

川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲砂体分布特征与叠置模式

刘君龙¹, 孙冬胜¹, 纪友亮², 朱宏权³, 于海跃², 王天云⁴

[1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石化西南油气分公司, 四川成都 610081; 4. 中国石油东方地球物理公司新兴物探开发处, 河北涿州 072751]

摘要:基于高精度层序地层学理论,综合利用地震、测录井、岩心和分析化验等地质资料,阐明了发育在湖平面频繁变化背景下浅水三角洲的沉积特征,总结了砂体垂向叠置关系和平面分布规律,最后建立了浅水三角洲砂体叠置模式。研究表明:①分支河道和河口坝-滩坝叠覆体是蓬莱镇组浅水三角洲的主要成因砂体类型,平面上,分支河道呈树枝状,顺着物源方向展布,河口坝-滩坝叠覆体呈条带状,平行于岸线分布,纵向上,不同成因类型砂体相互叠置形成多种“复合砂体”类型。②从上游到下游,由于地形逐渐平缓,河流能量逐渐减弱,浅水三角洲分支河道的宽度和深度逐渐减小;低频的湖平面升降控制着浅水三角洲的进积和退积,高频的湖平面升降控制着浅水三角洲不同成因类型砂体的分布规律与叠置样式。③建立了川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲沉积演化和4种砂体叠置模式,分别为低可容空间河道叠置、坝上河、高可容空间河道叠置和河口坝叠置。

关键词:浅水三角洲;沉积模式;砂体分布规律;侏罗纪;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Distribution characteristics and superimposition pattern of the Late Jurassic shallow water deltaic sand body in the foreland basin of Western Sichuan Depression

Liu Junlong¹, Sun Dongsheng¹, Ji Youliang², Zhu Hongquan³, Yu Haiyue², Wang Tianyun⁴

[1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Southwest Oil and Gas Branch Company of SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610081, China; 4. Xinxing Geophysical Prospecting Department, Bureau of Geophysical Prospecting INC., CNPC, Zhuozhou, Hebei 072751, China]

Abstract: This study analyzed the sedimentary characteristics of shallow water deltaic sand bodies grown with frequent changes of lake level, summarized their vertical superimposition relationship and areal distribution, and finally established their superimposition pattern, based on the theory of high resolution sequence stratigraphy, combined with a dataset consisting of seismic, logging, core and experiment data. Through analysis, we found that: ① distributary channels (CHs) and mouth bar-beach bar complexes are the main sand body types of the shallow water deltas in the Penglaizhen Formation. In the plan view, the distributary channels are mainly branch-shaped, distributing along the source direction, and MBCs are strip-shaped, parallel to the bank line; while vertically, sand bodies of different genetic types are superimposed into various types of composite sand bodies. ② As relief reduces gradually from the tectonically active margin to the basin, the stream energy decreases linearly with the gradient descent of the river system. Accordingly, the width and depth of the distributary channels of the shallow water delta decrease downwards. The low frequency lake level fluctuation controls the progradation and retrogradation of shallow water delta, whereas the change of high frequency lake levels determines the distribution and superimposition patterns of sand bodies of different genetic types. ③ The sedimentation evolution model of the Late Jurassic shallow water deltas in the foreland basin of Western Sichuan Depression was established,

收稿日期:2017-11-13;修订日期:2018-08-20。

第一作者简介:刘君龙(1988—),男,博士后,沉积学、石油地质学。E-mail:jl_liu2007@sina.cn。

通讯作者简介:纪友亮(1962—),男,教授,石油地质学、沉积学和层序地层学。E-mail:ji_youliang@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05002-006);国家自然科学基金项目(41672098)。

and four types of superimposition patterns for sand bodies there were classified, including superimposed low-accommodation channels, rivers over bar, superimposed high-accommodation channels and superimposed mouth bars.

Key words: shallow water delta, depositional model, distribution pattern of sand body, Jurassic, Sichuan Basin

四川盆地一直是我国天然气勘探的重点目标,而川西陆相致密砂岩储层是其中研究热点之一。川西坳陷陆相蓬莱镇组碎屑岩气藏具有分布广泛、叠覆成藏、满坳含气的特点,经多轮油气资源评价,证实其勘探潜力巨大^[1]。近几年,在叠覆型致密砂岩气区成藏理论的指导下,突破了常规构造找气的理念,加大了对凹陷内部隐蔽岩性气藏的开采力度,先后在广汉、什邡和金堂等地区取得了重大突破^[1-2]。

浅水三角洲的研究已有数十年的历史,并于20世纪80年代开始逐渐被我国学者关注^[3-4]。经多年油气勘探实践证实^[5-9],在我国大型坳陷湖盆,如松辽盆地、鄂尔多斯盆地等,和断陷湖盆,如渤海湾盆地、苏北盆地等均发现了浅水三角洲沉积,并蕴藏着十分广阔的资源勘探潜力。近几年,国内外学者基于现代沉积和古代地层实例^[5-14],讨论了浅水三角洲发育背景,阐明了其沉积特征和分布规律,并建立了不同类型盆地背景下的浅水三角洲沉积模式。但是,对浅水三角洲发育的控制因素分析尚不全面,如随着岸线的不断变化,由于湖浪淘洗、河流进积等因素的改造,浅水三角洲沉积与破坏的演化过程。因此,如何开展川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲的沉积特征、控制因素与砂体叠置模式研究,是一个十分有意义的科学问题。

关于研究区蓬莱镇组沉积体系展布特征,前人^[15-21]开展了大量研究,部分学者认为蓬莱镇组属于冲积扇-河流-正常三角洲-湖泊相沉积体系^[18-21],也有一部分学者认为其沉积相类型为浅水三角洲-湖泊相^[15-17]。然而,随着生产勘探的不断推进,人们对地下地质信息的认识不断深入,浅水三角洲理论逐渐被大家接受^[22-24],并且在研究区得到了很好的应用。

蓬莱镇组沉积期,川西坳陷是一个再生前陆盆地,地形平坦开阔、气候炎热干旱,发育了一套以浅水三角洲为主的沉积体系。此次研究,以川西坳陷中段蓬莱镇组为目的层,充分利用全区覆盖的三维连片地震数据、测录井及岩心资料,主要目的是研究浅水三角洲破坏后砂体成因类型、分布规律和主要控制因素,建立不同成因砂体叠置模式。本论文的研究不仅能够为川西坳陷陆相蓬莱镇组致密砂岩气藏的勘探提供理论依据和数据支撑,而且可以通过分析前陆盆地

浅水三角洲的主控因素,建立前陆盆地浅水三角洲沉积演化和砂体叠置模式,完善浅水三角洲理论在陆相湖盆中的应用。

1 研究区概况

川西坳陷位于龙门山与龙泉山所限定的四川盆地(中国西南部)西部,是晚三叠世以来形成的叠覆型盆地^[25-27]。研究区川西坳陷中段(图1a)西缘以龙门山冲断带为界,东缘以龙泉山隆起带为界,北至安县,南至成都一线,勘探面积约为 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

本文研究的目的层(图1b)为上侏罗统蓬莱镇组,自下而上分为蓬莱镇组一段(蓬一段, J_3p^1)—蓬四段(J_3p^4)。

川西坳陷在蓬莱镇组沉积期,受板块的差异挤压应力影响,周围山脉发生幕式抬升^[28-35],基于构造特征,可以将川西前陆盆地的构造演化划分为3个阶段(图1c,d),主要包括龙门山中段前陆盆地阶段、龙门山北段一米仓山前陆盆地阶段和龙门山中段前陆盆地阶段。

1) 龙门山中段前陆盆地阶段(蓬一段沉积期)

这一时期,构造应力主要集中在龙门山中段前缘^[28-32](图1d),山体发生强烈隆升,大量碎屑物质从龙门山中段搬运下来,向坳陷内部汇聚,是研究区的主要物源。蓬一段厚度为400~500 m,岩性以含砾砂岩、细-粗粒砂岩与棕褐色泥岩互层为主。

2) 龙门山北段一米仓山前陆盆地阶段(蓬二段沉积期)

受扬子板块差异性挤压的影响,构造作用发生迁移,前陆盆地的前缘坳陷发生转换,由龙门山中段转移到龙门山北段一米仓山前缘^[33-35](图1d)。与此同时,由于山体强烈隆升,长轴方向的物源开始出现,主要为研究区供源。蓬二段厚度为300~400 m,岩性以含细-粗粒砂岩与棕褐色泥岩互层为主。

3) 龙门山中段前陆盆地阶段(蓬三段和蓬四段沉积期)

在蓬三段沉积期,构造格局再次发生变换,区域挤压应力由龙门山北段一米仓山转移到龙门山中段前缘^[28-32](图1d)。短轴方向的物源再次承担重要角色,与长轴物源共同为研究区供源;在晚侏罗世晚

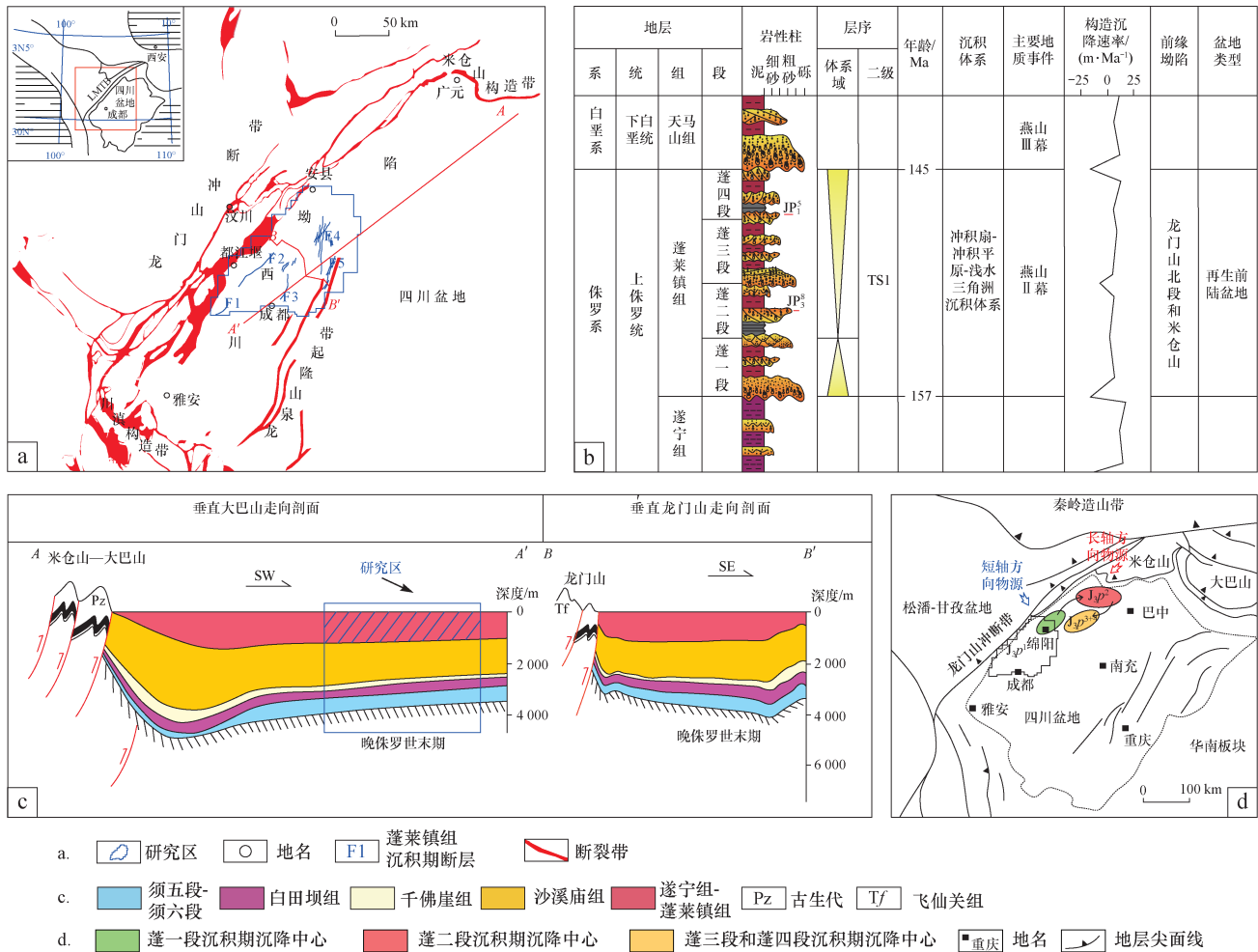


图 1 川西坳陷区域地质概况

Fig. 1 Geology of Western Sichuan Depression

a. 工区位置图; b. 地层综合柱状图, 据文献[22-23], 有改; c. 晚侏罗世末构造剖面, 位置见 a; d. 晚侏罗世沉降中心迁移, 据文献[28-35], 有改

期,与蓬三段沉积期相比,构造活动整体增强^[28-32](图 1d)。这一时期,来自短轴方向的物源大规模向前进积,与长轴方向物源一起,为研究区供源。蓬三段厚度为 200~300 m,蓬四段厚度为 150~250 m,岩性均以含细-粗粒砂岩与棕褐色泥岩互层为主。

2 数据与方法

为了完成对研究区蓬莱镇组浅水三角洲沉积特征与砂体叠置模式的研究,本文应用的基础数据主要包括三维连片地震数据体(约为 8 457 km²)、测录井(436 口)及岩心(21 口)资料等。基于对不同成因类型砂体的精确识别,综合应用多种地质资料,本文开展了川西晚侏罗世前陆盆地高频层序(准层序)内部浅水三角洲砂体分布规律研究。首先,利用复合砂体编图方法^[36],对研究区蓬莱镇组不同准层序进行沉积微相和砂体展布研究。然后,基于沉积砂体分布成果,总结规律。

复合砂体地质编图是在传统单因素沉积相图编制^[37-39]的基础之上,主要针对发育在水体较浅、地形平坦开阔背景下的陆相湖盆。具体编图步骤如下:①高精度层序地层划分与对比;②利用单因素法分别绘制三角洲分支河道(CH)和河口坝-滩坝叠覆体(MBC)平面分布图;③对三角洲 CH 和 MBC 平面分布图进行叠合。其中,MBC 的识别和确定一直是一个难点,特别在陆相浅水湖盆中。

3 结果

3.1 砂体成因分类

在浅水三角洲中,由于受波浪和河流进积的改造作用,发育不同成因类型的砂体^[40]。研究区内蓬莱镇组浅水三角洲中,共发育未改造型分支河道和改造型河口坝-滩坝叠覆体 2 种砂体类型,受不同水动力机制影响,其沉积特征表现出差异性。

1) 分支河道

分支河道砂^[41-44]是由于河流不断向前进积,对早期沉积物进行冲刷、侵蚀,后期碎屑物质对其进行充填而形成。根据分支河道发育位置,可以进一步分为水上分支河道砂体和水下分支河道砂体。在川西坳陷蓬莱镇组沉积期发育的浅水三角洲中,分支河道是其主要的骨架砂体,垂向上以单期—多期叠置出现,厚度为 5~15 m,其次为 15~25 m(图 2)。

在岩心相上(图 3a),分支河道可以发育多种类型的层理,如平行层理、交错层理和冲刷面等。垂向沉积序列为正韵律;一般地,在一期河道的底部,发育冲刷

面,如 SF3 井的 1 391.2 m 取心段,在冲刷面之上发育泥砾等,其中泥砾的颜色与其下覆泥岩层段的颜色有关;向上逐渐发育平行层理、交错层理和波状层理等,如 SF3 井 1 386.8~1 390.8 m 取心段,指示多期侧积坝体沉积。

在测井相上(图 3a),主要表现为厚层“箱形”/“齿化箱形”和“复合钟形”等多种类型。如在 SF3 井的蓬三段分支河道砂体中,岩心所钻遇的 2 套砂体厚度分别为 11.0 m(1 381.3~1 392.3 m 井段)和 19.4 m(1 519.0~1 538.4 m 井段),其中底部的砂岩较厚,可以划分 2~3 期分支河道,顶部的砂岩较薄,指示 1~2

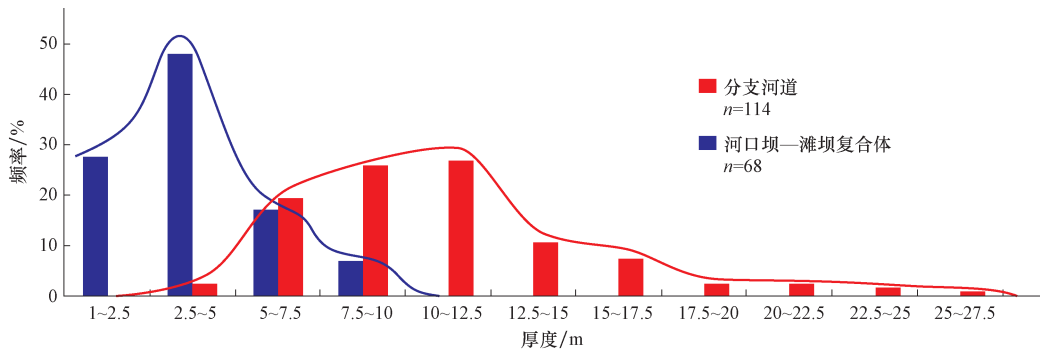


图 2 川西坳陷蓬莱镇组不同成因类型砂体厚度分布直方图

Fig. 2 Histogram of the thickness distribution for sand bodies of different genetic types in the Penglaizhen Formation, Western Sichuan Depression
n—参与统计的样点个数

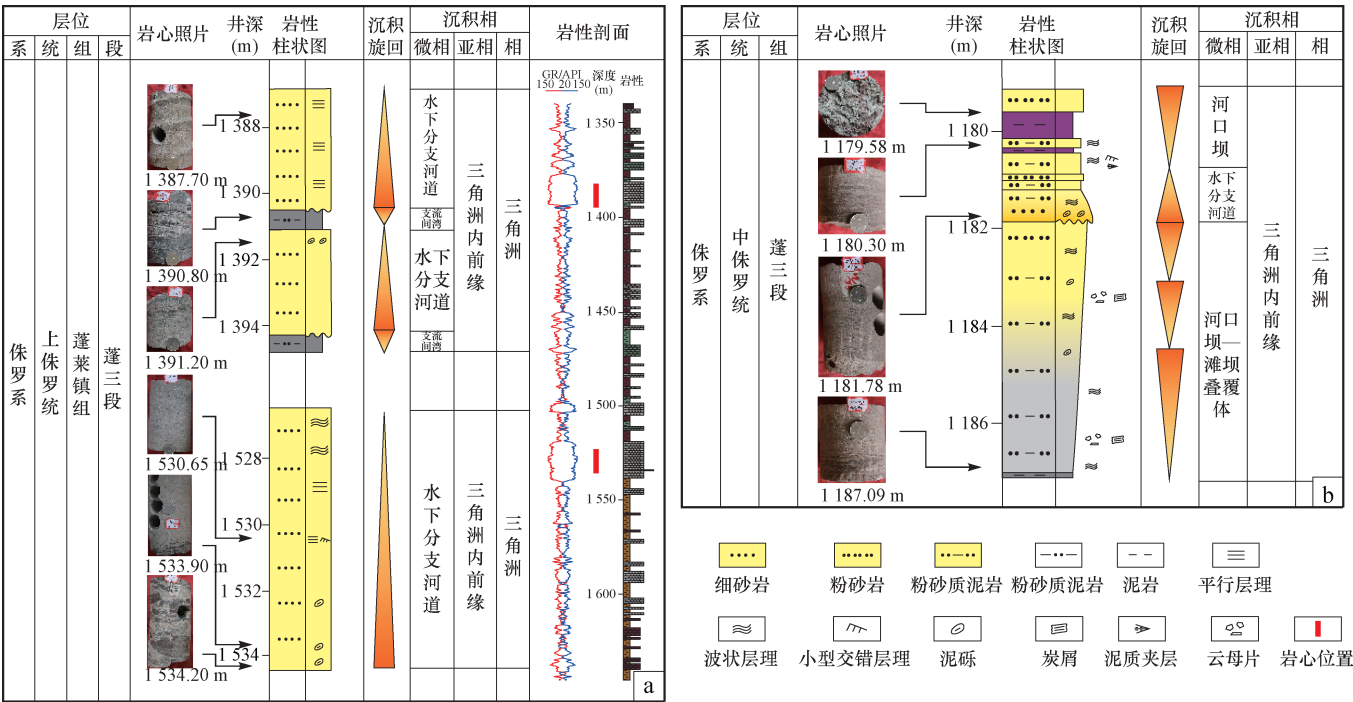


图 3 川西坳陷蓬莱镇组不同成因砂体岩心相分析

Fig. 3 Core facies analysis of sand bodies of different genetic types in the Penglaizhen Formation, Western Sichuan Depression
a. 分支河道砂体, SF 3 井; b. 河口坝—滩坝叠覆体, SF 19 井

期分支河道的垂向叠置。

2) 河口坝-滩坝叠覆体

一直以来,分支河道被认为是浅水三角洲的主要砂体类型^[41-42,45-47],本论文通过对研究区内蓬莱镇组浅水三角洲沉积体系的研究发现,在高频层序发育过程中,随着岸线的迁移,由于湖浪淘洗和河流进积作用的改造,浅水三角洲砂体发生沉积—破坏—再沉积的动态过程,发育了多期平行于岸线的坝体,本论文称为“河口坝-滩坝叠覆体”(MBC)。

鉴于 MBC 内部组成的复杂性,与分支河道相比,其识别难度更大,因此,如何精确识别 MBC 是本论文砂体研究的关键。

本文通过对 21 口取心井的岩心资料进行精细识别发现,MBC 与 CH 具有很大的差异性(图 3b)。首先,MBC 垂向沉积序列一般表现为典型的反旋回,无冲刷不整合侵蚀面。其次,MBC 的层理类型发育多样,但相比 CH 而言,其中多发育一些指示相对弱水动力环境下的层理,如 SF19 井的 1 180.30 m 取心段和 1 187.09 m 取心段发育的波状层理等。

另外,综合利用 436 口钻井的测井资料,对 MBC 进行测井相研究(图 4)发现,MBC 厚度一般较薄,约为 1~5 m,在测井相上主要表现为“低-高幅指形”、

“齿化漏斗形”和“漏斗形”等多种形态,其中以反旋回的“漏斗形”居多。因此,反旋回的韵律结构是识别研究区 MBC 的关键标志之一。

综上,与 CH 相比,研究区蓬莱镇组发育的 MBC 具有单层厚度薄、结构成熟度高和反旋回垂向序列等典型特征。根据这些特征,可以很好地对 MBC 进行识别,为后面砂体分布规律的研究打下基础。

3.2 分布特征

基于对不同成因类型砂体的精确识别,综合应用地震、测录井等多种地质资料,本文开展了川西晚侏罗世前陆盆地重点砂组浅水三角洲砂体分布规律研究。以分支河道较为发育的 $J_3p^{2(8)}$ 砂组和河口坝-滩坝叠覆体相对较为发育的 $J_3p^{4(5)}$ 砂组为例进行阐述(砂组位置见图 1b)。

1) $J_3p^{2(8)}$ 砂组

在平面上,蓬莱镇组浅水三角洲分支河道呈树枝状,由周缘山脉向坳陷中心进积,推进距离约为 50 km。本论文选取分支河道较为发育的 $J_3p^{2(8)}$ 砂组为例,通过砂地比图和 RMS 属性图等方法,精细刻画分支河道地质体(图 5)。结果显示:① $J_3p^{2(8)}$ 砂组以发育 CH 为主,其次为 MBC。② 在砂地比图上(图 5a),大量条带

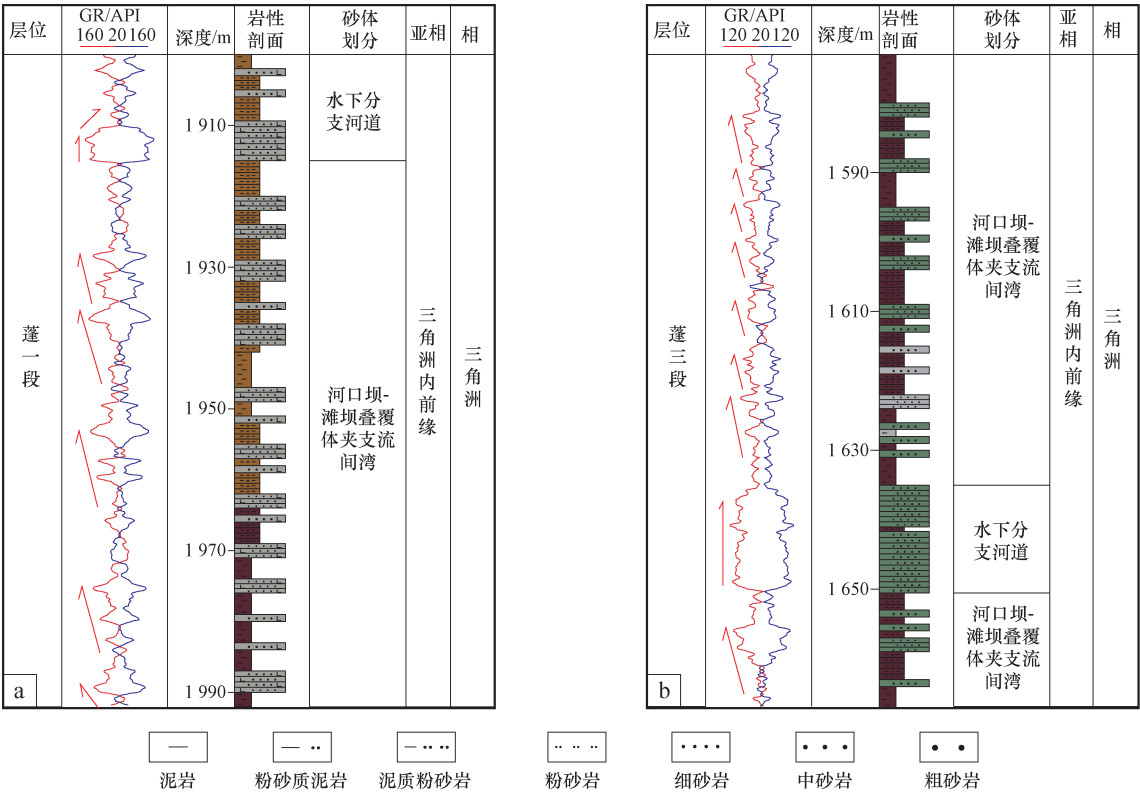


图 4 川西坳陷蓬莱镇组“河口坝-滩坝叠覆体”典型测井相分析

Fig. 4 Typical electrofacies analysis of “mouth bar-beach bar complex” in the Penglaizhen Formation, Western Sichuan Depression

a. DY 1 井; b. MJ 13 井

状厚层(约为15 m)砂体呈南北向展布,宽度为2~3 km(图5b),主要分布在彭州—德阳一带(图5b中B+C区)。

③ 通过测井曲线重构参数分析(图5c),在C区,分支河道数量百分比(N1)和分支河道累计厚度百分比(T1)明显高于其他地区,分别为35%和33%。

④ 在梓潼凹陷地区, $J_3p^{2(8)}$ 砂组的RMS属性图显示(图5d),发育多条南北向和东西向的振幅高值异常体,具河道形态,可以指示来自北方和东方的2个物源。

为了进一步刻画分支河道垂向上的展布形态与叠置关系,本论文选取了垂直龙门山走向,并与分支河道直交的AA'(图6)进行连井剖面沉积微相研究,重点对蓬二段(包括 $J_3p^{2(8)}$ 砂组)砂体精细解剖。研究结果表明:

① 蓬二段厚度具有东西薄、中间厚的特点,表明这一时期,彭州—德阳地区是主要的沉积中心和输砂通道。

② 剖面上共发育2种类型的主要砂体,分别为分支河道和河口坝—滩坝叠覆体,其中分支河道相对较为发育,并且自下而上,发育程度逐渐降低。

③ 由于

该剖面为垂直物源方向,分支河道的剖面形态多呈平底凸的透镜状,垂向厚度大,约为5~15 m,与河口坝—滩坝叠覆体相比,横向连通性差。

④ 在 $J_3p^{2(8)}$ 砂组沉积期,well 1、well 2 和 well 5 都钻遇了分支河道砂体,其测井相呈“齿化箱形”和“箱形”,单砂体较厚,平均厚度约为17 m。

另外,在 $J_3p^{2(8)}$ 砂组沉积期,本论文选取了钻遇分支河道砂体的 well 2 进行岩心相分析(图7)。在测井相上表现为“箱形”的厚层砂体,通过岩心相可以进一步划分多期更高级别的河道相互叠置,如在2 048.23~2 057.43 m取心段(下段),可以划分3期河道,在2 023.37~2 032.57 m(上段),可以划分4期河道。另外,厚层砂体内部发育典型的冲刷面、冲刷泥砾,还有各种类型的层理,如平行层理、波状层理和上攀层理等。

2) $J_3p^{4(5)}$ 砂组

通过对 $J_3p^{4(5)}$ 砂组沉积期(图8)浅水三角洲沉积微相和砂体分布研究发现:① 在这一时期,主要发育

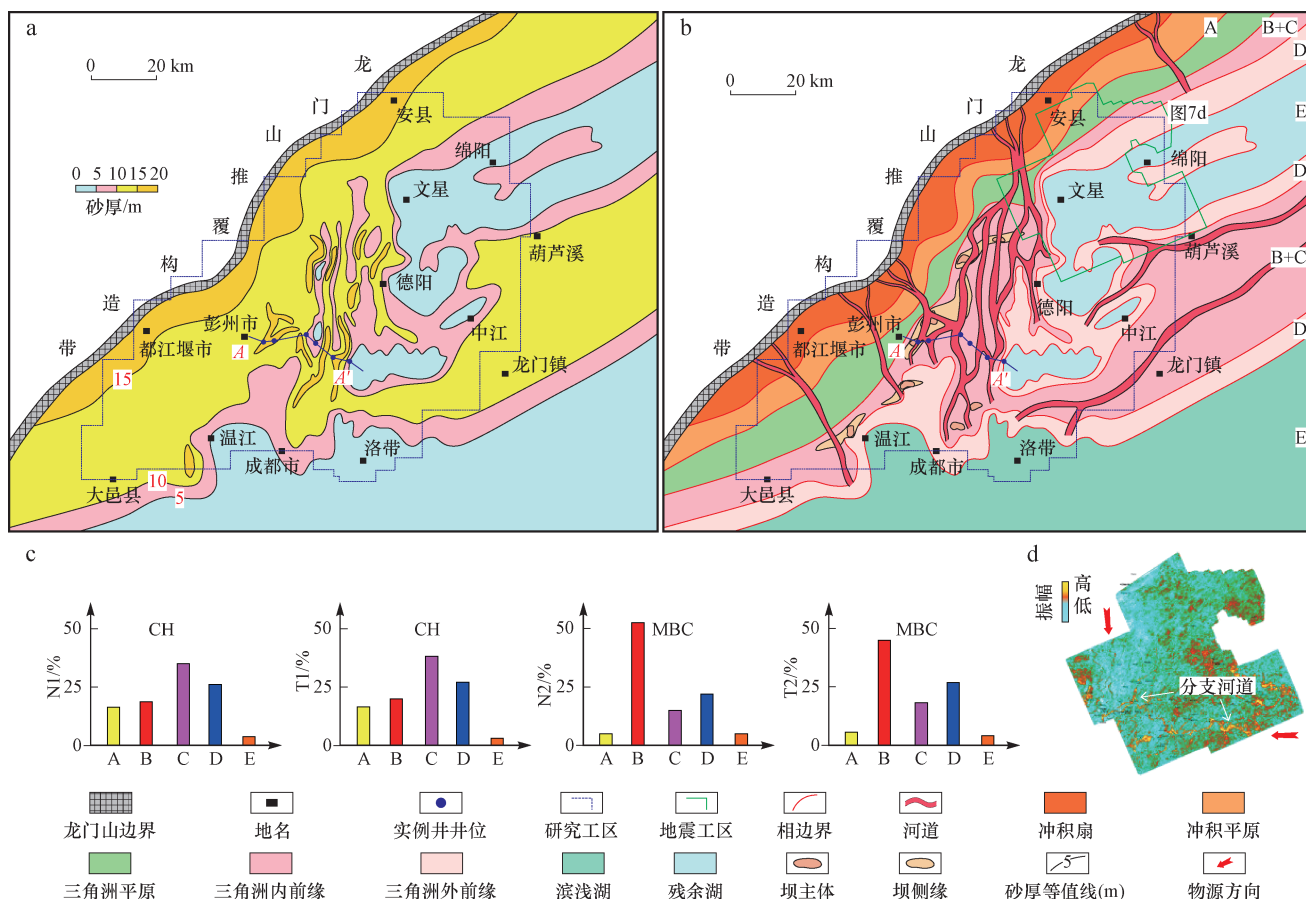


图5 川西坳陷中段蓬莱镇组 $J_3p^{2(8)}$ 砂组沉积相

Fig. 5 Sedimentary facies map of $J_3p^{2(8)}$ sandstone in the Penglaizhen Formation, central Western Sichuan Depression

a. 砂厚等值线; b. 沉积相; c. 测井相重构参数频率分布直方图, 其中A—E分别代表5个蓬莱镇组浅水三角洲沉积区;

d. 梓潼凹陷 $J_3p^{2(8)}$ 砂组RMS属性, 图中河道为优势主河道发育位置

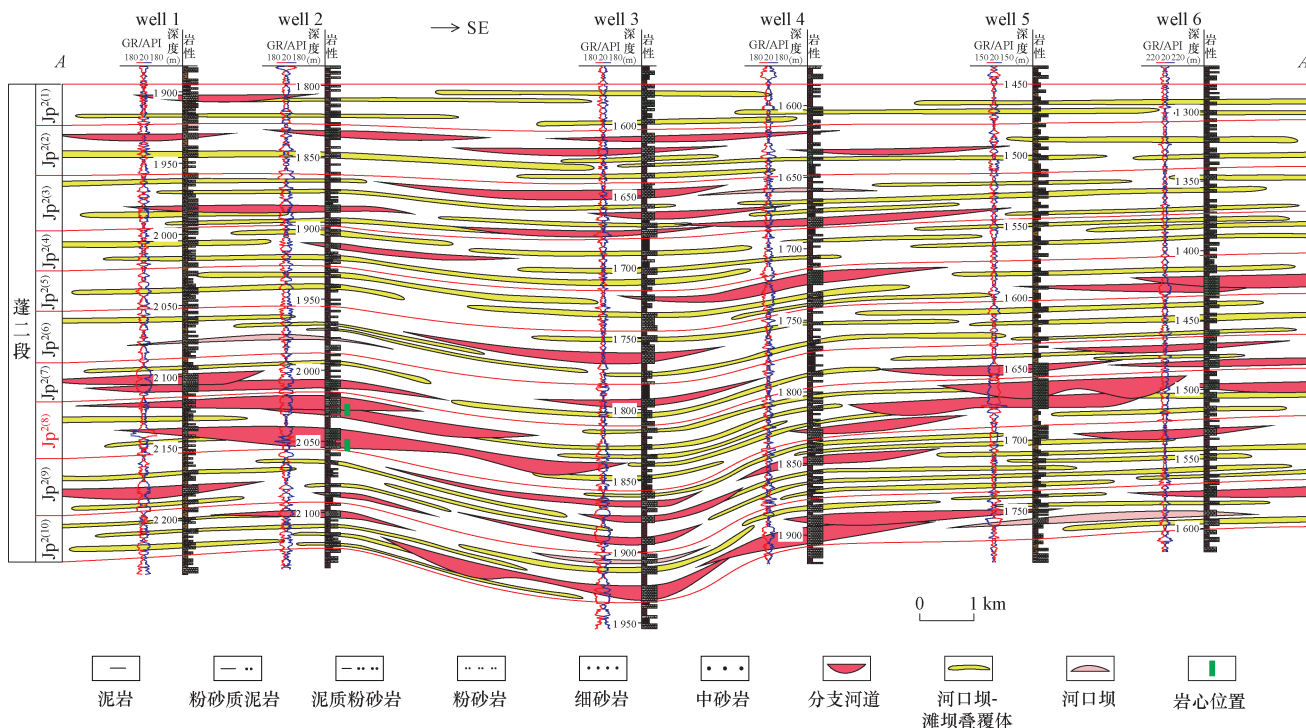


图6 川西坳陷蓬二段连井砂体精细对比剖面(剖面位置见图5)

Fig. 6 Fine cross-well correlation of sand bodies in the 2nd member of Penglaizhen Formation(J_3p^2), Western Sichuan Depression(see Fig. 5 for the section location)

CH 和 MBC 等 2 种砂体类型。② 平面砂地比图(图 8a)显示,厚层(10~15 m)砂体多呈 NE—SW 向展布,另外也存在一些相对较薄(约为 5 m)的砂体呈 NW—SE 向展布,主要分布在彭州—洛带一带(图 8b 中 B+C 区)。③ 通过测井曲线重构参数分析(图 8c),在 B 区和 D 区,河口坝—滩坝叠覆体数量百分比(N2)和河口坝—滩坝叠覆体累计厚度百分比(T2)明显高于其他 3 个地区,分别为 34%~42% 和 32%~45%。④ 利用全区三维连片地震数据,对 $J_3p^{4(5)}$ 砂组提取 RMS 属性图显示(图 8d),发育多条 NE—SW 向的振幅高值异常体,具河道形态,可以指示来自 NE 向的物源体系;另外,由于研究区地震垂向分辨率较低,约为 30 Hz,薄层 MBC 在 RMS 属性图上同样无法准确识别。

本论文选取了平行龙门山走向,并与河口坝—滩坝叠覆体直交的 AA'(图 9)进行连井剖面沉积微相研究,重点对蓬四段(包括 $J_3p^{4(5)}$ 砂组)砂体精细解剖。研究结果表明:① 剖面上主要发育 2 种类型的砂体,分别为分支河道和河口坝—滩坝叠覆体,其中河口坝—滩坝叠覆体较为发育,分支河道自下而上发育程度逐渐增加,指示一个湖平面缓慢下降的过程。② 由于该剖面为顺物源方向,分支河道的剖面形态以顶平底凸的长条透镜状为主,垂向厚度大,约为 5~15 m;

河口坝—滩坝叠覆体以条带状为主,厚度相对较薄,约为 1~4 m,横向连通性好。③ 在 $J_3p^{4(5)}$ 砂组沉积期,well 2 钻遇了河口坝—滩坝叠覆体,其测井相呈“低幅指形”,单砂体较薄,平均厚度约为 2.7 m。

另外,在 $J_3p^{4(5)}$ 砂组沉积期,本论文选取了钻遇分支河道和河口坝—滩坝叠覆体的 well 4 进行岩心相分析(图 10)。该段取心垂向上可以划分 2 个序列,底部以发育河口坝—滩坝叠覆体为主,顶部主要为分支河道砂体。底部取心段在岩性上为粉砂—细粒砂岩,具下细上粗的反韵律,是河口坝—滩坝叠覆体的典型识别特征。顶部分支河道砂体在测井相上表现为“箱形—钟形”,通过岩心相可以进一步划分 5 期更高级别的河道相互叠置。另外,分支河道砂体内部发育典型的冲刷面、冲刷泥砾,还有各种类型的层理,如平行层理、波状层理和槽状交错层理等,指示较强的水动力条件。

4 讨论

4.1 控制因素

4.1.1 河流能量

在研究区蓬莱镇组沉积期,河流能量对浅水三角

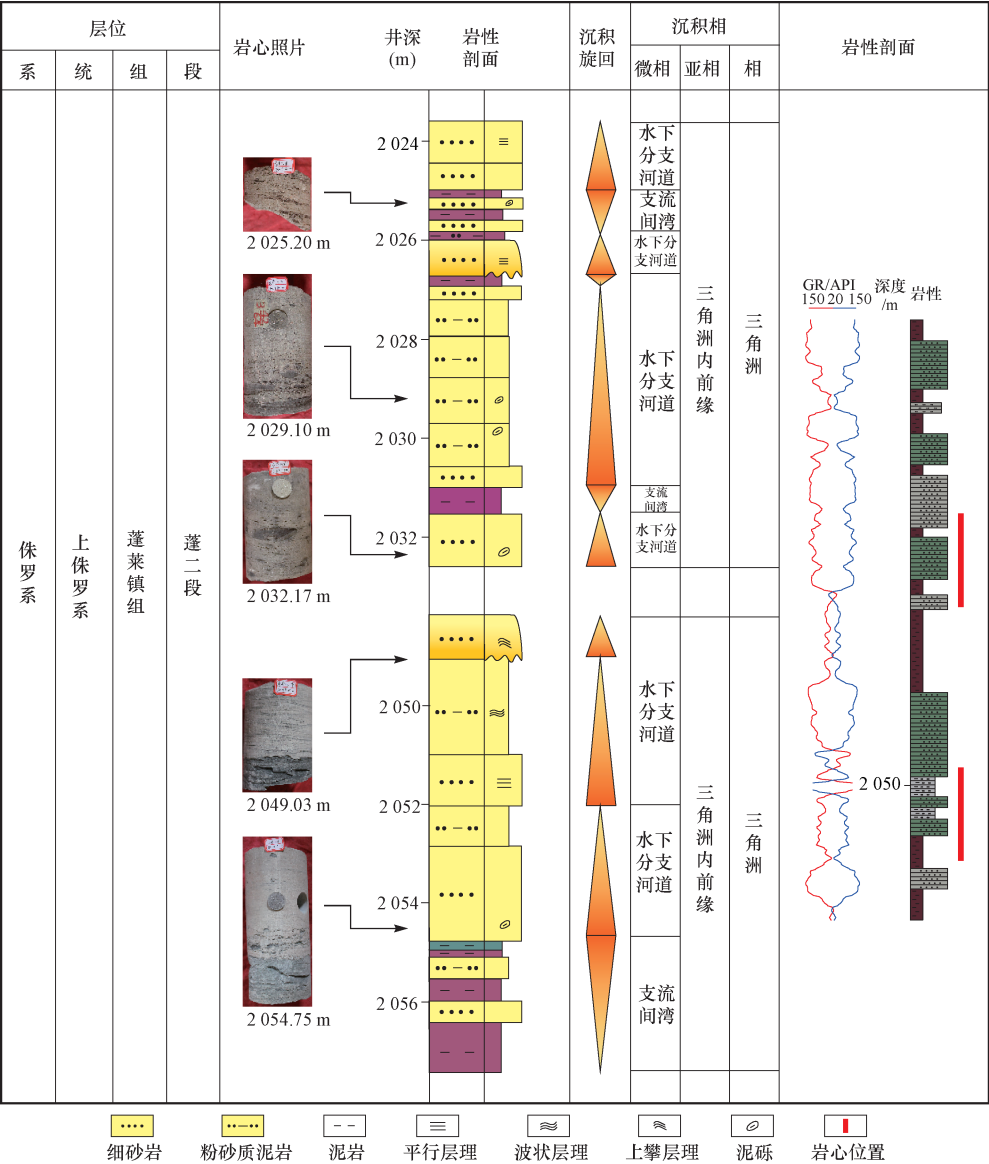


图 7 川西坳陷蓬莱镇组分支河道岩心相分析(岩心位置见图 6,well 2)

Fig. 7 Core facies analysis of distributary channels in Well 2 in the Penglaizhen Formation, Western Sichuan Depression
(see Fig. 6 for the core location of Well 2)

洲的发育既具有建设性,也具有破坏性,主要表现在以下 3 个方面。

1) 河流下蚀和侧蚀作用产生可容空间,控制着分支河道体系的形成。

不同成因机制的河流侵蚀作用,控制着分支河道的不同类型(图 5 和图 8),河流下蚀作用一般发生在浅水三角洲的上游部分(文星—绵阳及以北地区),其形成的河道以平直河为主,弯曲度较小;河流侧蚀作用一般发生在浅水三角洲的下游部分(文星—绵阳及以南地区),其形成的河道以曲流河为主,有一定的弯曲度。河流的侵蚀作用产生可容空间,为分支河道砂体的沉积提供了条件。

2) 河流能量决定了分支河道体系的发育密度和

几何形态。

首先,在蓬莱镇组沉积期,炎热干旱的古气候条件^[48-56]和向下游方向逐渐变缓的古地形坡度^[57],导致了河流能量逐渐减小,分支河道由平直河过渡到曲流河,并且发育程度经历了低—高一低的过程。以 $J_3P^{2(8)}$ 砂组沉积时期为例(图 5),从 A—E 区,分支河道数量百分比(N1)分别为 16%、19%、35%、26%和 4%,其中 C 区发育程度最高, $J_3P^{4(5)}$ 砂组具有相似的变化规律(图 8)。其次,从上游到下游,由于河流能量的逐渐降低,河流对下覆地层的下蚀和侧蚀能力减弱,导致河道的宽度和深度都逐渐减小。以 $J_3P^{4(5)}$ 砂组沉积时期为例(图 8),在上游方向分支河道的宽度为 3~5 km,在下游,分支河道的宽度为 1~3 km。

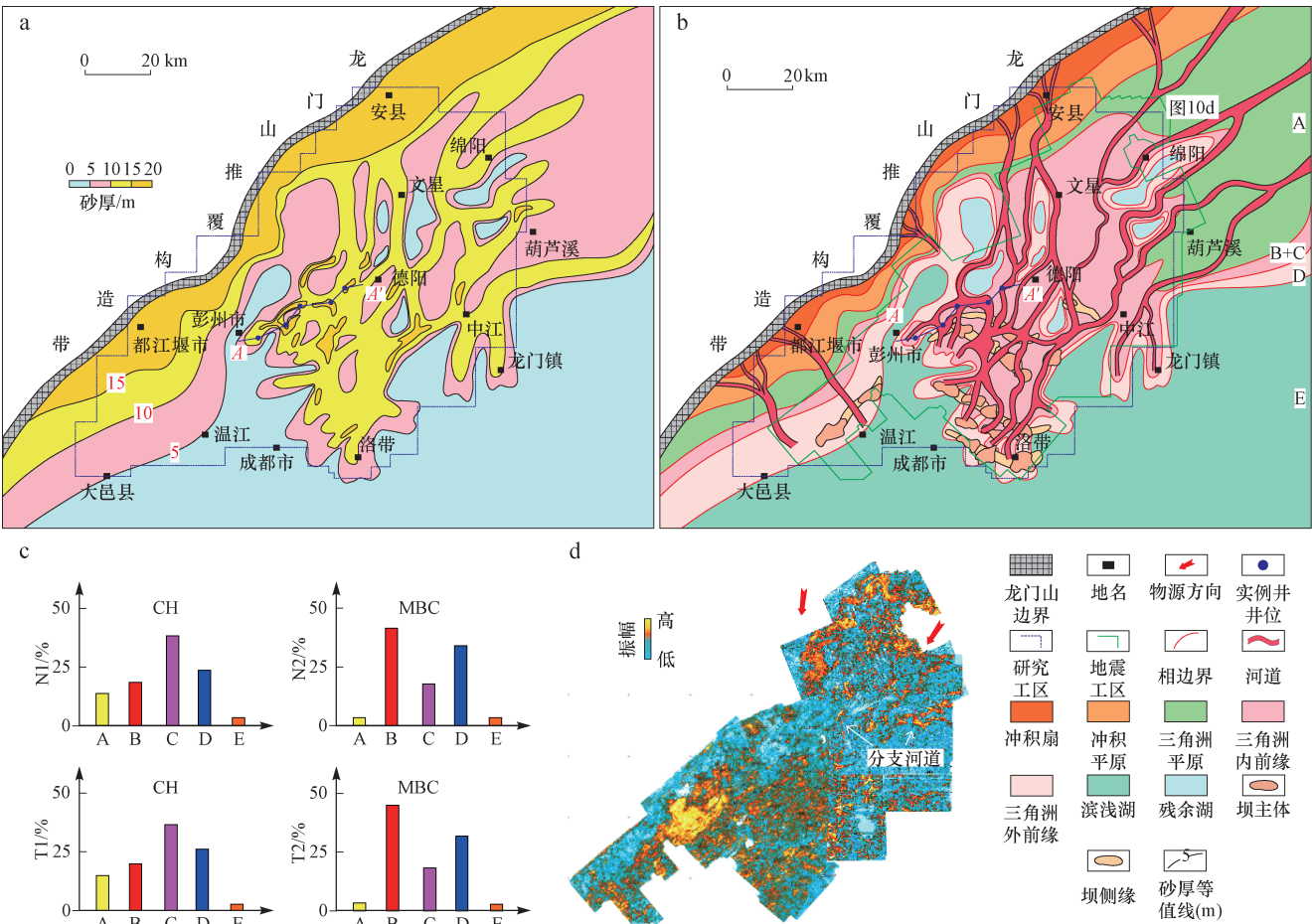


图8 川西坳陷中段蓬莱镇组 $J_3p^{1(5)}$ 砂组沉积相

Fig. 8 Sedimentary facies map of $J_3p^{1(5)}$ sandstone in the Penglaizhen Formation, central Western Sichuan Depression

a. 砂厚等值线; b. 沉积相; c. 测井相重构参数频率分布直方图, 其中 A~E 分别代表 5 个蓬莱镇组浅水三角洲沉积区;
d. 全区三维连片 $J_3p^{1(5)}$ 砂组 RMS 属性, 图中河道为优势主河道发育位置

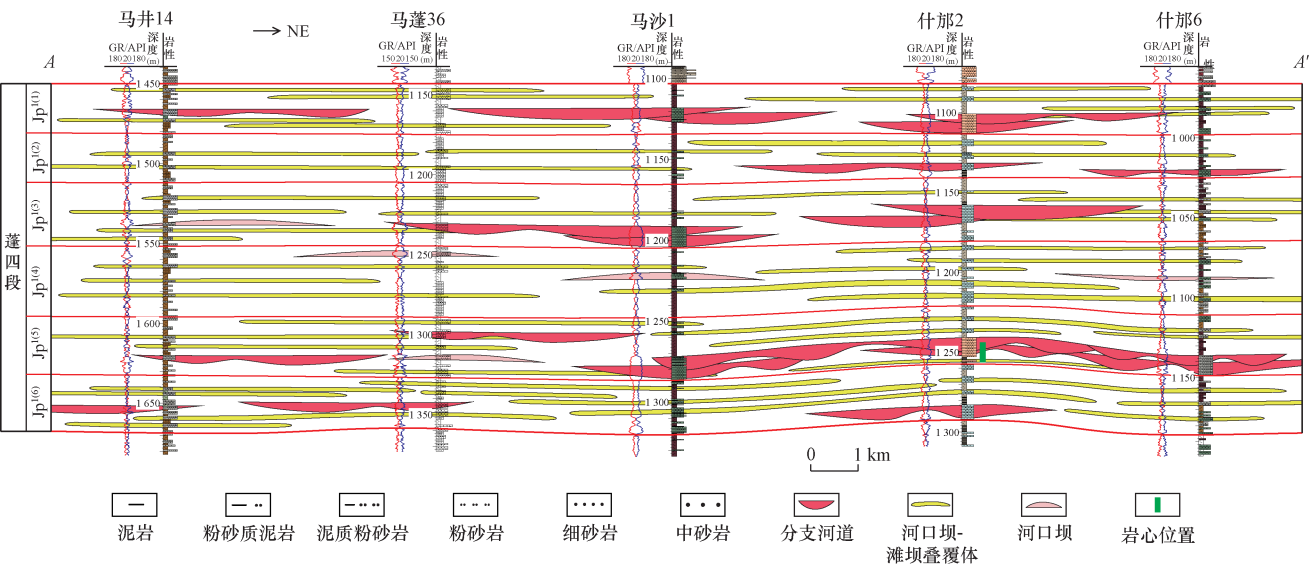


图9 川西坳陷蓬四段连井砂体精细对比剖面(剖面位置见图8)

Fig. 9 Fine cross-well correlation of sandstones in the 4th member of Penglaizhen Formation (J_3p^4), Western Sichuan Depression (see Fig. 8 for the section location)

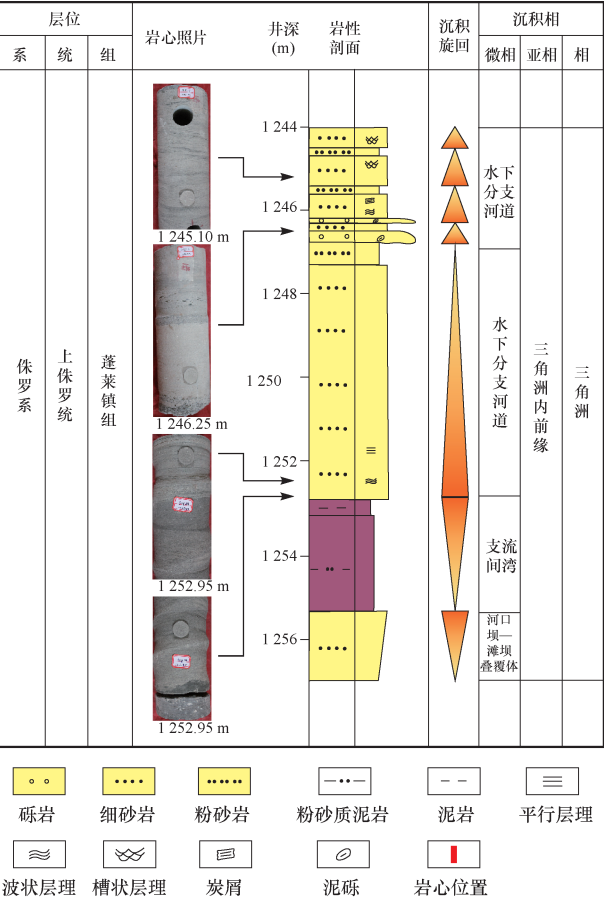


图 10 川西坳陷蓬莱镇组分支河道和河口坝-滩坝叠覆体岩心相分析(岩心位置见图 9, well 4)

Fig. 10 Core facies analysis of distributary channels and mouth bar-beach bar complexes in Well 4 in the Penglaizhen Formation, Western Sichuan Depression (see Fig. 9 for the core location of Well 4)

3) 晚期发育的分支河道对早期形成的砂体具有破坏性

当湖平面由高水位期向低水位期变化时,低水位期的浅水三角洲分支河道会对高水位期形成的河口坝-滩坝叠覆体等砂体进行改造、破坏,形成典型的“坝上河”。以 $J_3p^{4(5)}$ 砂组沉积时期为例(图 8),沿彭州-德阳-中江一带发育的河口坝-滩坝叠覆体,被后期分支河道体系破坏,仅发育残留砂体。

4.1.2 基准面变化

在蓬莱镇组沉积期,不同级别的湖平面变化,对湖盆内部层序充填和沉积相应有不同的影响^[58-59]。一般地,假设盆地物源供给量为一个常数,基准面变化对浅水三角洲发育的影响主要体现在以下 2 个方面。

1) 低频湖平面升降控制着沉积体系进积与退积
在低频层序(二级-三级,约为 3×10^6 a,对应于

本论文的段)发育过程中,周期性的湖平面升降,控制着浅水三角洲的进积和退积。通过对研究区砂组沉积微相的分析,确定了岸线的分布范围,可以在一定程度上证明这一观点。例如, $J_3p^{2(8)}$ 和 $J_3p^{4(5)}$ 砂组分别发育在蓬二段和蓬四段沉积期(图 1b,图 5,图 8),位于一个二级层序的湖退体系域。通过对这 2 个砂组的湖岸线进行研究发
现, $J_3p^{2(8)}$ 砂组沉积期,岸线主要分布在靠近龙门山的温江-彭州-文星一带; $J_3p^{4(5)}$ 砂组沉积期,岸线主要分布在温江-洛带一带。从不同时期岸线的分布上可以看出,湖岸线的位置逐渐向坳陷中心迁移。因此,低频湖平面升降控制着岸线迁移,进一步决定了浅水三角洲的进积和退积。

2) 高频湖平面升降控制着砂体分布规律与叠置样式

依据经典层序地层学观点,低频的湖平面变化会控制着盆地内部的沉积体系充填和层序结构样式^[60]。然而,在陆相湖盆中,由于水体较浅、地形平坦,高频湖平面变化(四级-五级,约为 4×10^4 a,对应于本论文的砂组)对其影响更大。如在一个三级层序中(图 11),其内部由可以划分 9 个准层序(五级层序),而在每个准层序中,湖平面仍然发生频繁变化,进而导致岸线的不断迁移。在陆相浅水湖盆中,一个体系域一般厚度为数百米^[60],在这样一个漫长的地质历史时期内部,湖平面必定发生了多次的变化,也形成了多期次的浅水三角洲的进积和退积,控制着不同类型砂体的分布。

通过对研究区高频层序内部砂体的精细刻画发现,在平面上,发育多期平行岸线分布的河口坝-滩坝叠覆体;随着岸线的迁移,不同类型的砂体在垂向上相互叠置,表现出不同的形态。如在 $SQ2-4$ 准层序($J_3p^{3(2)}$ 砂组)发育期(图 8),平面上,共发育 2 期平行岸线的河口坝-滩坝叠覆体,分别发育在 B 区和 D 区,指示 2 个相对稳定的岸线位置;在 A 区和 D 区,以发育树枝状分支河道为主。垂向上,B 区和 D 区常见“下残坝上河”和“叠置河口坝”等砂体形态,A 区和 C 区多以“叠置分支河道”砂体形态为主。

4.2 砂体叠置模式

在高频层序(准层序)发育过程中,湖浪淘洗和河流进积作用控制着浅水三角洲砂体的沉积和破坏,受湖平面升降和可容空间变化的影响,不同成因砂体在空间上表现出不同的叠置样式。

本文通过对蓬莱镇组浅水三角洲沉积体系的研究,基于不同级次的地质单元,总结了 4 种类型的砂

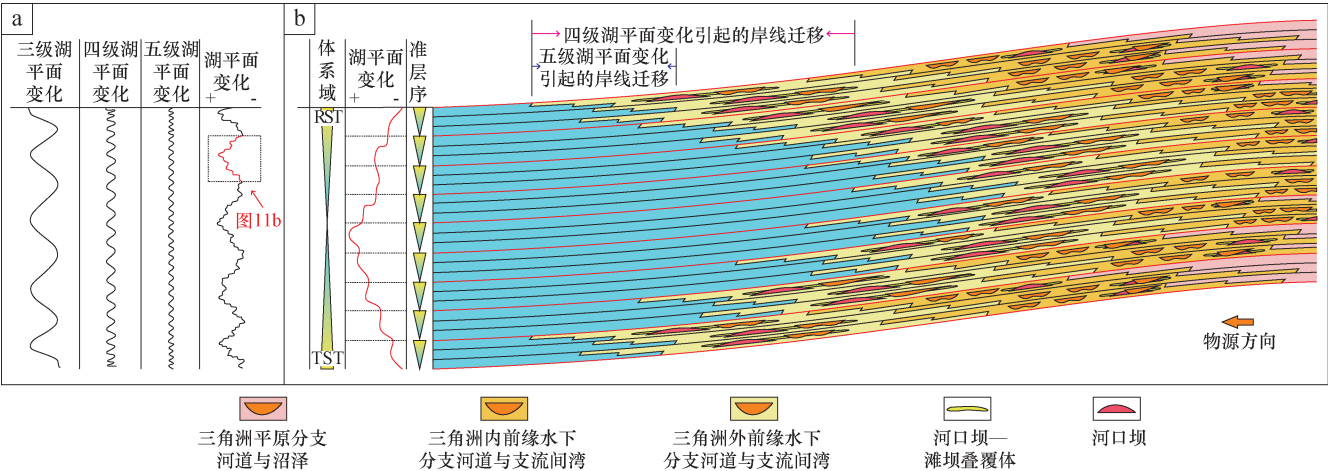


图 11 川西坳陷高频湖平面变化对沉积充填及岸线迁移的影响

Fig. 11 Impact of high-frequency lake level fluctuation on the sedimentary filling and shore-line migration in the Western Sichuan Depression

a. 不同级别湖平面变化曲线的叠合;b. a 中虚线框的局部放大,是一个三级层序,而在其内部,又可以进一步划分 9 个准层序(五级),在一个地形平坦的陆相湖盆,三、四级湖平面的变化可以引起一定规模的岸线迁移,而五级湖平面的变化,也可以引起较大规模的岸线迁移

体叠置模式(图 12),分别为低可容空间河道叠置(图 12,①砂体)、坝上河(图 12,②砂体)、高可容空间河道叠置(图 12,③砂体)和河口坝叠置(图 12,④砂体)。

低可容空间河道叠置砂体发育在洪水期水位线之

上,位于浅水三角洲平原位置,为低可容空间下平原分支河道相互叠置形成;坝上河砂体发育在湖岸线高水位稳定区,由于湖平面开始下降,导致晚期分支河道切割早期坝体,形成坝上河;高可容空间河道叠置砂体发育在湖岸线快速变化区,由于该区间歇性的处于水下,

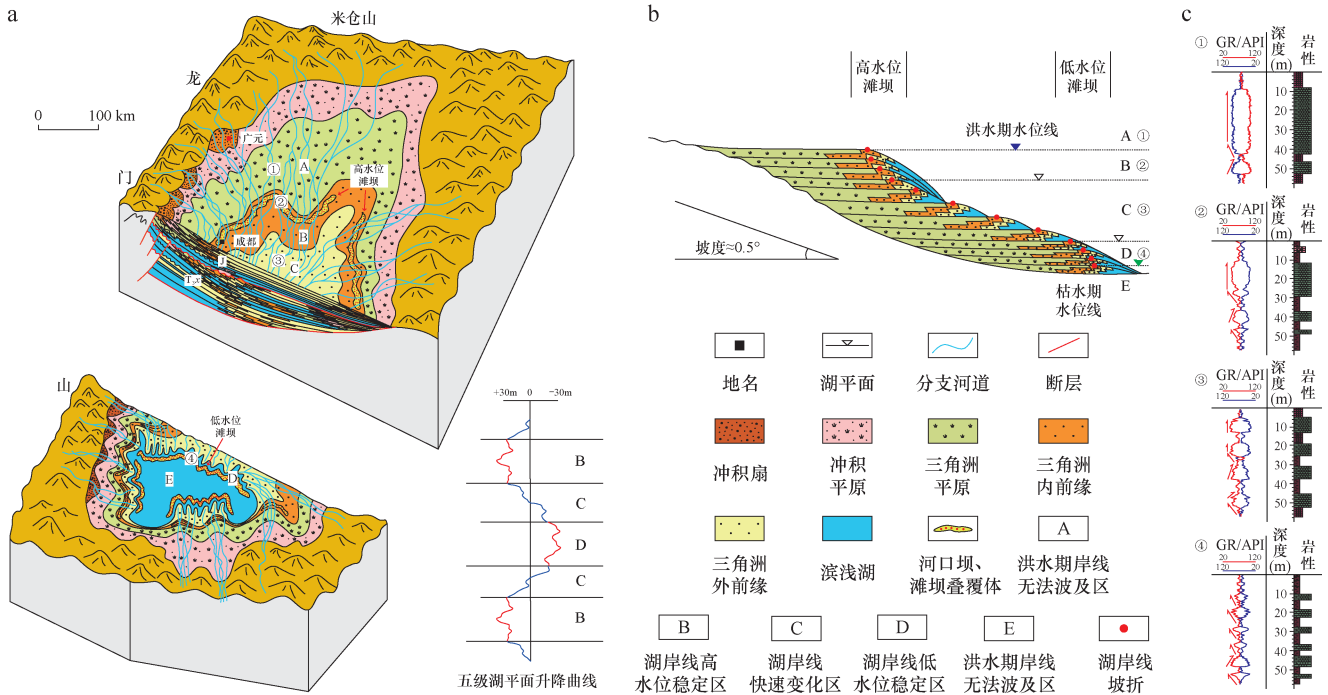


图 12 川西坳陷蓬莱镇组浅水三角洲不同成因砂体叠置模式

Fig. 12 Superimposition patterns of sandbodies of varying genetic types in shallow water delta in the Penglaizhen Formation, Western Sichuan Depression

a. 蓬莱镇组浅水三角洲沉积模式,A—E 5 个沉积区位置见图 2;b. 层序地层演化过程,A—E 5 个沉积区位置见图 2;c. 不同沉积区砂体叠置模式,①~④位置见 a

主要发育相互叠置的水下分支河道砂体;河口坝叠置砂体发育在湖岸线低水位稳定区,由于自旋回作用,坝体发生侧向迁移,相互叠置形成。

5 结论

1) 由于受波浪和河流进积的改造作用,共发育未改造型分支河道和改造型河口坝-滩坝叠覆体2种砂体类型,并且不同成因类型砂体具有“河流侵蚀控河道砂、岸线迁移控滩坝砂”的特点。

2) 在晚侏罗世,研究区所发育的浅水三角洲主要受自旋回作用,如河流能量,和异旋回作用,如基准面变化等因素控制。

3) 建立了川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲沉积演化和4种砂体叠置模式,该模式的建立不仅对前陆盆地发育的浅水三角洲具有一定的指导和借鉴意义,而且可以完善浅水三角洲理论在陆相湖盆中的应用。

致谢:感谢中石化西南油气田分公司为本次研究提供数据资料和技术帮助,高级工程师何鲤为作者提供了大量有意义的野外帮助,高级工程师朱宏权、张世华、叶素娟为本文的构思提供了逻辑上的帮助;感谢审稿专家为本文的草稿进行认真的审核,并且提供了很多建设性的意见,对本文的正常发表十分有帮助。

参 考 文 献

- [1] 杨克明,朱宏权. 川西叠覆型致密砂岩气区地质特征[J]. 石油实验地质,2013,35(1):1-8.
Yang Keming, Zhu Hongquan. Geological characteristics of superposed tight sandstone gas-bearing areas in western Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1): 1-8.
- [2] 叶素娟,李嵘,张庄. 川西坳陷中段上侏罗统蓬莱镇组物源及沉积体系研究[J]. 沉积学报,2014,32(5):930-940.
Ye Sujuan, Li Rong, Zhang Zhuang. Provenance analysis and depositional system of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Middle Part of Western Sichuan, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(5): 930-940.
- [3] 刘自亮,沈芳,朱筱敏,等. 浅水三角洲研究进展与陆相湖盆实例分析[J]. 石油与天然气地质,2015,36(4):596-604.
Liu Ziliang, Shen Fang, Zhu Xiaomin, et al. Progress of shallow-water delta research and a case study of continental lake basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 596-604.
- [4] 朱永进,尹太举,刘玲利. 浅水型三角洲沉积研究进展及问题讨论[J]. 石油天然气学报,2011,33(3):22-26,165.
Zhu Yongjin, Yin Taiju, Liu Lingli. Progress and discussion on Shallow-water Delta Sediment[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(3): 22-26, 165.
- [5] 朱筱敏,潘荣,赵东娜等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):7-14.
Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5): 7-14.
- [6] 朱永进,张昌民,尹太举. 叠覆式浅水三角洲沉积特征与沉积模拟[J]. 地质科技情报,2013,32(3):59-65.
Zhu Yongjin, Zhang Changmin, Yin Taiju. Characteristics of superimposed shallow-lacustrine delta and its experimental simulation[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(3): 59-65.
- [7] 张昌民,尹太举,朱永进,等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报,2010,28(5):933-944.
Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 933-944.
- [8] 钟怡江,陈洪德,徐长贵,等. 辽东湾坳陷新近系馆陶组浅水三角洲的发现及其油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质,2017,38(3):499-507.
Zhong Yijiang, Chen Hongde, Xu Changgui, et al. Discovery of shallow-water delta in the Neogene Guantao Formation in the Liaodong Bay Depression and its significance for oil and gas exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 499-507.
- [9] 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.
- [10] 蔡全升,胡明毅,胡忠贵,等. 退积型浅水三角洲沉积演化特征及砂体展布规律——以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质,2016,37(6):903-914.
Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Sedimentary evolution and distribution of sand bodies of retrogradational shallow-water delta: A case study from 4th member of the Cretaceous Quantou Formation in the Lingjiang area, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 903-914.
- [11] Gouw M J P, Autin W J. Alluvial architecture of the Holocene Lower Mississippi Valley(U. S. A.) and a comparison with the Rhine-Meuse delta(The Netherlands) [J]. Sedimentary Geology, 2008, 204(3 - 4): 106 - 121.
- [12] Olariu M I, Carvajal C R, Olariu C et al. Deltaic process and architectural evolution during cross-shelf transits, Maastrichtian Fox Hills Formation, Washakie Basin, Wyoming [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(10):1931-1956.
- [13] Bhattacharya J P. Practical problems in the application of the sequence stratigraphic method and key surfaces: integrating observations from ancient fluvial-deltaic wedges with Quaternary and modelling studies[J]. Sedimentology, 2011, 58(1):120-169.

- [14] 冯文杰,吴胜和,张可,等. 曲流河浅水三角洲沉积过程与沉积模式探讨——沉积过程数值模拟与现代沉积分析的启示[J]. 地质学报,2017,91(9):2047–2064.
Feng Wenjie, Wu Shenghe, Zhang Ke, et al. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: insights from numerical simulation and modern deposition[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(9): 2047–2064.
- [15] 杨运会,刘军,赵永华,等. 洛带气田蓬莱镇组层序格架下的沉积相研究[J]. 天然气技术,2010,4(1):21–23.
Yang Yunhui, Liu Jun, Zhao Yonghua, et al. Sedimentary facies in a sequence stratigraphic framework of Penglaizhen Formation, Luodai Gasfield[J]. Nature Gas Technology, 2010, 4(1): 21–23.
- [16] 陈佩佩,胡望水,黄鑫,等. 川西坳陷SDG地区浅水三角洲沉积特征及沉积成因模式[J]. 油气地质与采收率,2018,25(2):1–9.
Chen Peipei, Hu Wangshui, Huang Xin, et al. Study on tight reservoir diagenetic facies of Penglaizhen Formation in Shifang-Deyang-Guangjin Area of Western Sichuan Foreland[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 25(2): 1–9.
- [17] 陈恭洋,晋静,罗迎春,等. 沉积相控制下致密砂岩气藏分布特征——以四川盆地川西坳陷中段蓬莱镇组为例[J]. 石油与天然气地质,2017,38(3):467–477.
Chen Gongyang, Jin Jing, Luo Yingchun, et al. Characteristics of tight sandstone gas reservoir distribution under control of sedimentary facies: A case study from the Penglaizhen Formation in the central western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 467–477.
- [18] 钱利军,陈洪德,时志强,等. 川西坳陷中段蓬莱镇组物源及沉积相展布特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(1):15–24.
Qian Lijun, Chen Hongde, Shi Zhiqiang, et al. Provenance and sedimentary facies evolution of Penglaizhen Formation in the middle part of West Sichuan depression[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(1): 15–24.
- [19] 陈兆荣,侯明才,董桂玉,等. 川西前陆盆地上侏罗统蓬莱镇组沉积特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2008,31(4):325–331.
Chen Zhaorong, Hou Mingcai, Dong Guiyu, et al. The characteristics of sedimentary facies at Penglai town Formation of Upper Jurassic in Western Sichuan Foreland Basin[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2008, 31(4): 325–331.
- [20] 朱志军,陈洪德,胡晓强,等. 川西前陆盆地侏罗纪层序地层格架、沉积体系配置及演化[J]. 沉积学报,2010,28(3):451–461.
Zhu Zhijun, Chen Hongde, Hu Xiaoqiang, et al. Framework of sequence stratigraphy, sedimentary system and evolution of Jurassic in western Sichuan foreland basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(3): 451–461.
- [21] 陈竹新,贾东,魏国齐,等. 川西前陆盆地中—新生代沉积迁移与构造转换[J]. 中国地质,2008,35(3):472–481.
Chen Zhuxin, Jia Dong, Wei Guoqi, et al. Meso-Cenozoic sediment transport and tectonic transition in the western Sichuan for eland basin[J]. Geology in China, 2008, 35(3): 472–481.
- [22] 刘君龙,纪友亮,杨克明,等. 浅水湖盆三角洲岸线控砂机理与油气勘探意义——以川西坳陷中段蓬莱镇组为例[J]. 石油学报,2015,36(9):1060–1073,1155.
Liu Junlong, Ji Youliang, Yang Keming, et al. Mechanism of lake shoreline control on shoal water deltaic sandbodies and its significance for petroleum exploration—A case study of Penglaizhen Formation in the middle part of western Sichuan depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1060–1073, 1155.
- [23] 刘君龙,杨克明,纪友亮,等. 川西坳陷上侏罗统浅水漫湖沉积特征与砂体叠置模式[J]. 古地理学报,2015,17(4):503–516.
Liu Junlong, Yang Keming, Ji Youliang, et al. Sedimentary characteristics and sandbody superposed patterns of flood-overlake deposits in the condition of high frequency lake-level change—A case study of Penglaizhen formation in the middle part of western Sichuan depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 503–516.
- [24] 刘君龙,纪友亮,张克银,等. 川西前陆盆地侏罗系沉积体系变迁及演化模式[J]. 石油学报,2016,37(6):743–756.
Liu Junlong, Ji Youliang, Zhang Keyin, et al. Jurassic sedimentary system transition in Western Sichuan Foreland Basin and its evolution model[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(6): 743–756.
- [25] 李嵘,张娣,朱丽霞. 四川盆地川西坳陷须家河组砂岩致密化研究[J]. 石油实验地质,2011,33(3):274–281.
Li Rong, Zhang Di, Zhu Lixia. Densification of Upper Triassic Xujiahe tight sandstones, Western Sichuan, China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33(3): 274–281.
- [26] 安红艳,时志强,张慧娟,等. 川西坳陷中段中侏罗统沙溪庙组储层砂岩物源分析[J]. 四川地质学报,2011,31(1):29–33.
An Hongyan, Shi Zhiqiang, Zhang Huijuan, et al. On material source of sandstone reservoir of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in West Sichuan Depression[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(1): 29–33.
- [27] 李智武,刘树根,林杰,等. 川西坳陷构造格局及其成因机制[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2009,36(6):645–653.
Li Zhiwu, Liu Shugen, Lin Jie, et al. Structural configuration and its genetic mechanism of the west Sichuan depression in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(6): 645–653.
- [28] 李智武,刘树根,陈洪德,等. 龙门山冲断带分段—分带性构造格局及其差异变形特征[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2008,35(4):440–454.
Li Zhiwu, Liu Shugen, Chen Hongde, et al. Structural configuration and its genetic mechanism of the West Sichuan depression in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2008, 35(4): 440–454.
- [29] 金文正,汤良杰,杨克明,等. 龙门山冲断带构造特征研究主要进展及存在问题探讨[J]. 地质论评,2008,54(1):37–46.
Jin Wenzheng, Tang Liangjie, Yang Keming, et al. Progress and prob-

- lem of study on characters of the Longmen Mountain Thrust Belt[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 37-46.
- [30] 周康, 王强, 乔永亮. 龙门山造山带与川西前陆盆地的盆山耦合关系对油气成藏的控制作用[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 378-383.
- Zhou Kang, Wang Qiang, Qiao Yongliang. Control of the basin-range coupling relationship between Longmen Mountain Orogenic Belt and Western Sichuan foreland basin to hydrocarbon accumulation[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 378-383.
- [31] 钱利军. 川西北地区中、下侏罗统物质分布规律与沉积充填过程: (博士学位论文)[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- Qian Lijun. Regulation of sedimentary distribution and sedimentary filling process during Middle and Lower Jurassic in Western and Northern Sichuan, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [32] 邓宾. 四川盆地中—新生代盆—山结构与油气分布:[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- Deng Bin. Meso-Cenozoic architecture of basin-mountain system in the Sichuan basin and its gas distribution[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [33] 孙东. 米仓山构造带构造特征及中—新生代构造演化[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- Sun Dong. The structural character and Meso-Cenozoic evolution of Micang Mountain Structural Zone, Northern Sichuan Basin, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [34] 孙东, 刘树根, 邓宾, 等. 米仓山与龙门山接合部叠加褶皱特征及构造演化[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2011, 38(2): 156-168.
- Sun Dong, Liu Shugen, Deng Bin, et al. Superposed fold characteristics and structural evolution in the junction area of Longmenshan Mountains and Micangshan Mountains in the southwest of China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2011, 38(2): 156-168.
- [35] 谢志良, 刘树根, 赵磊, 等. 米仓山与龙门山结合部构造分带性特征[J]. 四川地质学报, 2012, 32(4): 385-388.
- Xie Zhiliang, Liu Shugen, Zhao Lei, et al. Tectonic zonation in the junction of the Micang Mts with the Longmen Mts[J]. Acta Geologica Sichuan, 2012, 32(4): 385-388.
- [36] 纪友亮, 刘君龙, 王天云, 等. 陆相湖盆三角洲—滩坝复合砂体分布模式及编图方法[J]. 古地理学报, 2016, 18(4): 616-630.
- Ji Youliang, Liu Junlong, Wang Tianyun, et al. Distributing pattern and drawing method of delta-beach bar sand-body in continental lacustrine basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(4): 616-630.
- [37] 冯增昭. 单因素分析综合作图法: 岩相古地理学方法论[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 70-77.
- Feng Zengzhao. Single factor analysis and comprehensive mapping method: Methodology of lithofacies paleogeography[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3): 70-77.
- [38] 冯增昭. 单因素分析多因素综合作图法: 定量岩相古地理重建[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 3-19.
- Feng Zengzhao. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method: Reconstruction of quantitative lithofacies palaeogeography[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(1): 3-19.
- [39] 李元昊, 刘池洋, 独育国, 等. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长8油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂[J]. 古地理学报, 2009, 11(3): 265-274.
- Li Yuanhao, Liu Chiyang, Du Yuguo, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sand bodies of Chang 8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yanchang Formation in northwestern Ordos basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3): 265-274.
- [40] 楼章华, 卢庆梅, 蔡希源, 等. 湖平面升降对浅水三角洲前缘砂体形态的影响[J]. 沉积学报, 1998, 16(4): 27-31.
- Lou Zhanghua, Lu Qingmei, Cai Xiyuan, et al. Influence of lake fluctuation on sandbody shapes at shallow-water delta front. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(4): 27-31.
- [41] 胡明毅, 马艳荣, 刘仙晴, 等. 大型坳陷型湖盆浅水三角洲沉积特征及沉积相模式—以松辽盆地茂兴—敖南地区泉四段为例[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 13-17.
- Hu Mingyi, Ma Yanrong, Liu Xianqing, et al. Sedimentary characteristics and mode of shallow delta in large scale downwrap lacustrine basin: By taking Quan-4 Formation in Maoxing and Aonan Region in Songliao Basin for Example[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(3): 13-17.
- [42] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582.
- Zhu Weilin, Li Jianping, Zhou Xinhuai, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai bay, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 575-582.
- [43] 朱敏敏, 赵东娜, 曾洪流, 等. 松辽盆地齐家地区青山口组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 889-897.
- Zhu Xiaomin, Zhao Dongna, Zeng Hongliu, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of shallow-water delta of Qingshankou Formation in Qijia area, Songliao basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 889-897.
- [44] 李志鹏, 林承焰, 董波, 等. 河控三角洲水下分流河道砂体内部建筑结构模式[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 101-105.
- Li Zhipeng, Lin Chengyan, Dong Bo, et al. An internal structure model of subaqueous distributary channel sands of the fluvial-dominated delta[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1): 101-105.
- [45] 韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 姬塬地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1057-1064.
- Han Yonglin, Wang Chengyu, Wang Haihong, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1057-1064.
- [46] 胡忠贵, 胡明毅, 胡九珍, 等. 潜江凹陷东部地区新沟咀组下段浅

- 水三角洲沉积模式[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1263 - 1273.
- Hu Zhonggui, Hu Mingyi, Hu Jiuzhen, et al. Shallow water delta depositional model of the lower segment of the Xingouzui Formation in eastern Qianjiang depression[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1263 - 1273.
- [47] 王建功, 王天琦, 卫平生, 等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲沉积模式—以松辽盆地北部葡萄花油层为例[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(2): 28 - 34.
- Wang Jiangong, Wang Tianqi, Wei Pingsheng, et al. Sedimentary mode of shallow lacustrine delta of large continental basin—An example from Putaohua Formation in northern Songliao basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19(2): 28 - 34.
- [48] 雍自权, 刘庆松, 李倩. 川西前陆盆地的发展演化、地层充填及其对油气成藏的意义[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 26 - 29, 162.
- Yong Ziquan, Liu Qingsong, Li Qian. Evolution and sediment filling of western Sichuan foreland basin and their significance of hydrocarbon accumulation[J]. *Nature Gas Industry*, 2008, 28(2): 26 - 29, 162.
- [49] 黄宝春, 周姚秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程[J]. 地学前缘, 2008, 15(3): 348 - 359.
- Huang Baochun, Zhou Yaoxiu, Zhu Rixiang. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(3): 348 - 359.
- [50] 曹珂. 四川盆地晚中生代红层与古气候: [D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- Cao Ke. Late Mesozoic red beds and Paleoclimate in Sichuan basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [51] 赵向原, 胡向阳, 肖开华, 等. 川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层裂缝特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(1): 30 - 39.
- Zhao Xiangyuan, Hu Xiangyang, Xiao Kaihua, et al. Characteristics and major control factors of natural fractures in carbonate reservoirs of Leikoupo Formation in Pengzhou area, western Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 30 - 39.
- [52] 王永标, 徐海军. 四川盆地侏罗纪至早白垩世沉积旋回与构造隆升的关系[J]. 地球科学, 2001, 26(3): 241 - 246.
- Wang Yongbiao, Xu Haijun. Relations between evolution of sedimentary cycles and tectonic uplift around Sichuan basin from Jurassic to early Cretaceous[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2001, 26(3): 241 - 246.
- [53] 王全伟, 阚泽忠, 刘啸虎, 等. 四川中生代陆相盆地孢粉组合所反映的古植被与古气候特征[J]. 四川地质学报, 2008, 28(2): 89 - 95.
- Wang, Quanwei, Kan, Zezhong, Liu, Xiaohu, et al. The Mesozoic sporopollen assemblage in the Sichuan Basin and its significance to Paleovegetation and Paleoclimate[J]. *Journal of Sichuan geology*, 2008, 28(2): 89 - 95.
- [54] 阚泽忠, 梁斌, 王全伟, 等. 四川安岳恐龙化石埋藏地遂宁组、蓬莱镇组中遗迹化石及其环境意义[J]. 四川地质学报, 2005, 25(2): 68 - 71.
- Kan Zezhong, Liang Bin, Wang Quanwei, et al. Trace fossils in the suining and Penglaizhen Formations as buried places of dinosaur fossils, in Anyue, Sichuan, and Their Environmental Significance[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2005, 25(2): 68 - 71.
- [55] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34 - 40.
- Cheng Qiang, Kou Xiaobing, Huang Shaobin, et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2004, 12(1): 34 - 40.
- [56] 田在艺, 万仑昆. 中国侏罗系岩相古地理与含油气远景[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(2): 101 - 116.
- Tian Zaiyi, Wan Kunlun. Lithofacies palaeogeography and petroliferous prospect, Jurassic, China[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1993, 14(2): 101 - 116.
- [57] 陈竹新, 贾东, 魏国齐, 等. 川西前陆盆地中—新生代沉积迁移与构造转换[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 472 - 481.
- Chen Zhuxin, Jia Dong, Wei Guoqi, et al. Meso-Cenozoic sediment transport and tectonic transition in the western Sichuan for eland basin[J]. *Geology in China*, 2008, 35(3): 472 - 481.
- [58] Shanley K W, McCabe P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(4): 544 - 568.
- [59] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- [60] 纪友亮, 张世奇. 陆相断陷湖盆层序地层学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- Ji Youliang, Zhang Shiqi. Sequence stratigraphic models of the fault-depression lake basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.

(编辑 张亚雄)