

鄂西-城口地区“海槽”西侧长兴组-飞仙关组 台缘礁滩特征与展布

魏国齐, 杨 威, 刘满仓, 武赛军, 莫午零, 金 惠, 沈珏红, 郝翠果

(中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:通过鄂西-城口地区长兴组-飞仙关组露头、钻井、测井和地震等资料综合分析,对长兴组-飞仙关组台缘带及台缘礁滩特征取得了新认识:①长兴组-飞仙关组为镶边碳酸盐岩台地沉积,由东向西依次发育盆地相、斜坡相、台缘礁滩相、开阔台地相、局限台地相和蒸发台地相;②发育一条长兴期-飞仙关期的台缘带,长兴期以台缘礁组合为主,飞仙关期以台缘鲕滩为主,礁滩分布连续、厚度较大且延伸范围较广;③长兴期台缘礁由礁基、礁核和礁盖组成,礁核主要为粘结礁和障积-骨架礁,礁基和礁盖主要为生屑砂屑滩,分布于万源蜂桶、宣汉盘龙洞、开县满月、奉探1井和见天坝一带,迁移特征不明显;④飞仙关期台缘滩以鲕粒白云岩和鲕粒灰岩为主,分布稳定、范围大,向盆地方向,台缘滩由飞二段逐渐迁移至飞四段,飞二段台缘滩主要分布于万源八台、开县满月、万州双河、寨沟湾和石宝寨一带,飞三段台缘滩向东迁移至宁厂一线,飞四段台缘滩迁移至孔家沟一线,飞二段台缘滩与长兴期台缘礁叠合,白云岩化程度较高。

关键词:海槽西侧;台缘带;岩相古地理;礁滩;展布;长兴组;飞仙关组;鄂西-城口地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and distribution of platform-margin reef-shoal reservoirs in Changxing-Feixianguan Formations to the west of ocean trough, E' xi-Chengkou area

Wei Guoqi, Yang Wei, Liu Mancang, Wu Saijun, Mo Wuling, Jin Hui, Shen Juehong, Hao Cuiguo

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: An integrated analysis of outcrop, drilling, log and seismic data of the Changxing-Feixianguan Formations in E' xi-Chengkou area has led to new understandings of the characteristics of the platform-margin reef-shoal reservoirs therein. (1) The Changxing-Feixianguan Formations are a rimmed carbonate platform, composed of basin, slope, platform-margin reef-shoal, open platform, restricted platform and evaporated platform facies from east to west. (2) A platform-margin belt was developed during the sedimentation of Changxing-Feixianguan Formations with the Changxing Formation dominated by platform-margin reef facies and Feixianguan Formation by platform-margin oolitic shoal facies. This massive reef-shoal complex expands broadly and continuously in the area. (3) The platform-margin reef-shoal in the Changxing Formation consists of reef base, reef core and reef cap. The reef core is mainly cemented reef and baffle-frame reef, and the reef base and cap are mainly the biotritus shoal facies distributed in Fengtong Township in Wanyuan City, Panlongdong Village in Xuanhan County, Manyue Township in Kaixian, Well Fengtan 1 and Jiantianba Township with no obvious signs of migration. (4) The platform-margin reef-shoal facies in the Feixianguan Formation is dominated by widespread oolitic dolomite and oolitic limestone and gradually migrating basinward from the second member to the fourth member of Feixianguan Formation. The facies in the second member is mainly distributed in Batai Town in Wanyuan City, Manyue Township in Kaixian, Shuanghekou of Wanzhou District in Chongqing, Zhaigouwan and Shibaozhai areas. The facies in the third member migrated eastward to Ningchang area, and that in the fourth member to Kongjiagou area. The shoal facies of the second member of Feixianguan Formation is highly dolomitized and superimposed onto the reef-shoal facies of

收稿日期:2018-12-17;修订日期:2021-04-20。

第一作者简介:魏国齐(1964—),男,博士、教授级高级工程师,石油与天然气地质。E-mail:weigq@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:杨威(1971—),男,博士、教授级高级工程师,石油与天然气地质。E-mail:yangw69@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05007-002)。

Changxing Formation.

Key words: west of the ocean trough, platform-margin zone, lithofacies paleogeography, reef-shoal facies, distribution, Changxing-Feixianguan Formations, E' xi-Chengkou area

四川盆地位于上扬子台地的西部,是中国重要的含油气盆地,天然气资源丰富、年产量高且潜力大。长兴组-飞仙关组台缘礁滩是四川盆地重要的天然气勘探开发领域,先后发现了普光、元坝和罗家寨等多个大气田,截止到2020年底,探明天然气地质储量近 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,剩余资源量约 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。已发现的气田90%以上分布于“开江-梁平海槽”两侧的长兴组-飞仙关组台缘礁滩^[1-3]，“海槽”两侧的台缘礁滩为高丰度大气田富集成藏提供了重要条件^[3-8]，下步勘探方向主要也为台缘礁滩^[9-13]。关于“海槽”提法存在分歧,部分学者认为应称为“陆棚、坳拉槽”等,但其所描述的地质对象为碳酸盐岩台地上相对深水的陆棚或盆地沉积环境,这一点是学术界的共识^[14-17]，故本文仍沿引“海槽”这个名称代表碳酸盐岩台地上古地貌相对低洼的陆棚区。“开江-梁平海槽”两侧长兴组-飞仙关组台缘礁滩勘探取得重大突破,其特征研究深入、认识系统^[1-2]。但与“开江-梁平海槽”相邻、特征演化一致的“鄂西-城口海槽”及其西侧台缘礁滩认识较少,前期主要是在川东北地区作为研究整体而提及^[1,15]；近期针对该区长兴期的岩相古地理格局、生物礁的类型和演化有了一定的认识,提出了发育长兴期台缘礁^[18-19]，不同时期台缘礁滩有不同类型^[17,20-22]。但总体认识程度较低,特别是作为台缘演化整体的飞仙关期台缘带和台缘滩未作系统评价,现有的认识也不足以支持该领域勘探突破。本文把研究区长兴期-飞仙关期台缘带作为一个整体进行评价,系统研究沉积相、沉积发育模式和台缘礁滩特征及演化,即整体评价“鄂西-城口西侧台缘带”礁滩特征。该成果不仅能提高四川盆地长兴组-飞仙关组台缘礁滩的认识程度,而且可为“鄂西-城口西侧台缘带”礁滩的勘探提供地质依据,具有重要的理论和实践意义。

1 区域地质特征

研究区地理上位于鄂西-城口地区,包括陕西省镇巴县,四川省万源市,重庆市城口、开县、云阳、巫溪、奉节和丰都等县(市),湖北省利川县和恩施市等地区;构造区域上位于四川盆地东北缘和东缘(图1)。该区研究资料比较丰富,主要有露头剖面、钻井、测井

和地震资料等,具备系统研究的资料条件。晚古生代,上扬子碳酸盐岩台地周围为裂陷盆地,东为赣湘桂裂陷盆地、西为龙门山-盐源裂陷盆地、北为南秦岭裂陷盆地^[1]。中泥盆世-中三叠世上扬子台地发生峨嵋地裂运动,四川盆地处于拉张背景。晚二叠世-早三叠世四川盆地及邻区发育了“开江-梁平海槽”和“鄂西-城口海槽”,2个“海槽”成因和演化等特征相似,“鄂西-城口海槽”相对规模较大,其东侧边界在湖北省京山一带,本文讨论的重点是该“海槽”西侧的台缘带,故称“鄂西-城口西侧台缘带”。

研究的主要目的层为上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组。上二叠统长兴组在四川盆地分布广泛,在研究区与下伏龙潭组呈整合接触,与上覆飞仙关组也呈整合接触。长兴组主要由石灰岩、生物灰岩、含燧石灰岩、泥灰岩夹白云岩及泥岩组成,生物繁盛,富含蜓、有孔虫、海绵、珊瑚和藻类等,以发育生物礁灰岩或礁白云岩为特征。厚度变化较大,一般厚25~439 m,平均180 m。研究区长兴组岩性组合及厚度变化与生物礁是否发育有关,无生物礁发育的剖面,厚度一般为100 m。根据岩性、电性、生物组合和沉积旋回的不同,由下至上分为长一、长二和长三段。长一段为中一薄层状灰色和褐灰色生物泥晶灰岩,含燧石结核;长二段为厚层状生屑灰岩,生物含量增加、色变浅且燧石含量减少;长三段为灰黑色中薄层灰岩、泥晶灰岩和含燧石条带,富含生物碎屑。在城口和巫溪地区,长一段相变为以黑色硅质页岩为主,夹深灰色泥页岩和泥晶灰岩,相当于大隆组^[1,13]。发育生物礁的剖面厚度一般大于200 m,如奉探1井长兴组厚380 m,以厚层块状生物礁灰岩(白云岩)和生屑灰岩(白云岩)为主。

下三叠统飞仙关组以碳酸盐岩沉积为主,在研究区飞仙关组与上覆嘉陵江组、与下伏长兴组都为整合接触。飞仙关组和长兴组岩性差异明显,根据岩性的不同,飞仙关组可划分为4个岩性段,由下至上分别为飞一、飞二、飞三和飞四段,研究区典型的特征为:飞一段为灰色、深灰色薄层-中层泥晶灰岩,以及泥灰岩,局部见泥页岩;飞二段为浅灰色鲕粒白云岩夹薄层灰岩;飞三段为灰色中-厚层状泥晶灰岩、鲕粒灰岩和生屑砂屑灰岩;飞四段为紫灰色薄层泥灰岩、泥晶灰岩和页岩。研究区飞仙关组的厚度一般为400~500 m。

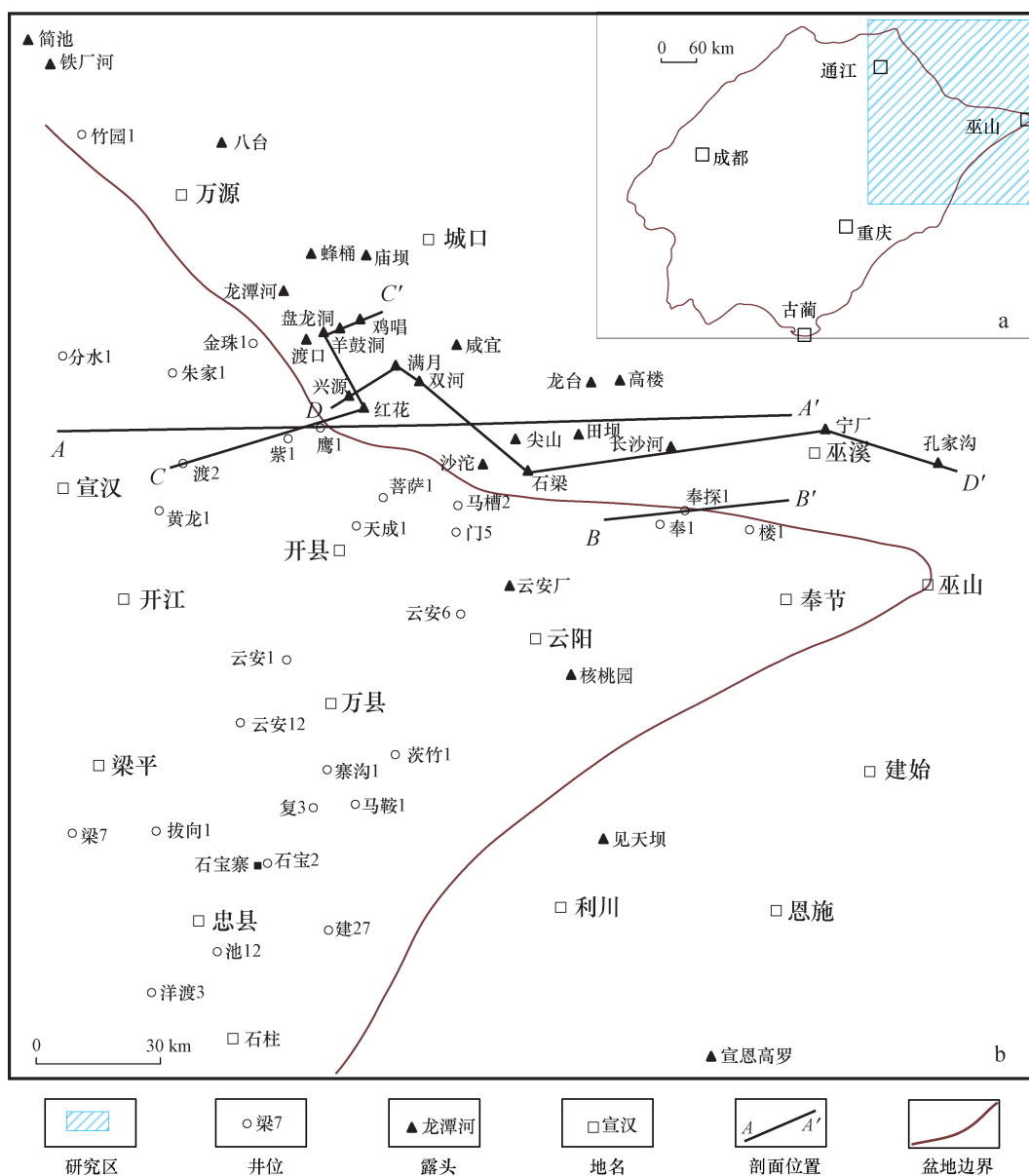


图1 鄂西-城口地区位置(a)和资料点分布(b)

Fig. 1 Outcrop sections and exploratory wells in E'xi-Chengkou area (b) with an insert map showing the location of the area (a)

2 沉积相

2.1 沉积相类型

研究区北段大部分区域出露地表,资料以野外露头剖面为主,南段探井资料较多(图1)。根据野外剖面和探井资料观察分析,结合前人的研究成果,认为研究区长兴组-飞仙关组主要发育蒸发台地、局限台地、开阔台地、台地边缘、斜坡和盆地相等6类沉积相,10类亚相。

2.1.1 蒸发台地相

研究区发育膏坪和云坪两个亚相,以膏坪亚相为主。膏坪亚相以薄层泥灰岩为主,见石膏斑块、藻纹层

状白云岩和针状石膏假晶等;云坪亚相以薄层状泥粉晶白云岩为主,见泥裂、角砾化、石膏假晶和石盐假晶等暴露性沉积标志。该相带在渡口河以西的金珠坪、老鹰岩一带的飞一段中发育,向西北延伸到万源-镇巴一线。如金珠1井飞一段岩心见大量石膏斑块,龙潭河剖面飞一段也发育大量的石膏斑块(图2a)。该区由于沉积期古地貌相对较高,位于正常海平面之上,水体循环不畅,蒸发作用强烈,沉积水体盐度较高。

2.1.2 局限台地相

研究区主要为紫红色、褐灰色薄-中层泥晶灰岩、云质泥晶灰岩、泥灰岩、白云岩、泥页岩及膏岩等(图2b)。发育如干裂等多种暴露性沉积标志。纵向上



图2 鄂西-城口地区长兴组-飞仙关组典型沉积相标志照片

Fig. 2 Images showing typical sedimentary facies of Changxing-Feixianguan Formations in E'xi-Chengkou area

a. 褐色泥灰岩中的石膏斑块, 飞一段, 龙潭河剖面; b. 紫灰色薄层泥灰岩, 飞四段, 双河剖面; c. 中-厚层状泥晶灰岩, 飞三段, 庙坝剖面; d. 生物礁灰岩, 长兴组, 红花剖面; e. 鲕粒白云岩, 飞二段, 满月剖面; f. 豆粒灰岩, 埋深4 506.6 m, 飞三段, 茨竹1井; g. 碎屑流沉积, 飞一段, 庙坝剖面; h. 灰色泥岩, 飞仙关组底部, 宁厂剖面

该相带主要发育于长三段、飞三段、飞四段,可细分潮坪和潟湖2类亚相。潮坪亚相以紫红色、灰紫色薄-中层状泥晶灰岩、泥晶白云岩、钙质泥岩为主,夹泥岩和膏岩等(图2b)。见干裂、藻纹层等浅水沉积构造及暴露标志,在潮间带可发育云质角砾岩,主要在飞三段和飞四段发育。潟湖亚相以灰、深灰色薄层泥晶灰岩为主,夹云质灰岩、泥晶白云岩和泥灰岩等,位于局限台地内古地貌相对较低的区域,主要在长三段和飞三段较发育。

2.1.3 开阔台地相

主要由浅灰色、灰色中-厚层状泥晶灰岩、鲕粒灰岩、泥灰岩和砂屑生屑灰岩组成。该相带位于局限台地向海一侧,沉积水体较浅,一般为几米到几十米,与广海连通性较好,海水循环畅通、盐度正常且生物较繁盛。研究区发育台内滩和滩间海2类亚相。

台内滩亚相主要由浅灰色中厚层状亮晶鲕粒灰岩、亮晶生屑鲕粒灰岩或砾屑鲕粒灰岩组成,平面上呈席状、透镜状,单层厚度较小,一般为几米到十几米,其主要发育于开阔台地相中古地貌相对高的区域,潮汐或波浪作用对沉积物影响较大,发育交错层理和平行层理等。如庙坝剖面飞三段发育两层台内滩,都为鲕粒灰岩,单层厚0.5~2.0 m,累积厚约15 m;如该剖面的23层为一厚约5 m的台内滩,单层厚0.5~1.0 m(图2c)。

滩间海亚相以灰色-深灰色薄-中层状泥晶灰岩为主,局部发育泥灰岩、泥晶生屑灰岩等,见水平层理和有孔虫、双壳类和腹足类等生物化石,如庙坝剖面的22层为灰色薄-中层泥晶灰岩(图2c)。该亚相位于开阔台地相中相对古地貌低的区域,在长兴组和飞仙关组广泛发育。

2.1.4 台地边缘礁滩相

以生物礁灰岩(白云岩)、鲕粒灰岩(白云岩)和生

屑灰岩(白云岩)等为主,该相带位于台地与斜坡之间波浪和潮汐作用强烈的高能带,水体清洁、能量和养分充足,适合生物大量生长繁殖。发育台缘礁亚相和台缘滩亚相(图2d—f),长兴组以发育台缘礁亚相为主(图2d),飞仙关组以发育台缘滩亚相为主(图2e,f)。

2.1.5 斜坡相

以灰黑色薄层-极薄层泥晶灰岩、泥灰岩为主,夹钙质泥岩、页岩,发育水平层理和水平虫孔等,位于台缘相带向海一侧,是盆地与台地之间的过渡沉积,水深几十米到上百米,总体比较安静。在飞一段较发育,沉积物以深水原地沉积为主,也发育深水异地沉积,如重力流,在八台、庙坝、宁厂和满月等剖面飞一段可见到碎屑流沉积,如庙坝剖面飞一段碎屑流沉积层厚约90 cm,砾石呈长条状,大的可达5 cm×10 cm,一般3 cm×4 cm,砾石含量50%左右,有一定的定向趋势(图2g)。

2.1.6 盆地相

主要为深灰色、灰黑色薄层-页状泥晶灰岩,以及泥灰岩夹褐色薄层钙质泥岩(图2h),发育水平层理。纵向上该相带主要发育在飞仙关组底部,或部分剖面的中下部;平面上,主要分布在鄂西-城口台缘带东侧。

2.2 沉积相模式

根据研究区沉积相发育与分布特征,认为其属典型的碳酸盐岩镶边台地沉积模式^[4],由东向西依次发育盆地相、斜坡相、台地边缘相、开阔台地相、局限台地相和蒸发台地相,其沉积相类型和展布与开江-梁平海槽东侧^[1,15]基本一致,以金珠坪-老鹰岩一线的蒸发台地相为中心,向两侧对称展布(图3)。

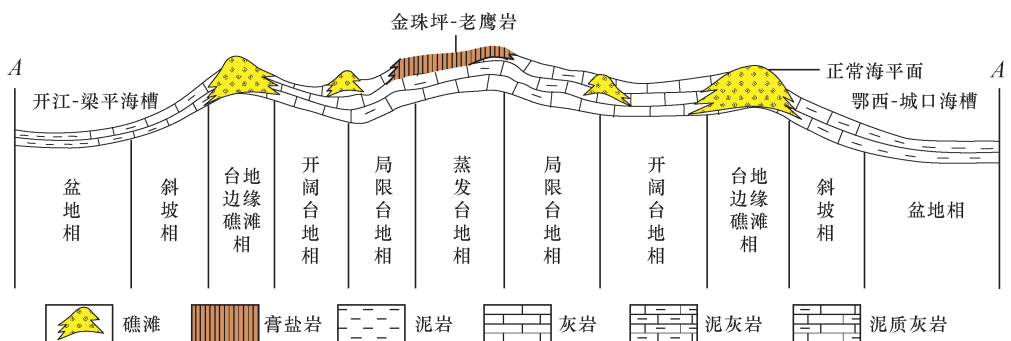


图3 鄂西-城口地区长兴组-飞仙关组沉积相模式(剖面位置见图1 A—A')

Fig.3 Sedimentary facies model during the sedimentation of Changxing-Feixianguan Formations in E'xi-Chengkou area (see Fig.1 for the section location A—A')

3 台缘礁滩特征

3.1 长兴期台地边缘礁

长兴期台地边缘礁主要为灰白色、浅灰色厚层—块状生屑灰岩、障积礁灰(云)岩、骨架礁灰(云)岩、粘结礁灰(云)岩等,具栉壳状、生物扰动、生物钻孔、底冲刷及角砾岩等(图2d),生物富集,有海绵、珊瑚、苔藓虫、水螅、藻类等造礁生物,蛭、腕足、腹足、棘皮、海百合和有孔虫等附礁生物,在沙沱、田坝、满月、蜂桶、尖山、见天坝等剖面 and 奉探1井发育。含礁区地层厚度比盆地非礁相地层厚3~5倍,从近横切台缘带的地震剖面上,可以清晰看到台缘带的特征与分布。由于研究区后期构造变形较强烈,原始剖面地震相特征明显,但难以对比,考虑到飞仙关组四段在盆地内基本填平补齐^[15,20-26],故将剖面飞仙关组顶面拉平,可以清楚看到长兴组和飞仙关组沉积前的古地貌特征及台缘带的地震反射特征(图4)。长兴组这套地层分析可见,在奉探1井区呈丘状杂乱反射地震相,是台缘礁滩的响应(图4,A点),其地层厚度相对两侧都大得多,其东侧存在明显的坡折,斜坡和盆地相地层厚度小,约100 m;其东侧地层也有明显的减薄。奉探1井的实钻也证实其位于台缘礁滩带,钻遇长兴组厚380 m,测井解释生物礁白云岩储层厚148 m,以生物骨架白云岩为主,属典型的台地边缘生物礁相。

研究区长兴期发育骨架礁、障积礁和灰泥丘3类典型的台缘礁组合,在礁组合中都有台缘滩发育。纵

向上主要发育在长兴组二段、三段。长兴组台缘礁组合可划分礁基、礁核和礁盖,也常发生白云化作用,孔隙较发育。如红花剖面生物礁为典型的台缘生物礁,礁组合完整,由礁基、礁核和礁盖组成(图5)。礁基厚46.1 m,主要由生物碎屑滩组成,岩性特征主要为深灰色和浅灰色生屑灰岩,生物碎屑包括棘皮、瓣鳃、有孔虫、藻类、筴、介形虫、海绵骨针、苔藓虫和管壳石等,是生物礁生长基座。礁核厚88.3 m,岩性为灰白色块状藻粘结岩和骨架礁灰岩,造礁生物主要为海绵,部分为苔藓虫和水螅,大多数呈垂直或斜交层面生长的生态特征,附礁生物有海百合、腕足、瓣鳃、筴及有孔虫等,其形成生物礁抗浪块体的主体部分。礁盖厚38.2 m,岩性主要为灰白色、浅灰色厚层块状粉晶白云岩、灰质云岩,沉积物主要来自前方被波浪打碎的礁屑,但可含有丰富的原地固着生长的造礁生物,以及各种生物碎屑,以亮晶胶结为主,溶孔发育。

礁核由下部的藻粘结礁、中部的海绵骨架—障积礁和上部的藻粘结礁组成。藻粘结礁厚13.1 m,主要发育浅灰色块状泥—粉晶藻粘结海绵礁灰岩,藻类十分发育,含海绵等生物碎屑,局部凝块石发育,主要为灰泥胶结,孔隙不发育;附礁生物有小型腕足、海百合、苔藓虫及有孔虫等;其上部的生屑滩厚11.3 m,为浅灰色块状生屑泥晶灰岩、灰白色中厚层棘屑云质灰岩,生屑主要为棘屑、筴和有孔虫等。海绵骨架—障积礁厚27.2 m,为灰白色块状生屑灰岩,海绵、藻类及其他生屑丰富,发育凝块石,主要为亮晶胶结,溶孔较发育;其上生屑滩厚3.2 m,岩性为灰色中层泥晶生屑灰岩,

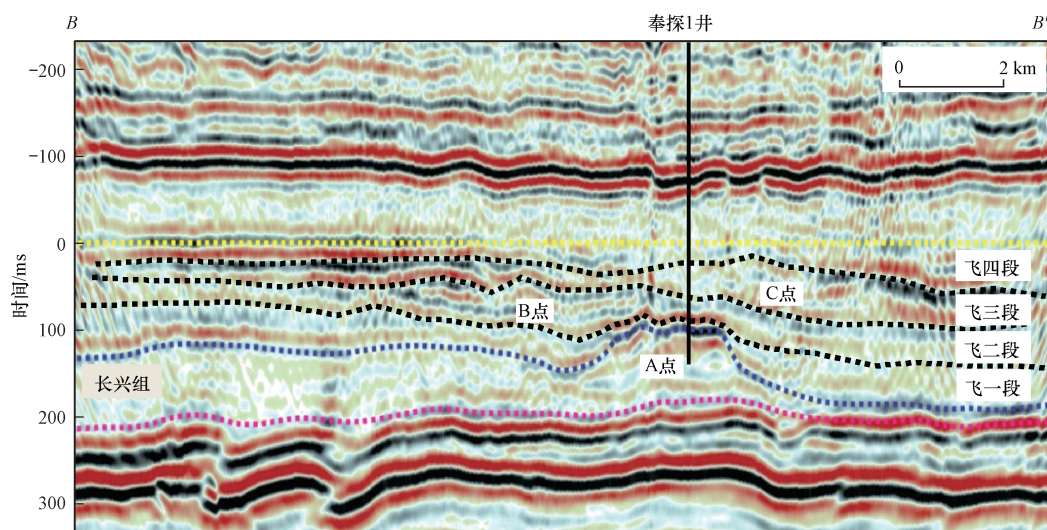


图4 鄂西—城口地区台缘带及台缘礁滩地震反射特征(剖面位置见图1 B—B')

Fig.4 Seismic reflection characteristics of the platform-margin zone and reef-shoal facies at the platform margins in E'xi-Chengkou area (see Fig.1 for the section location B—B')

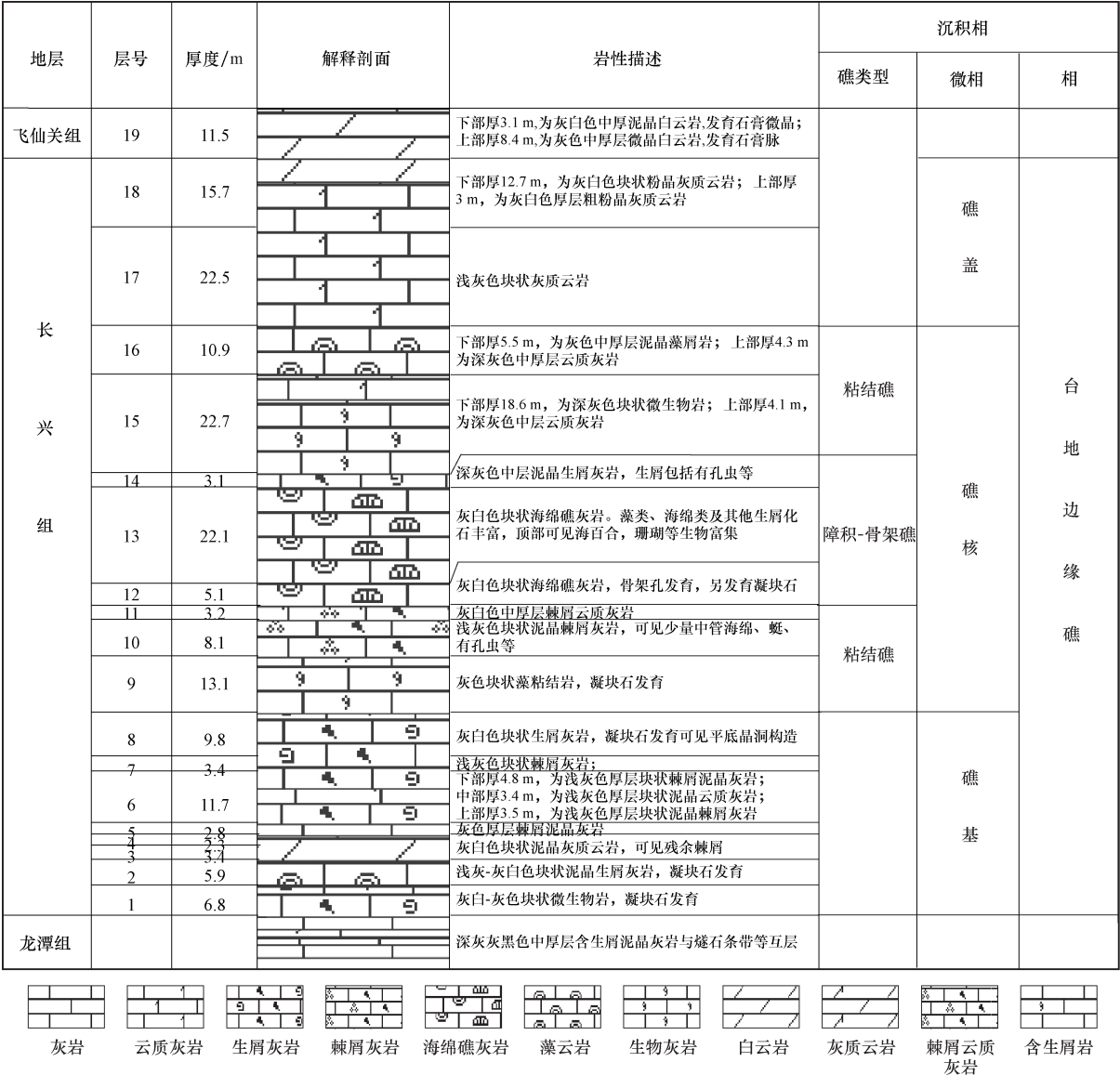


图 5 鄂西 - 城口地区红花剖面长兴组台地边缘生物礁综合柱状图

Fig. 5 Composite column of platform-margin reef in the Changxing Formation on Honghua section in E'xi-Chengkou area

生屑包括绿藻、有孔虫、腕足等。上部的藻粘结礁厚 22.7 m, 以深灰色厚层块状微生物岩为主, 含有孔虫等生物, 主要为灰泥胶结, 孔隙不发育; 其上生屑滩厚 10.9 m, 为灰色、深灰色泥晶藻屑灰岩, 藻屑主要为假蠕孔藻, 生屑主要包括筵、有孔虫和棘屑等。

长兴期台缘礁规模较大、分布较连续, 礁核厚一般 40 ~ 110 m、宽度约 10 ~ 20 km, 从开县红花剖面、渡口羊鼓洞剖面和宣汉盘龙洞剖面看, 区域面积约 400 km² 的范围内台缘礁明显发育 (图 6)。从台地向台缘方向, 礁核的厚度有变厚的趋势, 靠近台缘坡折礁核厚度越大、障积 - 骨架礁厚度越大。如开县红花剖面礁核厚 75.4 m、障积 - 骨架礁厚 27.2 m, 渡口羊鼓洞剖面礁核厚 49 m、全为障积 - 骨架礁, 宣汉盘龙洞剖面台缘礁的礁核厚 110 m、障积 - 骨架礁厚度 100 m。可能

是台缘坡折附近水体能量充足、养份充足, 有利于造礁生物生长, 有利于骨架礁和障积礁的生长。

3.2 飞仙关期台地边缘滩

主要由鲕粒灰岩、鲕粒白云岩 (图 2e)、粉晶白云岩、砂屑灰岩和少量泥晶灰岩等组成, 也有豆粒灰岩发育 (图 2f)。由于受波浪、潮汐水流或沿岸流的簸选, 水体较洁净, 鲕粒分选好、圈层较发育且颗粒含量高。滩体呈厚层 - 块状, 单层厚度大, 发育各种大型、中型板状或槽状交错层理, 单一剖面上的滩体纵向常由核形石灰岩演变为亮晶鲕粒灰岩, 顶部鲕粒含量增多、粒径变大、形成向上变浅的沉积序列。

由于位于台地边缘, 水体能量高, 有利于鲕粒的形成和堆集, 故沉积厚度大, 滩体厚度一般可达 20 ~ 100 m,

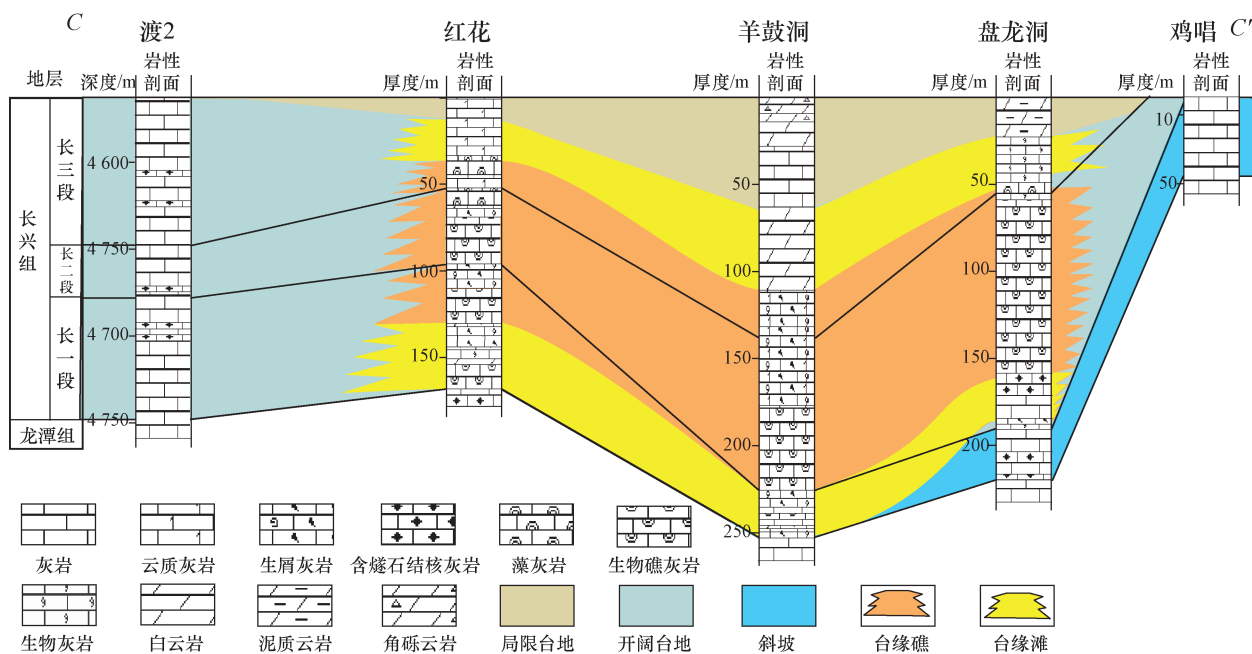


图6 鄂西-城口地区长兴组沉积相对比(剖面位置见图1 C—C')

Fig. 6 Sedimentary facies correlation of the Changxing Formation in E'xi-Chengkou area (see Fig. 1 for the section location C—C')

分布稳定。台缘滩常在台地边缘呈条带状分布,并随着台地的发展而迁移,具有明显的穿时性。台缘滩生长快,常呈凸起状,当海平面下降时,可以暴露出海平面,遭受大气淡水淋滤作用和混合水白云岩化作用^[27-30];在后期的改造中,鲕粒白云岩常被溶蚀形成大量的溶蚀孔,成为好的油气储集体^[31-32]。如双河剖面台缘鲕滩发育于飞仙关组二段中,飞二段厚86.4 m。下部为4.7 m的泥晶灰岩,顶部开始白云岩化;中部为46.21 m的浅灰色、灰色鲕粒白云岩,呈中厚层状,为典型的台缘鲕滩沉积;上部为35.48 m厚薄层状泥晶白云岩和泥质白云岩(图7);其中台缘鲕滩储层较好,46个样品孔隙度平均为6%,渗透率平均为 $3.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。鲕滩之间古地貌相对低的区域,沉积物主要为泥晶灰岩,夹少量薄层鲕粒灰岩,见双向交错层理,是广海与台地连通的潮道沉积。

与飞仙关组台内滩相比(如庙坝剖面的台内滩),台缘滩具有明显的特征:①厚度较大,一般大于20 m,最厚可达百米以上;②延伸范围较广,区域可以对比,如与双河剖面相距5 km的满月剖面,台缘鲕滩的特征非常相似;③鲕粒以正常鲕为主,约占90%以上,假鲕和表鲕少;④白云岩化程度较高,亮晶胶结物为主,可见大量孔隙。说明台地边缘水体能量大、水体清洁,鲕滩能持续沉积、大面积分布。

研究区飞仙关组台缘鲕滩主要发育于飞二—飞四段,飞二段和飞三段鲕滩厚度较大,分布连续,飞四段鲕滩厚度较小(图8)。从地震剖面上,可见随飞仙关

期台地演化和相对海平面下降,台缘鲕滩向盆地方向迁移明显,台缘滩从飞仙关组二段开始发育,奉探1井西侧飞二段厚度明显加大,呈扁平丘状杂乱地震相(图4, B点),是台缘滩的响应,向东地层厚度明显减小;飞三段沉积期,台缘滩明显向东迁移奉探1井东侧(图4, C点),其地震反射特征与B点相似。

受鲕粒滩的堆积速率与海平面频繁变化影响,研究区内台缘鲕滩纵向以加积、进积为主,鲕滩分布厚度较大,累计厚度一般30~80 m。随着台地向东的增生,台缘鲕滩不断向东迁移。从横切台缘带的连井剖面上看,飞二段台缘鲕滩发育满月—双河—石梁一线,鲕滩带宽约20 km,厚度稳定,3个剖面分别为31、40、75 m,都发生比较强烈的白云石化作用;飞三段台缘鲕滩迁移至宁厂一线,厚度与飞二段鲕滩带相近,宁厂剖面约60 m,白云石化作用相对较弱,以白云质灰岩为主;飞四段台缘鲕滩迁移至孔家沟一线,厚度较小,如孔家沟剖面台缘鲕滩发育于飞四段上部,厚约22 m,主要为鲕粒灰岩(图8)。

4 台缘带礁滩展布

长长期至飞仙关期研究区海平面整体表现为一个完整的二级旋回^[1,22],内部又有多期次一级海平面的变化,次级旋回期次有分歧^[23-26]。总体来看,长长期相对海平面为一上升过程,台缘礁滩逐渐发育,长长期中期达到繁盛;末期至飞一早期海平面达到最高,盆

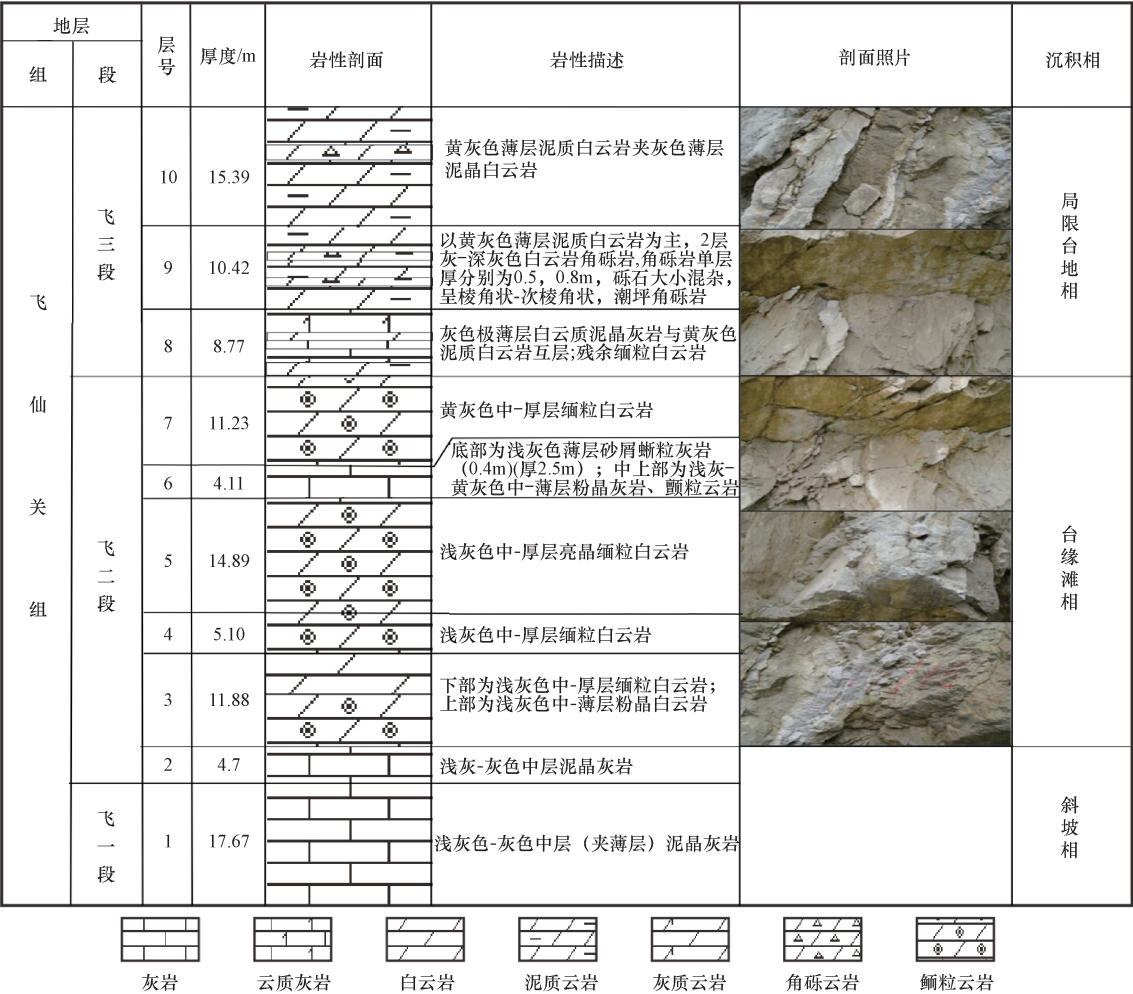


图 7 鄂西 - 城口地区双河剖面飞仙关组综合柱状图

Fig. 7 Composite column of the Feixianguan Formation on Shuanghe section in E' xi-Chengkou area

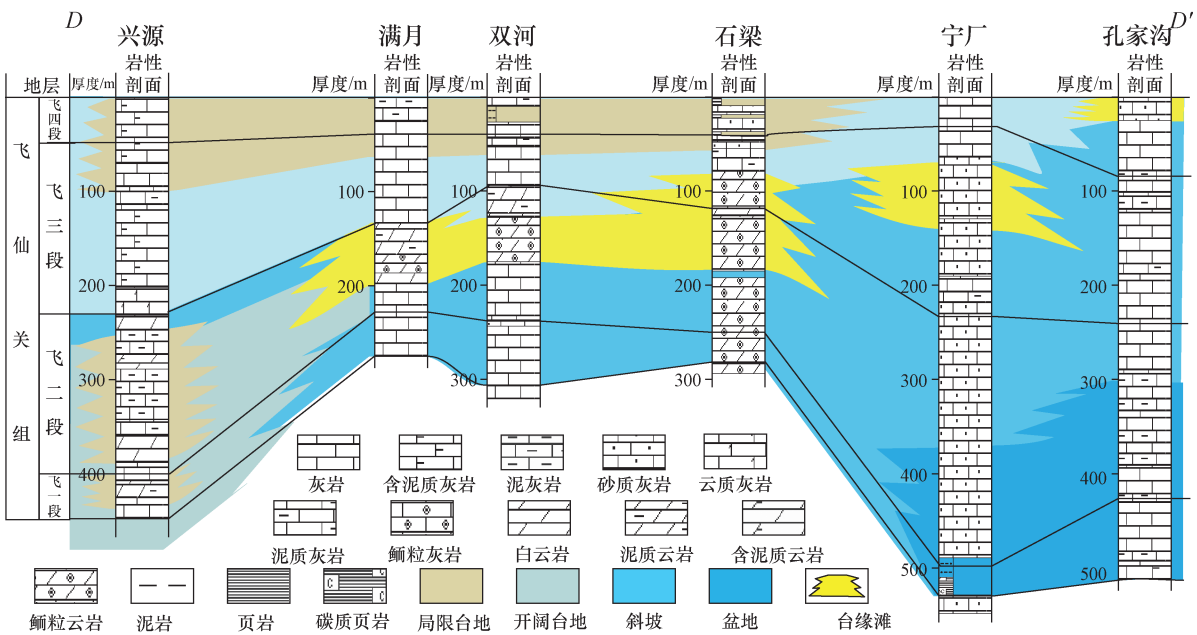


Fig. 8 Sedimentary facies correlation of the Feixianguan Formation in E' xi-Chengkou area (see Fig. 1 for the section location D - D')

地相面积最大;飞仙关期相对海平面为一下降过程,飞一后期海平面开始下降,台地逐渐增生;飞二期—飞三期随台地的拓展,台地边缘滩开始发育直至繁盛,飞四期研究区内台地进入均一化,广泛发育局限台地沉积(图6,图8,图9)。

4.1 台缘生物礁展布

研究区长兴早—中期开始海侵,相对海平面上升速度较快,海水自西向东逐渐加深,依次发育台地、台地边缘、斜坡和盆地相。以通江铁厂河—万源蜂桶—宣汉盘龙洞—巫溪尖山—巫溪田坝—奉1井—利川见天坝一线为界,界线以西发育台地沉积,台地内古地貌高的区域以发育台内滩或台内礁沉积为主。台缘带能量充足,适合生物生长繁殖,在万源蜂桶、宣汉盘龙洞、开县满月、奉探1井和见天坝等地一线以发育台缘障积—骨架礁为主,台缘礁沿台缘呈串珠状分布。界线以东为斜坡相,斜坡带坡度变陡、相带较窄。盆地相主要发育于斜坡带以东的城口庙坝、城口咸宜、巫溪龙台、楼1井和湖北恩施一带(图9a,图6)。

长兴中后期,海平面上升速度变缓,台缘带多细胞造礁生物停止生长,逐渐消亡,台缘礁以藻粘结礁为主,造礁生物主要为微生物和低等藻类,分布于万源蜂桶、宣汉盘龙洞和巫溪尖山等区域,推测开县满月、利

川见天坝以西也可能发育同类型的粘结礁,台缘礁沿台缘呈串珠状分布,台缘滩不发育。斜坡相发育于开县满月、巫溪龙台和利川见天坝一线的台地边缘外侧,盆地相主要发育于斜坡相以东地区。

长兴晚期,海平面上升速度进一步变缓,台缘带造礁生物停止生长,该时期相对海平面下降,以通江铁厂河、万源蜂桶、宣汉盘龙洞、开县满月、巫溪尖山和利川见天坝一线为界,界线以西发育开阔台地相及局限台地相;通江铁厂河、万源蜂桶、宣汉盘龙洞、开县满月、巫溪尖山和利川见天坝等一线台缘带发育台缘滩,台缘滩向广海方向进积,广泛发育于台缘相带之上,预测北部竹园1井以东地区也可能广泛发育台缘滩。斜坡相主要分布于巫溪龙台、城口咸宜等台地边缘外侧,斜坡带以东为盆地相沉积。

4.2 台地边缘滩展布

飞一段沉积初期,海平面为本次旋回最大时期,台地范围较小,结合区域资料,台地范围仅发育于区内北部古地貌高地,四周被较深水所包围,向东及东南方向依次发育斜坡及盆地相。北部开阔台地相主要发育在竹园1井、鹰1井、紫1井和朱家1井一带;局限台地相发育于金珠1井区。宣汉渡口、开县红花和菩萨1井一线发育台地边缘相,推测北部竹园1井以东地区

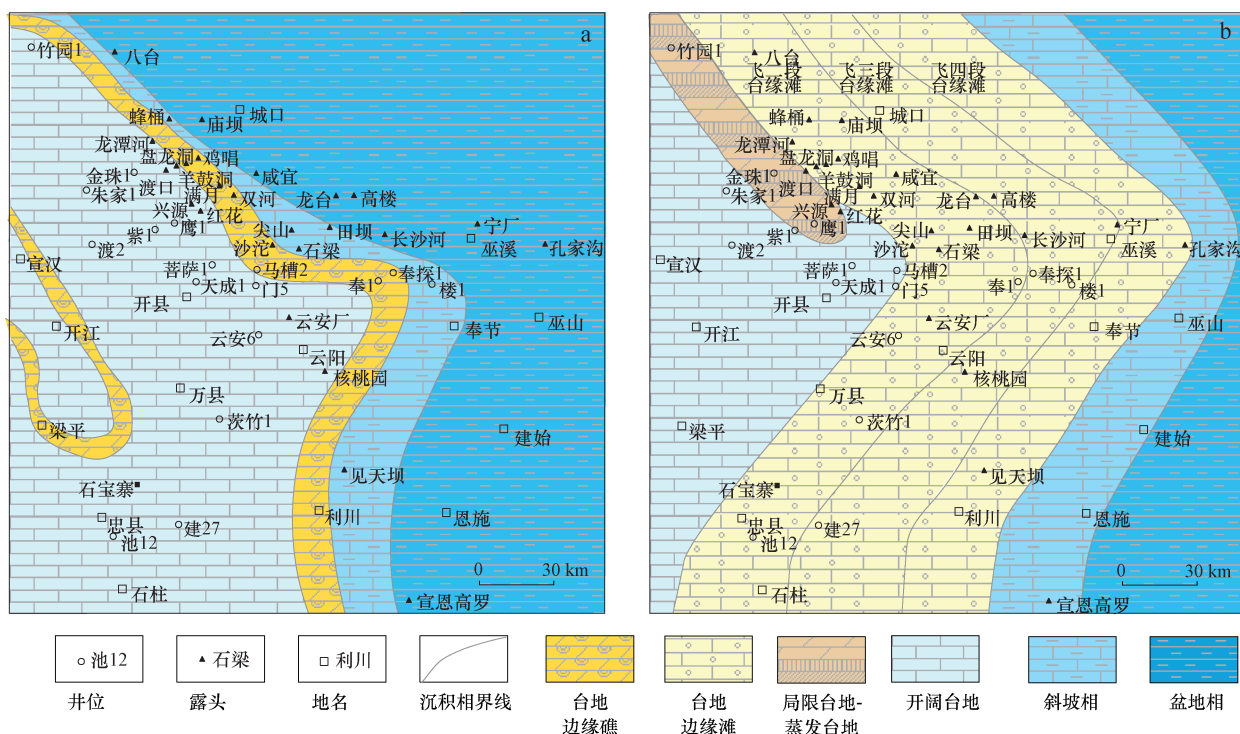


图9 鄂西—城口地区长兴期(a)、飞仙关期(b)岩相古地理与台缘礁滩分布

Fig. 9 Lithofacies palaeogeography and distribution of platform-margin reef-shoal facies during the sedimentation of Changxing (a) and Feixianguan (b) Formations in E'xi-Chengkou area

也有发育。斜坡相主要分布于万源八台、开县满月、巫溪尖山及楼1井以西地区。受大规模海侵作用及古地理格局影响,区内南部古地貌较低,南部石宝寨、建南与北部云安厂、楼1井连接成片,发育斜坡相沉积,相带宽广、岩性稳定(图9b)。

飞二段沉积期,相对海平面下降,北部孤立碳酸盐岩台地向四周增生。自西向东水体逐渐加深。台地、台地边缘、斜坡和盆地相依次发育。区内北部仍然为古地貌高,在竹园1井、金珠1井、渡口、鹰1井和龙潭河等地区发育局限台地相和蒸发台地相沉积(图2a)。开阔台地相主要分布于菩萨1井、马槽2井、门5井、天成1井和云安6井等地区;万源八台-开县满月、万州双河地区发育台地边缘相台地边缘滩亚相;斜坡相主要分布于区内北部城口庙坝、城口咸宜、奉探1井以及南部广大地区;以东十堰孔家沟地区则为盆地相沉积(图9b,图8)。

飞三段沉积期,相对海平面继续下降,仍然延续自西向东方向水体逐渐加深的趋势,几个相带仍依次发育,但相序依次向东迁移。以镇巴简池、万源八台、开县满月、巫溪尖山、马槽1井、建南地区一带为界,界线以西为发育开阔台地相,受海平面上升作用影响,台地内水体能量较低,多以滩间海微相沉积为主。台地边缘滩相发育于高楼、宁厂一线。盆地相主要发育于斜坡相带以东地区,如十堰孔家沟地区。飞三段沉积中晚期区域相对海平面下降明显,台地范围增生较为迅速。台地边缘滩亚相向西扩展并大面积分布,主要分布于镇巴、城口咸宜、巫溪宁厂一线,以及南部茨竹1井、建27井、池12井一线(图9b)。

飞四段沉积期,受相对海平面下降影响,区内大部分地区发育局限台地相潟湖-潮坪沉积,十堰孔家沟地区发育台地边缘滩亚相鲕粒滩沉积,台地边缘相向东进积明显(图9b)。

5 结论

1) 鄂西-城口地区长兴期-飞仙关期为镶边碳酸盐岩台地,由东向西依次发育盆地相、斜坡相、台缘礁滩相、开阔台地相、局限台地相和蒸发台地相。该区发育一条长兴组-飞仙关组台缘带,台缘坡折明显,礁滩分布连续、厚度较大、延伸范围较广。

2) 长兴期台缘礁由礁基、礁核和礁盖组成,礁核主要为粘结礁和障积-骨架礁,向台缘坡折方向,障积-骨架礁厚度变大;飞仙关组台缘滩以鲕粒白云岩和鲕粒灰岩为主,分布稳定,向盆地方向,台缘滩由飞二

段向上迁移到飞四段,飞二段台缘滩白云岩化程度相对较高。

3) 长兴期台缘礁主要分布于万源蜂桶、宣汉盘龙洞、开县满月、奉探1井和见天坝一带,飞仙关组台缘滩分布范围更大,飞二段台缘滩主要分布于万源八台-开县满月-万州双河、寨沟湾、石宝寨一带,与长兴期台缘礁基本叠合,飞三段、飞四段台缘滩迁移到飞二段台缘滩的东侧。

参 考 文 献

- [1] 杜金虎,徐春春,汪泽成,等.四川盆地二叠-三叠系礁滩天然气勘探[M].北京:石油工业出版社,2010.
Du Jinghu, Xu Chunhui, Wang Zecheng, et al. Reef and oolitic shoal gas exploration of Permian and Triassic in Sichuan Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [2] 邹才能,徐春春,汪泽成,等.四川盆地台缘带礁滩大气地质特征与形成条件[J].石油勘探与开发,2011,38(6):641-651.
Zou Caineng, Xu Chunhui, Wang Zecheng, et al. Geological characteristics and forming conditions of the large platform margin reef-shoal gas province in the Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 641-651.
- [3] 魏国齐,杨威,刘满仓,等.四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向[J].天然气工业,2019,39(6):1-12.
Wei Guoqi, Yang Wei, Liu Mancang, et al. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of giant gas fields in the Sichuan Basin [J]. NATURAL GAS IND. 2019, 39(6): 1-12.
- [4] 冉隆辉,陈更生,徐仁芬.中国海相油气田勘探实例(之一):四川盆地罗家寨大型气田的发现和探明[J].海相油气地质,2005,10(1):43-47.
Ran Longhui, Chen Gengsheng, Xu Renfen. Discovery and exploration of Luoiazhai gas field Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(1): 43-47.
- [5] 马永生,郭旭升,郭彤楼,等.四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J].地质论评,2005,51(4):477-480.
Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. Discovery of the large-scale Puguang gas field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting [J]. Geological Review, 2005, 51(4): 477-480.
- [6] 郭旭升,胡东风,李宇平,等.四川盆地元坝气田发现与理论技术[J].石油勘探与开发,2018,45(1):14-26.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yuping, et al. Discovery and theoretical and technical innovations of Yuanba gas field in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 14-26.
- [7] 沈安江,陈娅娜,张建勇,等.中国古老小克拉通台内裂陷特征及石油地质意义[J].石油与天然气地质,2020,41(1):15-25.
Shen Anjiang, Chen Yana, Zhang Jianyong, et al. Characteristics of intra-platform rift in ancient small-scale cratonic platform of China and its implications for hydrocarbon exploration [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 15-25.
- [8] 马永生.四川盆地普光超大型气田的形成机制[J].石油学报,

- 2007,28(2):9-14.
- Ma Yongsheng. Generation mechanism of Puguang gas field in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2007,28(2):9-14.
- [9] 郭旭升,黄仁春,付孝悦,等. 四川盆地二叠系和三叠系礁滩天然气富集规律与勘探方向[J]. 石油与天然气地质,2014,35(3):295-302.
- Guo Xusheng, Huang Renchun, Fu Xiaoyue, et al. Gas accumulation and exploration direction of the Permian and Triassic of reef-bank facies Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology,2014,35(3):295-302.
- [10] 胡向阳,郑文波,游瑜春,等. 四川盆地元坝长兴组礁滩相气藏概率体约束地质建模[J]. 石油与天然气地质,2020,41(1):157-163.
- Hu Xiangyang, Zheng Wenbo, You Yuchun, et al. Probability body-constrained geomodeling of reef-shoal reservoir in Changxing Formation, Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology,2020,41(1):157-163.
- [11] 郭军参,张辉. 礁滩型碳酸盐岩储层建模方法研究[J]. 石油地质与工程,2020,34(1):16-19.
- Guo Juncan, Zhang Hui. Study on modeling method of reef-shoal carbonate reservoir[J]. Petroleum Geology & Engineering,2020,34(1):16-19.
- [12] 王一刚,洪海涛,夏茂龙,等. 四川盆地二叠、三叠系环海槽礁、滩富气带勘探[J]. 天然气工业,2008,28(1):22-27.
- Wang Yigang, Hong Haitao, Xia Maolong, et al. Exploration of reef-bank gas reservoirs surrounding Permian and Triassic Troughs in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry,2008,28(1):22-27.
- [13] 王一刚,刘划一,文应初,等. 川东北飞仙关组鲕粒滩储层分布规律、勘探方法与远景预测[J]. 天然气工业,2002,22(S1):14-19.
- Wang Yigang, Liu Huayi, Wen Yingchu, et al. Distribution law exploration method and prospectiveness prediction of the oolitic beach reservoirs in Feixianguan Formation in north-east Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry,2002,22(S1):14-19.
- [14] 魏国齐,陈更生,杨威,等. 四川盆地北部开江-梁平海槽边界及特征初探[J]. 石油与天然气地质,2006,27(1):99-105.
- Wei Guoqi, Chen Gengsheng, Yang Wei, et al. Preliminary study of the boundary of Kaijiang-Liangping Trough in northern Sichuan Basin and its characteristics[J]. Oil & Gas Geology,2006,27(1):99-105.
- [15] 魏国齐,陈更生,杨威,等. 川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化[J]. 沉积学报,2004,22(2):254-260.
- Wei Guoqi, Chen Gengsheng, Yang Wei, et al. Sedimentary system of platform trough of Feixianguan Formation of Lower Triassic in northern Sichuan Basin and its evolution[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2004,22(2):254-260.
- [16] 马永生,牟传龙,谭钦银,等. 关于开江-梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质,2006,27(3):326-331.
- Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Tan Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang-Liangping oceanic trough[J]. Oil & Gas Geology,2006,27(3):326-331.
- [17] 邢凤存,陆永潮,郭彤楼,等. 碳酸盐岩台地边缘沉积结构差异及其油气勘探意义——以川东北早三叠世飞仙关期台地边缘为例[J]. 岩石学报,2017,33(4):1305-1316.
- Xing Fengcun, Lu Yongchao, Guo Tonglou, et al. Sedimentary texture diversity of different carbonate platform margins and its significance for petroleum exploration: A case study of carbonate platform margins in Feixianguan period of the Early Triassic, NE Sichuan basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica,2017,33(4):1305-1316.
- [18] 王一刚,文应初,洪海涛,等. 四川盆地开江-梁平海槽内发现大隆组[J]. 天然气工业,2006,26(9):32-36.
- Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, et al. Dalong Formation found in Kaijiang-Liangping oceanic trough in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry,2006,26(9):32-36.
- [19] 杨巍,张廷山,魏国齐,等. 城口-鄂西海槽西侧晚二叠世碳酸盐台地边缘发育新认识[J]. 高校地质学报,2015,20(1):79-93.
- Yang Wei, Zhang Tingshan, Wei Guoqi, et al. Sedimentological architecture of the Late Permian carbonate platform margin to the West of Chengkou-Western Hubei oceanic trough Sichuan China[J]. Geological Journal of China Universities,2015,20(1):79-93.
- [20] 李雄. 鄂西-渝东晚二叠世长兴期古地理格局及生物礁展布的再认识[J]. 古地理学报,2016,18(2):197-207.
- Li Xiong. Recognition of palaeogeographical pattern and organic reef distribution in the Late Permian Changhsingian in western Hubei and eastern Chongqing[J]. Journal of Palaeogeography,2016,18(2):197-207.
- [21] 彭才,郑荣才,陈辉,等. 开江-梁平海槽东侧长兴组生物礁发育主控因素及地震精细预测技术[J]. 石油实验地质,2019,41(4):614-620.
- Peng Cai, Zheng Rongcai, Chen Hui, et al. Reef control factors and new seismic prediction techniques of Changxing Formation, east of Kaijiang-Liangping Trough Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2019,41(4):614-620.
- [22] 赵宗举,周慧,陈轩,等. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J]. 石油学报,2012,33(S2):35-51.
- Zhao Zongju, Zhou Hui, Chen Xuan, et al. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zone of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2012,33(S2):35-51.
- [23] 魏国齐,陈更生,杨威,等. 覆盖区碳酸盐岩层序界面的识别——以川北下三叠统飞仙关组为例[J]. 石油勘探与开发,2003,30(6):68-72.
- Wei Guoqi, Chen Gengsheng, Yang Wei, et al. Distinguishing of sequence interface of carbonate rock in the covered field: An example for Feixianguan Formation Lower Triassic in Northern Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2003,30(6):68-72.
- [24] 马永生,牟传龙,郭彤楼,等. 四川盆地东北部飞仙关组层序地层与储层分布[J]. 矿物岩石,2005,25(4):73-79.
- Ma Yongsheng, Mu Chuanlong, Guo Tonglou, et al. Sequence stratigraphy and reservoir distribution of Feixianguan Formation in north-eastern Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology,2005,25(4):73-79.

- ditional stratigraphic division program for Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin; A case of Block Luo-38 and Luo-211 of Jiyuan Oilfield[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(6): 21–30.
- [12] 鞠玮, 尤源, 冯胜斌, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组致密砂岩储层缝特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 596–605.
- Ju Wei, You Yuan, Feng Shengbin, et al. Characteristics and genesis of bedding-parallel fractures in tight sandstone reservoirs of Chang 7 oil layer, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 596–605.
- [13] 蔡振家, 雷裕红, 罗晓容, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组7段页岩有机孔发育特征及其影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 367–379.
- Cai Zhenjia, Lei Yuhong, Luo Xiaorong, et al. Characteristics and controlling factors of organic pores in the 7th member of Yanchang Formation shale in the Southeastern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 367–379.
- [14] 高阳, 刘春, 白晓佳, 等. 自生“加大”含铁白云石胶结物特征及对致密砂岩储层的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组4+5段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 1065–1073.
- Gao Yang, Liu Chun, Bai Xiaojia, et al. Cement characteristics of overgrown authigenic ferron dolomite and its impact on tight sandstone reservoirs qualities; Case study of the Chang 4 & 5 members of Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 1065–1073.
- [15] 秦伟军, 付兆辉. 油气储量可升级性评价方法探讨[J]. *当代石油石化*, 2014, 2: 21–23.
- Qin Weijun; Fu Zhaohui. Probing into the methods for oil-gas reserves upgradability evaluation[J]. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2014, 230(2): 21–23.
- [16] 李友强. 济阳坳陷低渗透砂岩油藏控制储量升级评价[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(6): 36–40.
- Li Youqiang. Controlled reserves upgrade evaluation in permeability sandstone reservoirs of Jiyang Depression[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(6): 36–40.
- [17] 庄丽, 张玲. 基于控制储量升级率的油气探明储量增长趋势研究[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(2): 90–92, 117.
- Zhuang Li, Zhang Ling. Research on the growth trend of proven reserves of oil and gas based on the rate of escalation of controlled reserves[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(2): 90–92, 117.
- [18] 李洁梅, 谭学群, 许华明, 等. 概率法储量计算在CLFS项目中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(6): 944–950.
- Li Jiemei, Tan Xuequn, Xu Huaming, et al. Application of probabilistic method in reserve calculation for the CLFS oilfield project[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(6): 944–950.
- [19] 黄学斌, 李军, 闫相宾, 等. 圈闭资源量参数概率分布及有效性检验[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 577–584.
- Huang Xuebin, Li Jun, Yan Xiangbin, et al. Probability distribution of parameters for trap resources assessment and its validation[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 577–584.
- [20] 徐振邦, 娄元仁. 数学地质基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994: 27–28.
- Xu Zhenbang, Lou Yuanren. *Fundamental of mathematical geology* [M]. Beijing: Peking University Press, 1994: 27–28.

(编辑 张玉银)

(上接第672页)

- [25] 郑荣才, 罗平, 文其兵, 等. 川东北地区飞仙关组层序-岩相古地理特征和鲕滩预测[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 1–8.
- Zheng Rongcai, Luo Ping, Wen Qibin, et al. Characteristics of sequence-based lithofacies and paleogeography and prediction of oolitic shoal of the Feixianguan Formation in the north-eastern Sichuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 1–8.
- [26] 吴娜珠. 鄂西-渝东飞仙关组层序地层与滩体展布研究: 以建南及周缘地区飞仙关组三段为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(4): 524–529.
- Wu Nazhu. Sequence stratigraphy and reef beach distribution of Feixianguan Formation in western Hubei-eastern Chongqing area: A case study of the third member of Feixianguan Formation in Jiannan and adjacent area[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(4): 524–529.
- [27] Grotzinger JAI-Rawahi Z. Depositional facies and platform architecture of microbialite-dominated carbonate reservoirs Ediacaran-Cambrian Ara Group Sultante of Oman[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(8): 1453–1494.
- [28] Osburn M, Grotzinger J, Bergmann K. Facies stratigraphy and evolution of a middle Ediacaran carbonate ramp: Khufai Formation Sultanate of Oman[J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(8): 1631–1667.
- [29] 李开开, 张学丰, 贺训云, 等. 川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 706–718.
- Li Kaikai, Zhang Xuefeng, He Xunyun, et al. Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(4): 706–718.
- [30] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. *石油勘探与开发* 2015, 42(5): 545–554.
- Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 545–554.
- [31] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [32] 何治亮, 马永生, 张军涛, 等. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 1–14.
- He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhang Juntao, et al. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 1–14.

(编辑 梁 慧)