu, Zhang Mingzheng, et al. Detrital zircon U-Pb ages of Late Triassic-Late Jurassic deposits in the western and northern Sichuan Basin margin: constraints on the foreland basin provenance and tectonic implications [J]. International Journal of Earth Sciences, 2014, 103(6): 1553–1568.
- [63] Zhang Yong, Jia Dong, Shen Li, et al. Provenance of detrital zircons in the Late Triassic Sichuan foreland basin: constraints on the evolution of the Qinling Orogen and Longmen Shan thrust-fold belt in central China [J]. International Geology Review, 2015, 57(14): 1806–1824.
- [64] 刘焕, 彭军, 李丽娟, 等. 川西坳陷中段上三叠统须家河组砂岩特征及物源分析[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1271–1279.
Liu Huan, Peng Jun, Li Lijuan, et al. Characteristics and provenance analysis of the Upper Tertiary Xujiahe Formation sandstone in the middle part of west Sichuan Basin [J]. Geology in China, 2012, 39(5): 1271–1279.
- [65] 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 & Development, 2006, 29(4): 1–13.
- [66] 施振生, 王秀芹, 吴长江. 四川盆地上三叠统须家河组重矿物特征及物源区意义[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(4): 618–627.
Shi Zhensheng, Wang Xiuqin, Wu Changjiang. The heavy minerals and provenances of the Upper Triassic Xujiahe formation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(4): 618–627.
- [67] 邓飞, 贾东, 罗良, 等. 晚三叠世松潘甘孜和川西前陆盆地的物源对比: 构造演化和古地理变迁的线索[J]. 地质论评, 2008, 54(4): 561–573.
Deng Fei, Jia Dong, Luo Liang, et al. The contrast between provenances of Songpan-Ganze and western Sichuan foreland basin in the Late Triassic: Clues to the tectonics and palaeogeography [J]. Geological Review, 2008, 54(4): 561–573.
- [68] 朱如凯, 邹才能, 张鼎, 等. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理——以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, 39(3): 327–339.

- Zhu Rukai, Zou Caineng, Zhang Lai, et al. Diagenetic fluids evolution and genetic mechanism of tight sandstone gas reservoirs in Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin, China [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2009, 39(3): 327–339.
- [69] 谢增业, 杨春龙, 李剑, 等. 致密砂岩气藏充注模拟实验及气藏特征—以川中地区上三叠统须家河组砂岩气藏为例[J]. *天然气工业*, 2020, 40(11): 31–40.
- Xie Zengye, Yang Chunlong, Li Jian, et al. Charging simulation experiment and characteristics of tight sandstone gas reservoirs: A case study of the Upper Triassic Xujiahe Formation sandstone gas reservoir in the central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(11): 31–40.
- [70] 杜金虎, 徐春春, 魏国齐, 等. 四川盆地须家河组岩性大气区勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 94–123.
- Du Jinhu, Xu Chunlong, Wei Guoqi, et al. Large lithologic gas provinces exploration of Xujiahe Formation in Sichuan Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 94–123.
- [71] 吕正祥, 刘四兵. 川西须家河组超致密砂岩成岩作用与相对优质储层形成机制[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2373–2383.
- Ly Zhengxiang and Liu Sibing. Ultra-tight sandstone diagenesis and mechanism for the formation of relatively high-quality reservoir of Xujiahe Group in western Sichuan [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2373–2383.
- [72] 黄思静, 黄可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. *地球化学*, 2009, 38(5): 498–506.
- Huang Sijing, Huang Ke, Feng Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis—A case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, western Sichuan Depression [J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 498–506.
- [73] 施振生, 李熙喆, 董大忠, 等. 致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化: 以川西南上三叠统为例[J]. *地质前缘*, 2018, 25(2): 179–190.
- Shi Zhensheng, Li Xizhe, Dong Dazhong, et al. Diagenesis and pore evolution of tight sandstone reservoir: A case study from the Upper Triassic reservoir of the southwest Sichuan Basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 179–190.
- [74] 杨威, 魏国齐, 李跃纲, 等. 川西地区须家河组二段成岩作用及其对储层发育的影响[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 188–192.
- Yang Wei, Wei Guoqi, Li Yuegang, et al. Diagenesis of second Member reservoir of Xujiahe Formation and its influence on the reservoir development, western Sichuan [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(2): 188–192.
- [75] 谢武仁, 杨威, 赵杏媛, 等. 川中地区须家河组绿泥石对储集层物性的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 674–679.
- Xie Wuren, Yang Wei, Zhao Xingyuan, et al. Influences of chlorite on reservoir physical properties of the Xujiahe Formation in the central part of Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 674–679.
- [76] 李勇, 陈世加, 略俊刚, 等. 近源间互式煤系致密砂岩气成藏主控因素—以川中地区须家河组天然气为例[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(6): 798–808.
- Li Yong, Chen Shijia, Lu Jungang, et al. Main controlling factors of near-source and interbedded-accumulation tight sandstone gas from coal-bearing strata: A case study from natural gas of Xujiahe Formation, central Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(6): 798–808.
- [77] 李剑, 魏国齐, 谢增业, 等. 中国致密砂岩大气田成藏机理与主控因素—以鄂尔多斯盆地和四川盆地为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(增刊): 14–28.
- Li Jian, Wei Guoqi, Xie Zengye, et al. Accumulation mechanism and main controlling factors of large tight sandstone gas fields in China: Cases study on Ordos Basin and Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 34(S1): 14–28.
- [78] 张新涛, 周心怀, 李建平, 等. 敞流沉积环境中“浅水三角洲前缘砂体体系”研究[J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 260–269.
- Zhang Xintao, Zhou Xinhui, Li Jianping, et al. Unconfined flow deposits in front sandbodies of shallow water deltaic distributary systems [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 260–269.
- [79] 赵翰卿, 付志国, 吕晓光, 等. 大型河流—三角洲沉积储层精细描述方法[J]. *石油学报*, 2000, 21(4): 109–113.
- Zhao Hanqing, Fu Zhiguo, Lv Xiaoguang, et al. Methods for detailed description of large fluvial-delta depositional reservoir [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 21(4): 109–113.
- [80] 于兴河, 李胜利, 李顺利. 三角洲沉积的结构—成因分类与编图方法[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 782–797.
- Yu Xinghe, Li Shengli, Li Shunli. Texture-genetic classifications and mapping methods for deltaic deposits [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 782–797.
- [81] Stanley D J, Warne A G. Worldwide initiation of Holocene marine deltas by deceleration of sea-level rise [J]. *Science*, 1994, 265(5169): 228–231.
- [82] Nemec W and Steel R J. What is a fan-delta and how do we recognize it? [M]// Nemec W, Steel R J. *Fan deltas: sedimentology and tectonic settings*. Blackie: Glasgow, 1988, 3–13.
- [83] 薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. *地质学报*, 1991, 65(2): 141–153.
- Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(2): 141–153.
- [84] Keumsuk L, Mcmechan G A, Ganim R, et al. 3-D architecture and sequence stratigraphic evolution of a forced regressive top-truncated mixed-influenced delta, Cretaceous Wall Creek sandstone, Wyoming, USA [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(4): 284–302.
- [85] 朱世发, 崔航, 陈嘉豪, 等. 浅水三角洲沉积体系与储层岩石学特征—以鄂尔多斯盆地西部地区山1—盒8段为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 1–15.
- Zhu Shifa, Cui Hang, Chen Jiahao, et al. Sedimentary system and sandstone reservoir petrology of a shallow water delta: Case study of the Shan-1 and He-8 members in the western Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 1–15.
- [86] 孙永传, 李蕙生, 邓新华, 等. 山西寿阳—阳泉地区石炭—二叠系沉积环境及其沉积特征[J]. *地球科学—武汉地质学院学报*, 1986, 11(3): 273–280.

- Sun Yongchuan, Li Huisheng, Deng Xinhua, et al. Carboniferous-Permian sedimentary environments and their sedimentary characteristics in Shouyang-Yangquan area, Shanxi province [J]. *Earth Science-Journal of Wuhan College of Geology*, 1986, 11(3): 273 - 280.
- [87] 楼章华, 兰翔, 卢庆梅, 等. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用: 以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例[J]. *地质学报*, 1999, 73(1): 83 - 92.
- Lou Zhanghua, Lan Xiang, et al. Controls of the topography, climate and lake level fluctuation on the depositional environment of a shallow-water delta-A case study of the Cretaceous Putaohua reservoir in the northern part of Songliao Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(1): 83 - 92.
- [88] 吕晓光, 李长山, 蔡希源, 等. 松辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征及前缘相储层结构模型[J]. *沉积学报*, 1999, 17(4): 572 - 577.
- Lu Xiaoguang, Li Changshan, Cai Xiyuan, et al. Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao shallow lacustrine delta [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(4): 572 - 577.
- [89] 韩晓东, 楼章华, 姚炎明, 等. 松辽盆地湖泊浅水三角洲沉积动力学研究[J]. *矿物学报*, 2000, 20(3): 305 - 313.
- Han Xiaodong, Lou Zhanghua, Yao Yanming, et al. Analysis of the sedimentary dynamic process of the shallow-water lake delta in the Songliao Basin, northeast China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2000, 20(3): 305 - 313.
- [90] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. *地质前缘*, 2013, 20(2): 19 - 28.
- Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 19 - 28.
- [91] 吴胜和, 徐振华, 刘钊. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. *古地理学报*, 2019, 21(2): 202 - 215.
- Wu Shenghe, Xu Zhenhua, Liu Zhao. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(2): 202 - 215.
- [92] 刘柳红, 朱如凯, 罗平, 等. 川中地区须五段—须六段浅水三角洲沉积特征与模式[J]. *现代地质*, 2009, 23(4): 667 - 675.
- Liu Liuhong, Zhu Rukai, Luo Ping, et al. Characteristics and depositional model for the shallow-water deltas of the 5th-6th interval, Xujiahe Formation, Upper Triassic in central Sichuan Basin, China [J]. *Geoscience*, 2009, 23(4): 667 - 675.
- [93] 金民东, 刘小洪, 张金武, 等. 重庆北碚河西洞上三叠统须家河组一段上部剖面沉积相分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(2): 37 - 43.
- Jin Mindong, Liu Xiaohong, Zhang Jinwu, et al. Sedimentary facies in the first member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Hexidong, Beibei, Chongqing [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(2): 37 - 43.
- [94] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. *地质学报*, 2015, 89(6): 979 - 1007.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(6): 979 - 1007.
- [95] Aplin A C, Macquaker J H S. Mudstone diversity: Origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(12): 2031 - 2059.
- [96] Macquaker J H S, Adams A E. Maximizing information from fine-grained sedimentary rocks: An inclusive nomenclature for mudstones [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(5): 735 - 744.
- [97] 施振生, 邱振. 海相细粒沉积层理类型及其油气勘探开发意义[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 1 - 15.
- Shi Zhensheng, Qiu Zhen. Main bedding types of marine fine-grained sediments and their significance for oil and gas exploration and development [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 1 - 15.
- [98] Arthur M A, Sageman B B. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits [J]. *Annu. Rev. Earth Planet Science*, 1994, 22: 499 - 551.
- [99] Arthur M A, Dean W E. Organic-matter production and preservation and evolution of anoxia in the Holocene Black Sea [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(4): 395 - 411.
- [100] 董大忠, 邹才能, 杨桦, 等. 中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J]. *石油学报*, 2012, 33(S1): 107 - 114.
- Dong Dazhong, Zou Caineng, Yang Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2012, 33(S1): 107 - 114.
- [101] 王超, 张柏桥, 陆永潮, 等. 焦石坝地区五峰组—龙马溪组一段页岩岩相展布特征及主控因素[J]. *石油学报*, 2018, 39(6): 631 - 644.
- Wang Chao, Zhang Baiqiao, Lu Yongchao, et al. Lithofacies distribution characteristics and main development controlling factors of shale in Wufeng Formation—Member 1 of Longmaxi Formation in Jiaoshi-ba area [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2018, 39(6): 631 - 644.
- [102] 董大忠, 施振生, 孙莎莎, 等. 黑色页岩微裂缝发育控制因素—以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 763 - 774.
- Dong Dazhong, Shi Zhensheng, Sun Shasha, et al. Factors controlling microfractures in black shale: A case study of Ordovician Wufeng Formation—Silurian Longmaxi Formation in Shuanghe profile, Changning area, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 763 - 774.
- [103] 马晋文, 刘忠保, 尹太举, 等. 须家河组沉积模拟实验及大面积砂体成因机理分析[J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 101 - 110.
- Ma Jinwen, Liu Zhongbao, Yin Taiju, et al. Sedimentary simulation of Xujiahe Formation and depositional mechanism of large area sandstone [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 101 - 110.
- [104] 张文伟. 细粒沉积岩储层微观特征研究方法及应用[J]. *石油地质与工程*, 2019, 33(4): 11 - 15.
- Zhang Wenwei. Microcosmic characteristics of fine-grained sedimentary reservoirs and its application [J]. *Petroleum Geology & Engineering*, 2019, 33(4): 11 - 15.