

川东北元坝地区长兴组生物礁发育模式与储层预测

武恒志¹, 吴亚军², 柯光明²

(1. 中国石化西南油气分公司, 四川成都 610041; 2. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041)

摘要:元坝气田长兴组气藏主体为埋藏超深的缓坡型台缘生物礁气藏,为解决气藏开发评价面临的生物礁发育模式复杂多样、储层分布规律不清、超深薄储层精确预测难度大等问题,本文探讨了海平面升降变化与生物礁发育模式的关系,分析了礁相白云岩储层发育主控因素,提出了生物礁储层预测的思路与方法,明确了生物礁储层平面展布特征。研究表明:元坝地区长兴组地层中共发育4期生物礁,受古地貌和海平面升降变化控制,单礁体可分为单期礁和双期(多期)礁两种模式。礁群可分为纵向进积式、纵向退积式、横向迁移式、横向并列式、复合叠加式5种模式;元坝地区生物礁储层发育主要受沉积背景、海平面升降变化、建设性成岩作用及构造破裂作用控制,垂向上储层主要发育于礁盖,横向上主要发育于礁顶,礁后次之,礁前较差。

关键词:生物礁;礁体刻画;储层预测;长兴组;元坝气田;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Bioherm development model and reservoir prediction of Changxing Formation in Yuanba area, Northeastern Sichuan Basin

Wu Hengzhi¹, Wu Yajun², Ke Guangming²

(1. Southwest Oil and Gas Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. Exploration and Production Research Institute, Southwest Oil and Gas Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The Changxing Formation reservoirs of Yuanba gas field are dominated by ultra-deep bioherm developed at ramp-type platform margin. Development appraisal of the gas reservoir is challenged by the diversity of reef development model, unclear reservoir distribution and great difficulty of precise prediction in ultra-deep and thin reservoir rocks. In order to solve these problems, we studied the relationship between sea-level changes and bioherm development model, analyzed the main controlling factors of reefal dolomite reservoirs development, proposed the ideas and methods of reefal reservoir prediction, and predicted the bioherm reservoir distribution. The results show that there are four-stage bioherms in the Changxing Formation of Yuanba area. For single bioherm, there are two reef development models which are controlled by paleo-geomorphology and changes of sea-level. One is single-stage and the other is double-stage (multi-stage). For reef groups, there are five development models including vertical progradation, vertical retrogradation, horizontal migration, horizontal paralleling as well as composite and superimposed model. The major factors controlling the development of favorable bioherm reservoirs in Yuanba area are sedimentary background, eustasy, constructive diagenesis and tectonic fracture. Vertically, the reservoirs mainly occur in the reef cap, while laterally, the reservoirs mostly occur in the reef crest, followed by reef back and reef front.

Key words: bioherm, reef characterization, reservoir prediction, Changxing Formation, Yuanba gas field, Sichuan Basin

元坝气田位于四川盆地东北部川北坳陷与川中低缓构造带结合部(图1),是世界上已发现的埋藏最深的高含硫生物礁大气田^[1-4],长兴组主体为位于开江-梁平陆棚西侧^[5-7]的缓坡型台缘生物礁沉

积^[8-11],礁体具有小、散、多期的特点^[9-12],储层厚度薄、物性差、非均质性强。随着国内高含硫天然气资源的不断发现,开发该类气藏,一方面是国家能源战略的重点发展方向之一;另一方面,国内外尚无成功先例。

收稿日期:2017-02-12;修订日期:2017-07-10。

第一作者简介:武恒志(1964—),男,博士、教授级高级工程师,油气田开发。E-mail:wuhengzhi_xnyq@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05017-005)。

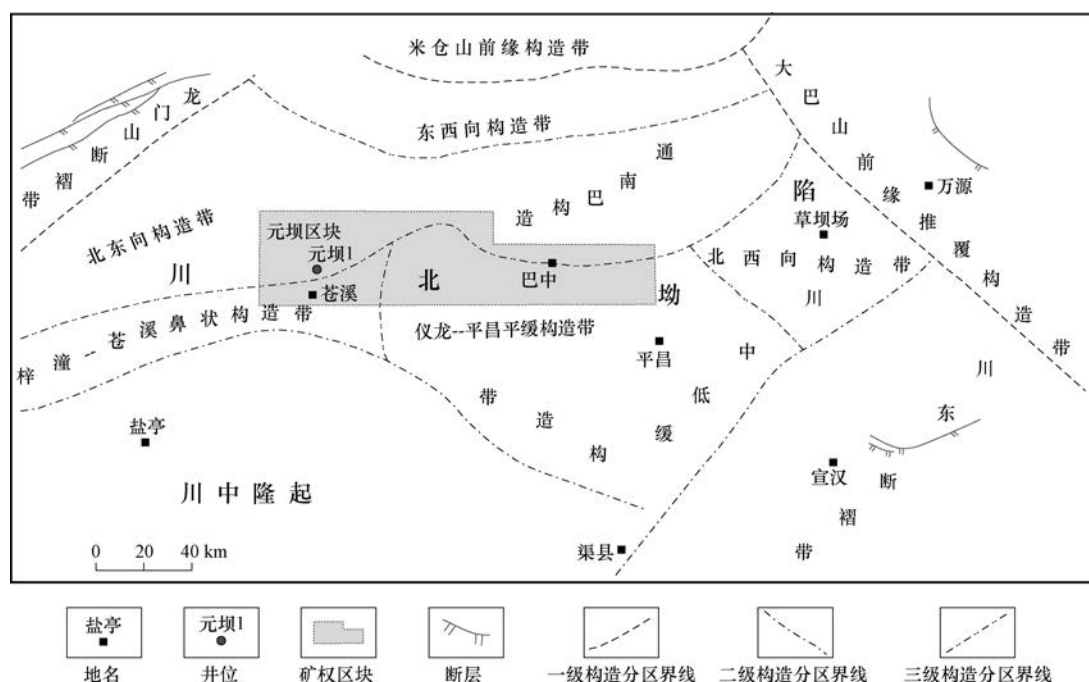


图1 川东北地区构造位置

Fig. 1 Structural location of northeastern Sichuan Basin

气藏开发评价面临三大难题:一是缓坡型台缘生物礁发育模式复杂多样;二是礁相白云岩储层分布规律不清;三是超深薄储层精确预测难度大。本文针对上述三大难题探讨了海平面升降变化与生物礁发育模式的关系、分析了礁相白云岩储层发育主控因素及其分布规律,提出了小礁体与生物礁微相精细刻画以及超深薄储层精确预测的思路与方法^[13-14]。

1 生物礁发育模式

1.1 层序地层格架内生物礁发育特征

1.1.1 层序划分及层序格架

元坝地区长兴组可分为上下两段,其岩电特征有明显差别:在岩性组合上,台地内部及台地边缘都反映出了两个旋回的特征,揭示了两个能量由低到高的沉积旋回;而在斜坡-陆棚相区其二分性不明显。在测井曲线上,自然伽马曲线及铀、钍、钾曲线明显表现为两个由小一大一小的旋回,旋回界面附近的曲线值有轻微突变的特征,每个测井曲线旋回可反映岩石中泥质含量由低—高一低的变化以及海水深度由浅—深—浅的特征,揭示了2个三级层序的发育。在地震剖面上,不同相区层序界面及体系域地震反射特征存在着一定差异,从台内—台缘—斜坡,三级层序与四级层序均可以对比追踪,而陆棚相区由于沉积厚度太薄,三级

层序难以对比追踪,四级层序难以识别。

根据岩性组合、测井曲线及地震反射特征将长兴组分为2个三级(SQ1, SQ2)和4个四级层序(SQ1-1, SQ1-2, SQ2-1, SQ2-2),下部SQ1层序由低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(HST)组成,上部SQ2层序由海侵体系域(TST)、早期高位体系域(EHST)和晚期高位体系域(LHST)组成(图2)。

1.1.2 层序地层格架内生物礁发育特征

元坝地区长兴组造礁生物主要为钙质海绵和藻类,其次为珊瑚、苔藓虫等;礁灰岩岩石类型包括骨架岩和障积岩两种,以障积岩为主;骨架岩造礁骨架生物含量较高,围绕造礁生物有藻包覆层发育,骨架间孔洞内海底胶结物柱状方解石生长充填特征清楚,代表能量较高的生物礁环境;障积岩造礁骨架生物及其骨架间为微晶灰泥和生屑微晶堆积,代表能量较低的生物礁环境。

通过岩心及全井段岩屑薄片观察分析,元坝地区长兴组上段及下段均有生物礁发育,共4期:第一期发育于SQ1层序高位体系域;第二期发育于SQ2层序海侵体系域;第三期发育于SQ2层序早期高位体系域;第四期发育于SQ2晚期高位体系域(图2)。可以看出,不同级别层序反映了生物礁发育的旋回与期次:三级层序反映了生物礁的沉积旋回;四级层序反映了生物礁的沉积期次。

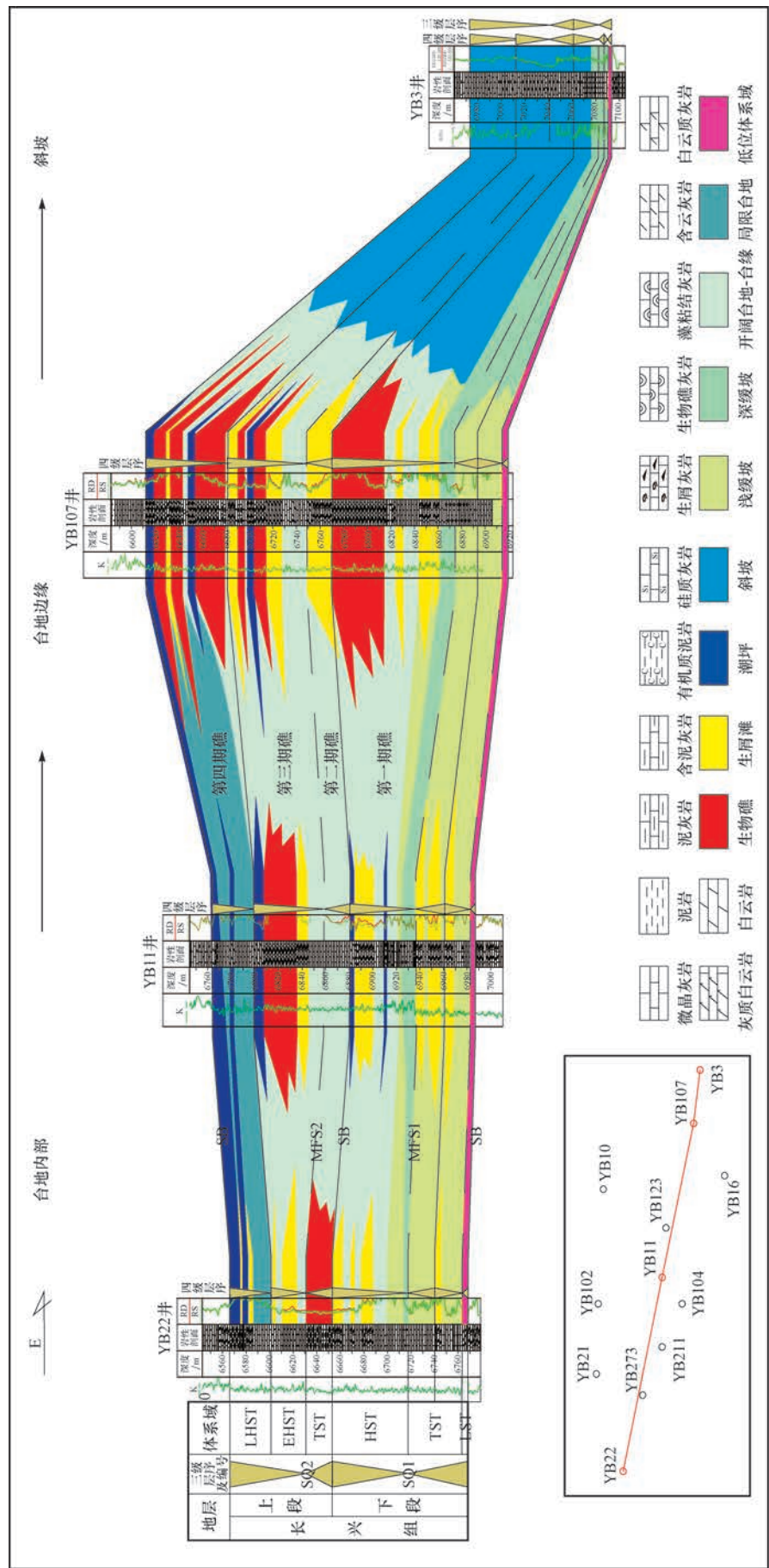


图2 元坝地区长兴组地层格架及4期生物礁发育对比

Fig.2 Sequence stratigraphic framework and four stages of bioherm development in the Changxing Formation, Yuanba area

1.2 生物礁发育主控因素

已有研究成果表明,作为晚二叠世长兴期生物礁形成、发育关键的生物体主要受如下因素控制:气候、养分供给、水体能量水平和循环情况、海底地形、地形构造高点、生物礁生长速率与盆地沉降速率之间的相互关系以及陆源碎屑物输入量等^[15-18]。通过对礁体发育位置、规模及期次的综合分析,川东北元坝地区长兴期生物礁发育受古地貌和海平面升降变化影响最大。

1.2.1 古地貌

古地貌高控制了生物礁发育的有利部位:对古今生物礁的研究发现,陆棚边缘、坡折带、台地边缘、台地内高地是生物礁最有利的发育环境,生物礁主要发育在这些环境的地形构造高点上^[18];川东北元坝地区长兴组生物礁主要发育于台地边缘和台内古地貌高部位。元坝地区台地前缘斜坡的坡度小,海水在到达台地边缘前,由于与斜坡摩擦,能量有所降低,海水动力弱,带到台地边缘的营养物质较少,因此,礁体的生长速度较慢、厚度较小。由于礁体厚度较小,障壁作用较弱,海水在通过生物礁以后,能量没有明显的降低,水动力条件仍然很强,这样在生物礁向台地方向沉积了礁后浅滩及点礁。因此,晚二叠世构造运动留下的古地貌特征控制着川东北地区长兴组生物礁的生长速度,影响礁后浅滩及点礁的发育。

考虑到元坝地区长兴组上覆地层飞仙关组主要为补偿沉积方式(至飞三段已填平补齐),可用印模法来编制古地貌图。具体的方法是在地震剖面上将最靠近地震反射异常体的上覆地层中比较稳定的标准地震反射同相轴(飞三段泥灰岩底)拉平,观察地震反射异常体是否处于生物礁发育的古地貌有利部位,目标层段是否有地层加厚现象,从而帮助判别生物礁体的位置,研究表明,元坝地区长兴组生物礁主要发育台地边缘构造高部位,礁带呈北西南东方向,越靠近东南段,古地貌位置越低,生物礁越不发育。

1.2.2 海平面升降变化

海平面的变化控制了生物礁在旋回中的沉积位置和生物礁的迁移^[19-20]:①在海侵体系域的早期到海平面上升到足以产生足够的循环前,碳酸盐岩处在饱和状态,碳酸盐岩的沉积滞后于初始海侵,这时,即使有生物礁,其生长速度也小于海平面上升速度。随后,

海平面快速上升,海水淹没早期生长的礁体,造礁生物死亡或生长缓慢。因此,某些地方的海侵体系域底部,会沉积薄层生物礁。②高位体系域早期,海平面上升速度减慢,继而静止。在适当的水深条件下,台地边缘生物礁开始快速加积生长,生物礁的生长速度大于海平面上升速度。当生物礁生长接近海平面时,生物礁停止加积生长。此时,生物礁开始向水动力强,水体较深的斜坡方向迁移。③高位体系域晚期,海平面下降,生物礁顶部暴露在海平面上,接受大气淡水的淋滤,礁顶发育白云岩。可见,在一次海平面升降的旋回中,最利于生物礁生长的时期是高位体系域沉积时期。根据生物礁生长速率与海平面升降速率之间的关系,生物礁的生长方式可分为终止型、追补型和并进型3种类型(图2)。

1) 终止型礁

终止型礁一般形成于镶边台地沉积模式下的海侵期,而缓坡沉积模式的海侵期不发育。其主要特征为:相对海平面快速上升,多数地区水体较深;仅在远离台缘的远端台内局部古地貌高部位发育,礁体因后期水体持续变深淹没而死亡;礁体规模小,沉积厚度薄。YB22井、YB224井SQ2层序海侵期形成的生物礁为典型的终止型礁。

2) 追补型礁

追补型礁一般形成于早期高位体系域(元坝地区长兴下段SQ1层序属于缓坡沉积环境,由于分辨率原因未划分出早、晚期高位体系域),其主要特征为:相对海平面缓慢上升,水体较浅,可容纳空间缓慢增加,以垂向加积为主;台缘生物礁生长较快,生物礁厚度较大;在近端台内局部古地貌高部位发育点礁(厚度一般小于台缘礁)。YB104井、YB11井SQ2层序高位早期形成的生物礁为典型的追补型礁。

3) 并进型礁

并进型礁一般形成于晚期高位体系域,其主要特征为:海水缓慢下降,常见侧积特征,富颗粒沉积;生物礁生长速度快,生物礁规模大,厚度大;主要发育于台缘地区,台内欠发育。YB107井、YB205井、YB27井SQ2层序高位晚期形成的生物礁为典型的并进型礁。

1.3 生物礁发育模式

元坝地区长兴组在沉积背景上属缓坡型台地边缘礁滩相沉积,受沉积期古地貌及海平面频繁升降影响,礁滩体具有小、散、多期的特点,由此导致生物礁发育模式复杂多样^[21-22]。在上述生物礁地质特征分析的

基础上,首先建立生物礁地质模型,再通过对生物礁地震剖面结构特征的综合分析,分别建立长兴组单礁体及礁群发育模式。

1.3.1 生物礁地震识别模式

通过已钻井实钻岩性数据建立起生物礁地质模型,并以该模型进行生物礁地震响应特征进行模型正演,建立了生物礁的地震识别模式(图3)。

1) 造礁生物生长速度快,生物礁的厚度比四周同期沉积物明显增大,生物礁外形在地震剖面上的反射特征多表现为“丘状”或“透镜状”凸起的反射特征。

2) 由于生物礁是由丰富的造礁生物和附礁生物形成的块状格架地质体,不显沉积层理,因此生物礁内部在地震剖面上多表现为断续、杂乱或无反射空白区等特征。但当生物礁在生长发育过程中伴随海水的进退而出现礁、滩互层,礁、滩沉积显现出旋回性时,也可出现层状反射结构。

3) 由生物礁的波形剖面上均可看出,生物礁礁盖呈强波谷-波峰“亮点”反射,同相轴连续平滑;表现在相位剖面上礁盖相位包络完整、期次明显。

4) 生物礁的外边界表现为礁间低能带高连续、平滑稳定强波峰反射的终止或分叉,同时在相位剖面上同

样表现为相位的分叉,礁基与礁盖强连续相位形成生物礁丘状外形包络,礁核内部则表现为弱连续相位特征。

1.3.2 单礁体发育模式

元坝地区长兴组生物礁单礁体可分为单期礁和双(多)期礁两种模式:单期礁纵向上仅发育一个礁基-礁核-礁盖成礁期,一般位于海侵体系域和早期高位体系域(表1);双(多)期礁纵向上发育两个(或两个以上)成礁期次,生物礁最发育的SQ2层序高位体系域以双期礁为主,即礁基-礁核-礁盖(位于早期高位体系域)+礁核-礁盖(位于晚期高位体系域)(表1)。

1.3.3 礁群发育模式

在建立单礁体发育模式的基础上,根据沉积古地貌的变化、生物礁构造起伏的变化、生物礁发育期次、礁盖包络振幅与阻抗的变化、复波反射等特征以及礁体间彼此的截切关系分析礁群的生长方式,总结出元坝地区生物礁最发育的长兴组上部SQ2层序高位期5种礁群发育模式,即纵向进积式、纵向退积式、横向迁移式、横向并列式、复合叠加式,每种模式对应特征如表1。

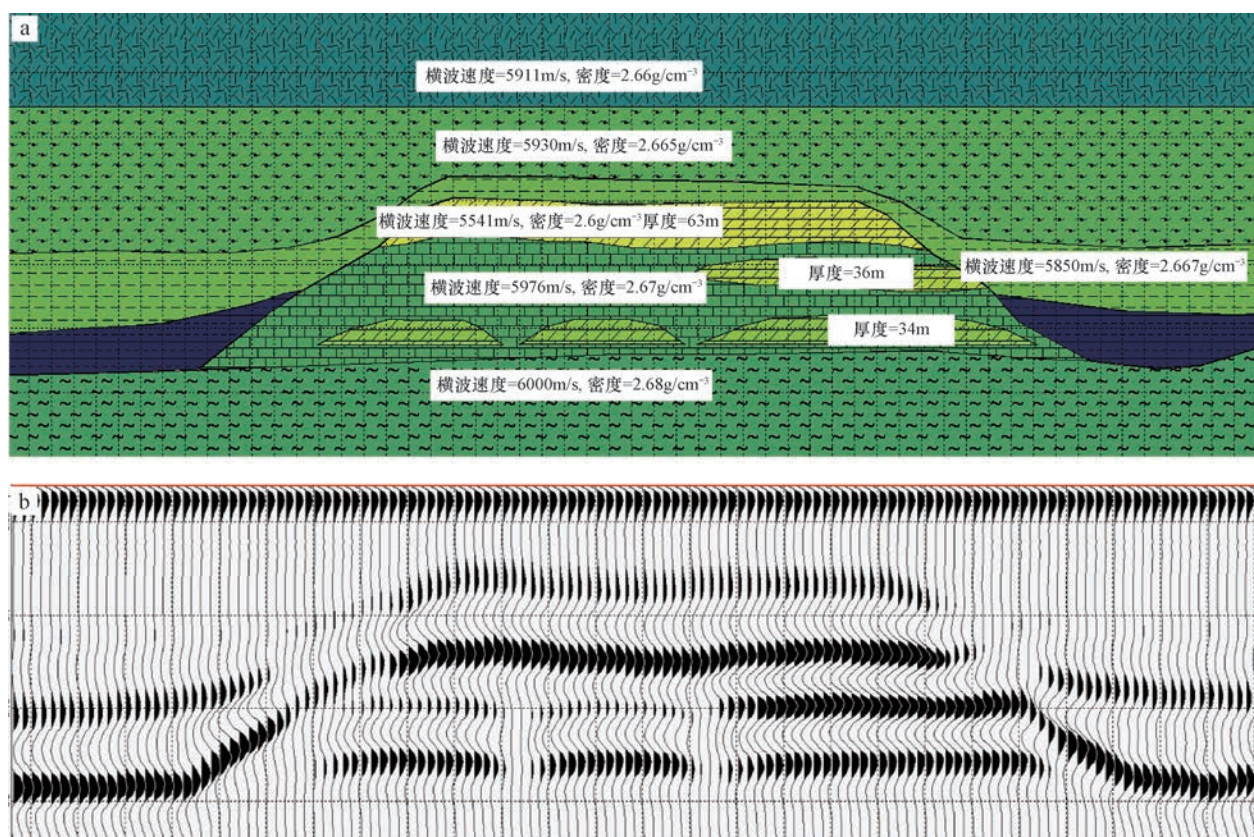
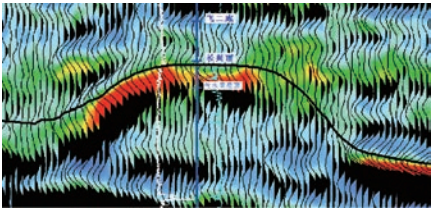
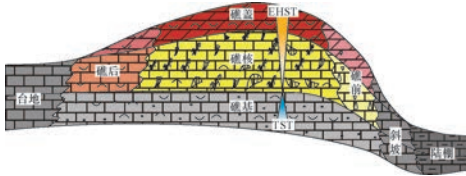
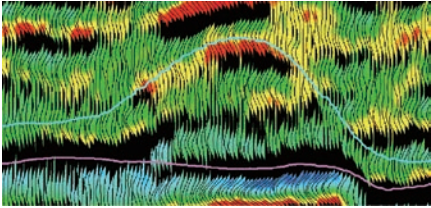
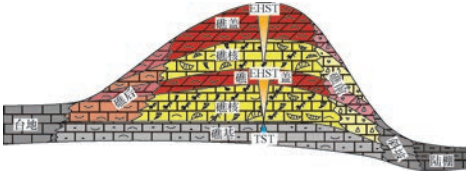
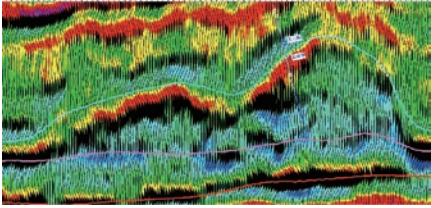
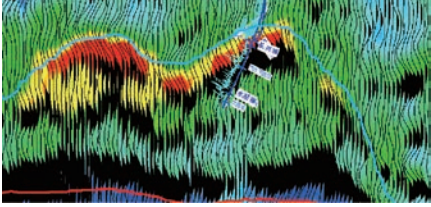
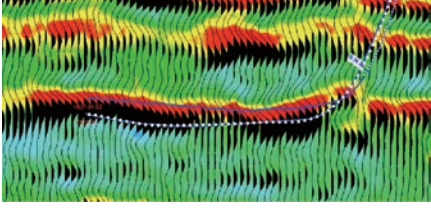
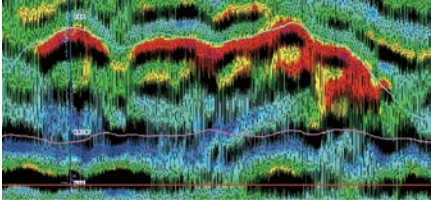
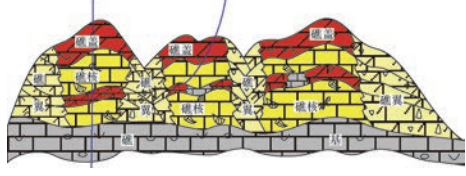
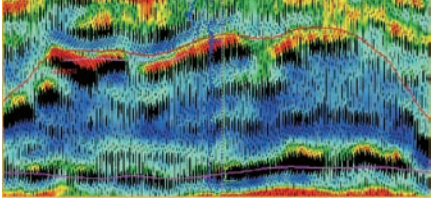
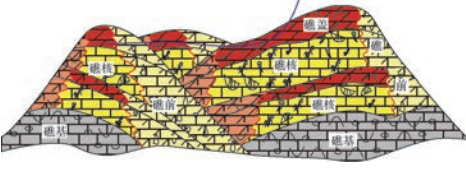


图3 元坝地区长兴组生物礁地质模型(a)与正演剖面(b)

Fig. 3 Geological model(a) and forward model(b) of bioherm in the Changxing Formation, Yuanba area

表 1 元坝地区长兴组生物礁发育模式及对应特征

Table 1 Development models and corresponding characteristics of bioherm in the Changxing Formation, Yuanba area

类型	地震剖面	生物礁发育地质模式	备注
单期礁			纵向上仅发育一个礁基 - 礁核 - 礁盖成礁期(一般位于海侵体系域和早期高位体系域)
双(多)期礁			纵向上发育礁基 - 礁核 - 礁盖(位于高位早期) + 礁核 - 礁盖(位于高位晚期)两(多)个成礁期次
纵向进积式			垂直礁带方向 2 个礁体; 礁盖包络构造变化剧烈; 礁体生长速率高于海平面升降速率, 后期礁在早期礁基础是向海进积生长
纵向退积式			垂直礁带方向 2 个礁体; 礁盖包络构造变化较大; 礁体生长速率低于海平面升降速率, 后期礁体在早期礁体基础是向陆退积生长
礁群			垂直礁带方向多个礁体; 礁盖包络有一定变化; 礁盖振幅发生多次强弱变化, 振幅变弱伴有复波反射; 晚期礁体顺礁带方向迁移生长
横向并列式			垂直礁带方向多个礁体; 礁盖包络变化剧烈; 礁盖振幅发生多次强弱变化, 振幅变弱伴有复波反射; 晚期礁体顺礁带方向迁移生长
复合叠加式			垂直礁带方向多个礁体; 礁盖包络变化较大; 礁盖振幅发生多次强弱变化, 振幅变弱伴有复波反射; 更晚期礁在横向迁移式礁群上生长

2 生物礁储层发育主控因素及分布规律

2.1 生物礁储层发育主控因素

2.1.1 沉积背景差异影响储层的平面展布

沉积背景的差异对生物礁储层的平面展布影响重大:元坝地区长兴组下部成礁旋回属碳酸盐缓坡背景下的点礁沉积,礁体发育局限、规模小,储层厚度薄、物性差;上部成礁旋回属缓坡型台地边缘沉积,礁体规模较大,储层较厚、物性较好。

2.1.2 海平面升降变化影响储层的纵向展布

元坝地区长兴组储层发育受三级层序控制,上部三级层序储层好于下部三级层序,这与海平面变化密不可分^[23-24]。长兴组下部三级层序发育时期处于海平面长期快速上升的过程,高位期海平面上升缓慢或有相对下降,但因处于快速海侵的背景之下,导致碳酸盐岩生产速率小于相对海平面上升的速率,从而在台地边缘形成追补型生物礁。碳酸盐岩暴露出海平面几率较小,不利于同生期白云石化作用的大范围发生,未能给后期溶蚀作用提供基础,所以储层发育程度相对较弱。上部三级层序处于由海侵到海退的过渡期,海平面上升速度有所下降,碳酸盐岩的生产速率基本和海平面上升速率保持一致,从而形成并进型生物礁,并在纵向上相互叠置。此时,高水位体系域海平面可出现多次短期升降波动,导致碳酸盐岩相应暴露出海平面几率较下部三级层序增高,有利于礁滩体中上部发生同生期白云石化作用并影响后期溶蚀作用,形成较好的储层(图4)。

2.1.3 建设性成岩作用控制储层的质量

岩相学及地球化学等研究表明,元坝地区长兴组储层形成过程中建设性成岩作用包括3期白云石化作用和4期溶蚀作用:3期白云石化作用分别为同生期高盐度白云石化作用、成岩早期浅埋藏白云石化作用及成岩早期热液白云石化作用;4期溶蚀作用分别为同生期及早成岩期大气水溶蚀作用、早成岩期热液溶蚀作用、中成岩期与有机酸有关的溶蚀作用及晚成岩期与TSR有关的溶蚀作用。其中早、中期白云石化作用是储层形成的基础,而中、晚期溶蚀作用是储层形成的关键。而差异性成岩作用控制了台地边缘生物礁储层纵横向变化与分布。垂向上,单期礁礁盖比礁基与

礁核更易暴露,发生早、中期白云石化作用与中、晚期溶蚀作用的几率大,礁盖储层最发育;双期礁发育过程中,晚期礁盖更易暴露,发生早、中期白云石化作用与中、晚期溶蚀作用的几率更大,晚期礁盖储层更发育。横向上,礁前早期高盐度白云石化作用程度低,储层以微粉晶白云岩为主,储层相对较差;礁顶早期高盐度白云石化作用与溶蚀作用均较发育,储层以细中晶白云岩为主,储层最好;礁后主要发育成岩早期浅埋藏白云石化作用,储层以细晶白云岩为主,储层较发育。

2.1.4 喜马拉雅期破裂作用改善储层的质量

喜马拉雅山期构造裂缝形成于气烃充注的成岩阶段,破裂强度较强,裂缝发育,几乎全部未被充填。有效裂缝形成了一定的储集空间,局部破裂严重,大大改善了储层岩石物性,对于长兴组储层渗透性的改善有重要意义。

2.2 生物礁储层分布规律

2.2.1 生物礁储层分布特征

在储层发育主控因素分析的基础上,通过对元坝地区长兴组30余口井测井解释储层厚度的统计,结果表明,平面上,台地边缘是生物礁储层发育的最有利相带,台地边缘生物礁储层均厚58.8 m,而台内生物礁储层均厚仅27.7 m。纵向上,储层集中发育和分布于上部成礁旋回(SQ2层序)高位体系域,尤以晚期高位体系域最为发育,储层均厚42.9 m,早期高位体系域储层均厚21.6 m;下部成礁旋回(SQ1层序)储层较差,仅高位体系域发育礁相储层,均厚16.1 m;上部成礁旋回海侵体系域生物礁储层最差,均厚约11.6 m。

2.2.2 礁体内部储层分布规律

在单井储层评价的基础上,分析横向上不同相区之间及垂向上不同微相储层发育特征,可以看出,生物礁储层,特别是优质I+II类储层集中发育于礁顶(盖),礁后次之,礁前相对较差。

单期礁体垂向上可分为礁基、礁核和礁盖,储层主要发育于礁盖,均厚39.9 m,礁核储层均厚14.8 m,礁基储层均厚0.6 m;双期礁以上部II期礁盖为主,II期礁盖储层均厚42.9 m,下部I期礁盖储层均厚21.6 m。

生物礁横向上可分为礁前、礁顶和礁后,储层主要

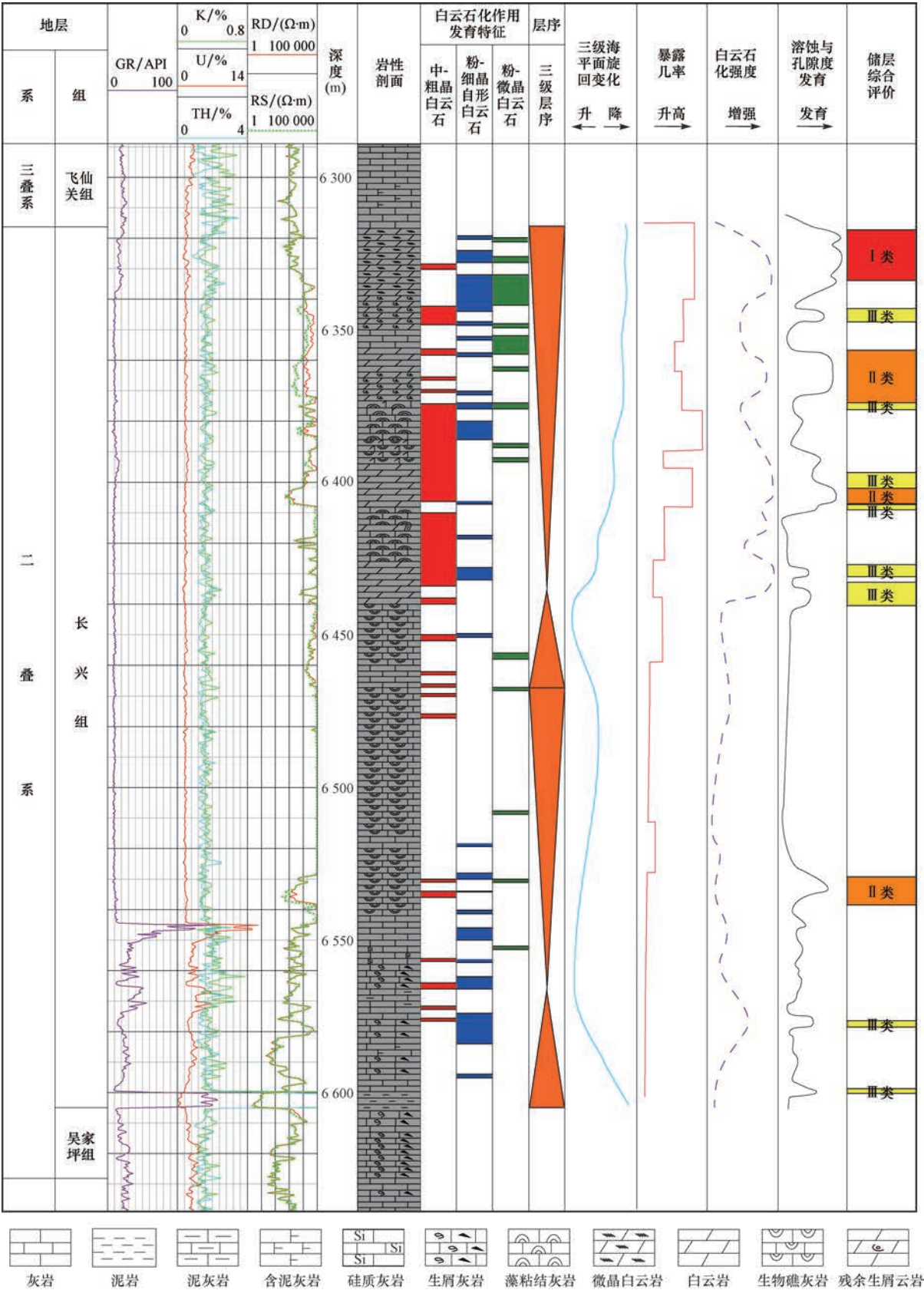


图 4 元坝地区长兴组 YB271 井海平面变化与储层评价综合柱状图

Fig.4 Composite column showing sea-level change and reservoir evaluation for Well YB271 of the Changxing Formation in Yuanba area

分布于礁顶,礁后次之,礁前相对较差,其中,礁前钻遇储层平均厚 32.6 m, I+II 类储层 9.5 m;礁顶钻遇储层平均厚 77.0 m, I+II 类储层 37.0 m;礁后钻遇储层平均厚度 38.3 m, I+II 类储层 11.0 m。

3 生物礁精细刻画与储层精确预测

3.1 礁体精细刻画

元坝地区长兴组生物礁具有礁体规模小、分布散的特点,礁体边界的识别是礁体精细刻画的关键。在生物礁地质发育模式及地震剖面识别研究的基础上,采用古地貌分析恢复沉积期古地貌高低变化初步确定礁群之间及礁群内礁体的边界(图 5a),再采用瞬时相位在剖面上精细反映岩性变化(图 5b),使得礁体之间的岩性边界更清晰,而频谱成像可以有效描述地质反射层厚度的非连续性和岩性的非均质性(图 5c),三维可视化技术可直观地展现礁带、礁群、礁体的边界及单礁体的空间分布(图 5d)。

采用古地貌分析、瞬时相位、频谱成像及三维可视化等技术相结合精细刻画礁体边界,针对元坝长兴组 4 条礁带和礁滩复合区,共刻画出 21 个礁群、90 个单礁体,单礁体相对较小,礁盖面积 0.12 ~ 3.62 km²。

3.2 生物礁微相精细刻画

3.2.1 生物礁沉积微相识别

1) 生物礁微相岩性识别

生物礁纵向上可划分为礁基、礁核、礁盖 3 种微相:礁基主要生屑灰岩和泥微晶灰岩,礁核主要为生物骨架灰岩,礁盖主要溶孔、针孔白云岩;横向上可划分为礁前、礁顶、礁后 3 种微相:礁前以以礁前角砾岩、砂屑灰岩为主要特征,礁顶主要为溶孔、针孔白云岩,礁后以生屑灰岩、残余生屑云岩为主(图 6a)。

2) 生物礁微相测井识别

纵向上礁盖以箱状中高电阻率、锯齿状高声波为特征,礁核电阻率高,礁基以极高电阻率,较低声波,曲线总体较平直为特征;横向上礁前电阻率极高,曲线平直,礁顶电阻率较高,曲线呈箱状,礁后电阻率高,曲线呈锯齿状(图 6b)。

3.2.2 生物礁沉积微相预测与描述

1) 礁体内幕纵横向反射结构特征

元坝地区长兴组生物礁垂向上一般呈“丘状”或“透镜状”,礁体顶面为较明显的强振幅反射界面,礁体底面可能出现断续反射现象,礁体内部杂乱反射

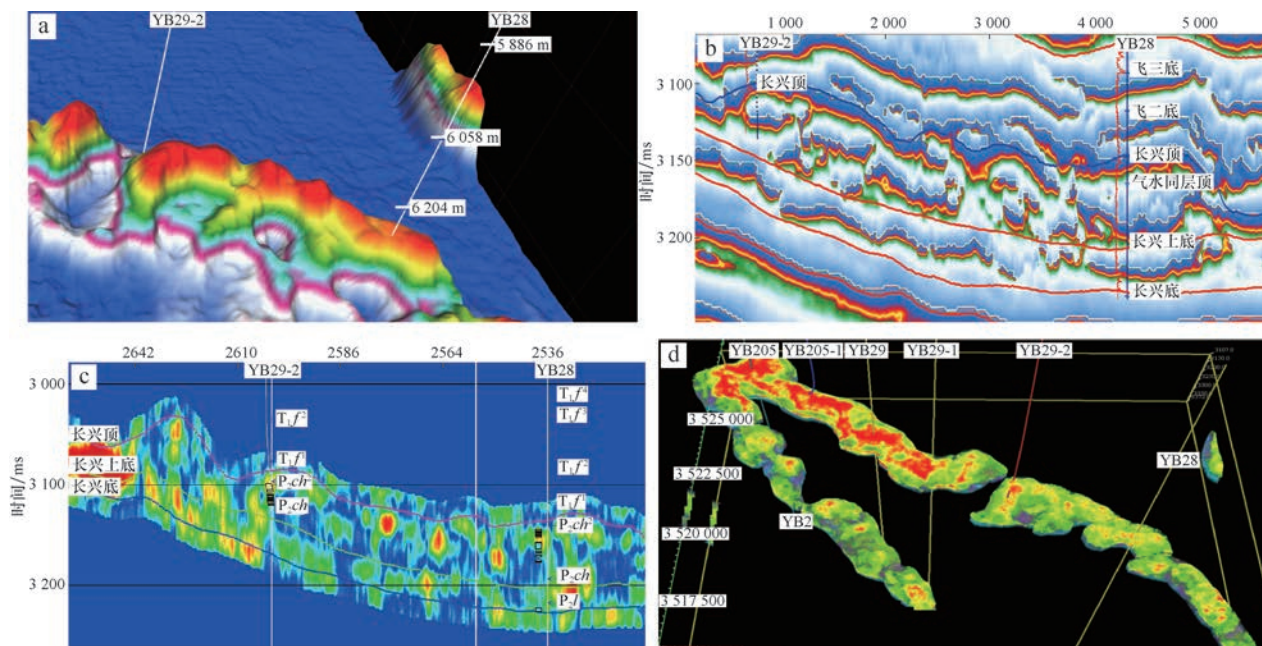


图5 元坝地区长兴组礁体精细刻画流程示意图

Fig. 5 Workflow for fine description of the reef in the Changxing Formation, Yuanba area

a. 古地貌初步确定礁群及礁群内礁体边界;b. 瞬时相位使礁体之间的边界更清晰;c. 频谱成像描述礁体之间的连通性;d. 三维可视化直观地展现礁体的空间分布

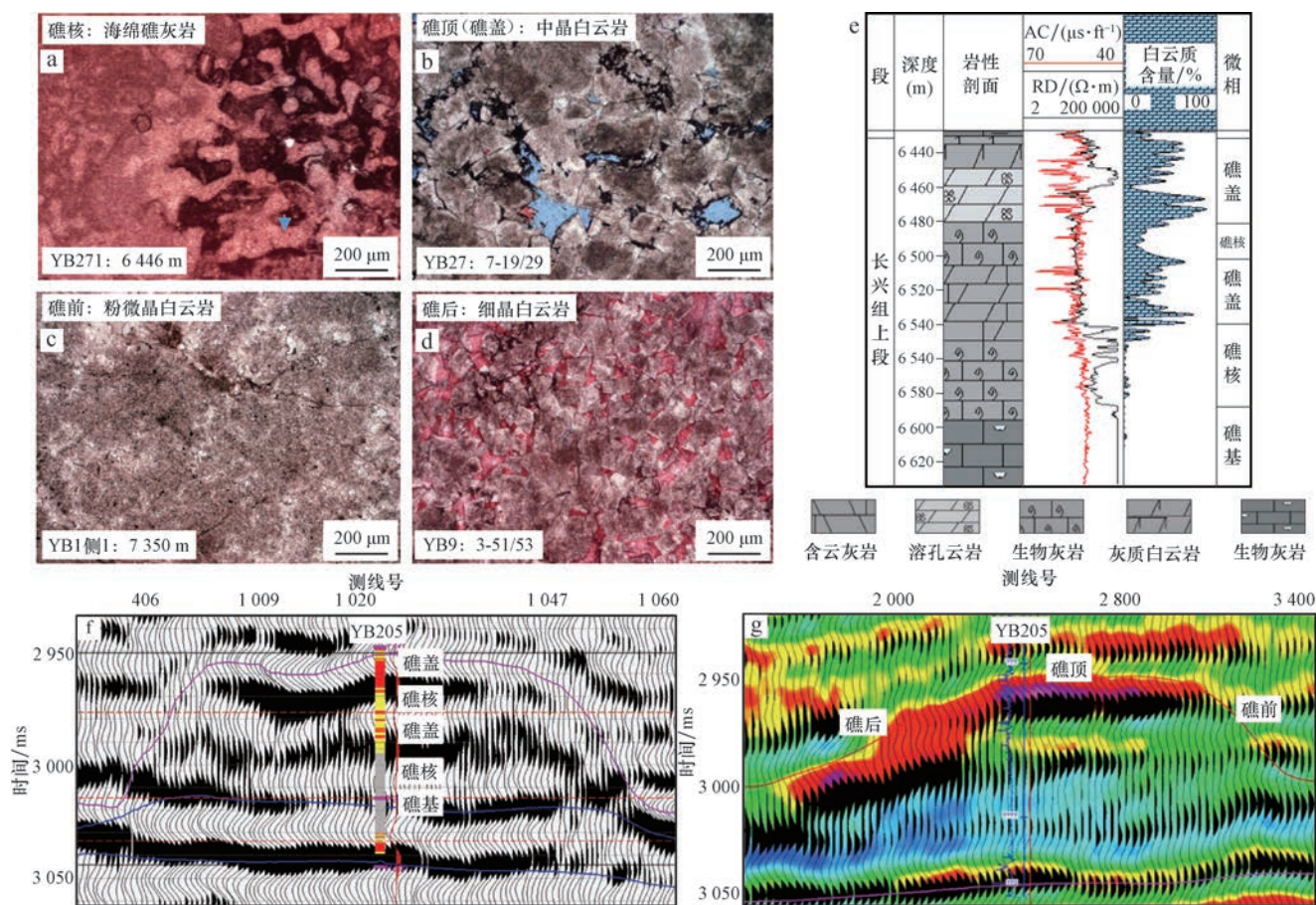


图6 元坝地区长兴组生物礁微相划分、识别及预测流程

Fig. 6 Workflow for micro-facies classification, identification and prediction of the bioherm in the Changxing Formation, Yuanba area

a, b, c, d. 生物礁不同微相岩性识别特征; e. 生物礁不同微相测井识别特征; f. 生物礁不同微相纵向反射结构特征; g. 生物礁不同微相横向反射结构特征

(图6c);横向上具“亮点”特征,不同微相区有不同的反射结构特征,礁顶具强幅、低阻的“亮点”特征,礁后具较强幅、较低阻的“亮点”特征,礁前具弱幅、中高阻的特征(图6d)。

2) 生物礁微相精细刻画结果

通过对礁体内幕纵向、横向反射结构特征的综合分析,结合单井礁体微相划分可以看出,元坝地区长兴组生物礁微相平面展布具有如下特征:②、③和④号礁带礁顶分布面积最大,①号礁带礁前面积大,礁滩叠合区礁后面积最大。

3.3 生物礁储层精确预测

3.3.1 礁体内幕纵向反射结构特征

元坝地区长兴组礁体内幕纵向反射结构可归纳为3种类型,即双强反射型、单强反射型和弱反射型。双强反射型是两期礁体纵向上叠置的响应,两期礁储层均发育,反映礁体规模大,储层厚、物性好(YB205井礁体反射结构为典型双强反射型);单强

反射型也是两期礁体纵向上叠置的响应,但储层仅发育于晚期礁,反映礁体规模中等,储层较厚、物性中等(YB10井礁体反射结构为典型双强反射型);弱反射型仅发育早期礁,且礁盖储层欠发育,反映礁体规模小,储层较薄、物性较差(YB22井礁体反射结构为典型双强反射型)。

3.3.2 生物礁储层厚度精确预测

在礁体精细刻画的基础上,集成应用沉积微相相控波阻抗反演、伽马拟声波反演、叠前地质统计学反演和相控叠前地质统计学反演,对礁体内部储层进行精确预测。沉积微相相控波阻抗反演预测储层总厚度;伽马拟声波反演去除泥质影响,提高Ⅰ类和Ⅱ类储层预测精度;叠前地质统计学反演剔除致密灰岩,提高Ⅲ类储层预测精度;相控叠前地质统计学反演充分考虑生物礁内部非均质性,提高生物礁内部储层预测精度(图7)。

储层预测结果表明:生物礁储层面积约155.19 km²;Ⅰ+Ⅱ类储层主要发育于②、③和④号礁带西北段,

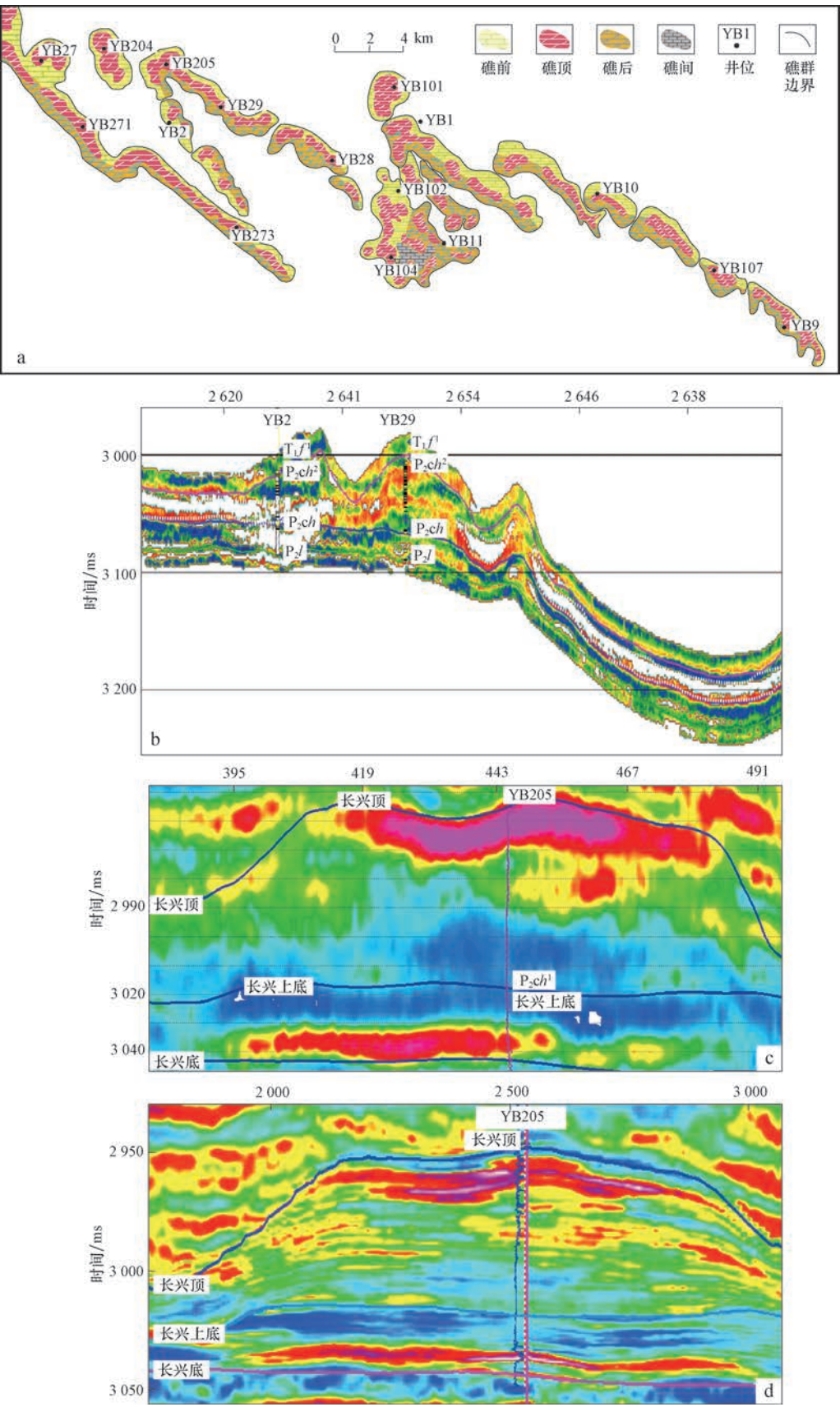


图 7 元坝地区长兴组生物礁储层厚度预测流程

Fig. 7 Workflow for thickness prediction of the bioherm reservoir in the Changxing Formation, Yuanba area

a. 以沉积微相为约束,多属性融合预测储层厚度;b. 伽马拟声波反演剔除泥岩,提高Ⅰ类和Ⅱ类储层预测精度;c. 叠前地质统计学反演剔除灰岩,提高Ⅲ类储层预测精度;d. 相控叠前地质统计学反演提高生物礁内部储层预测精度

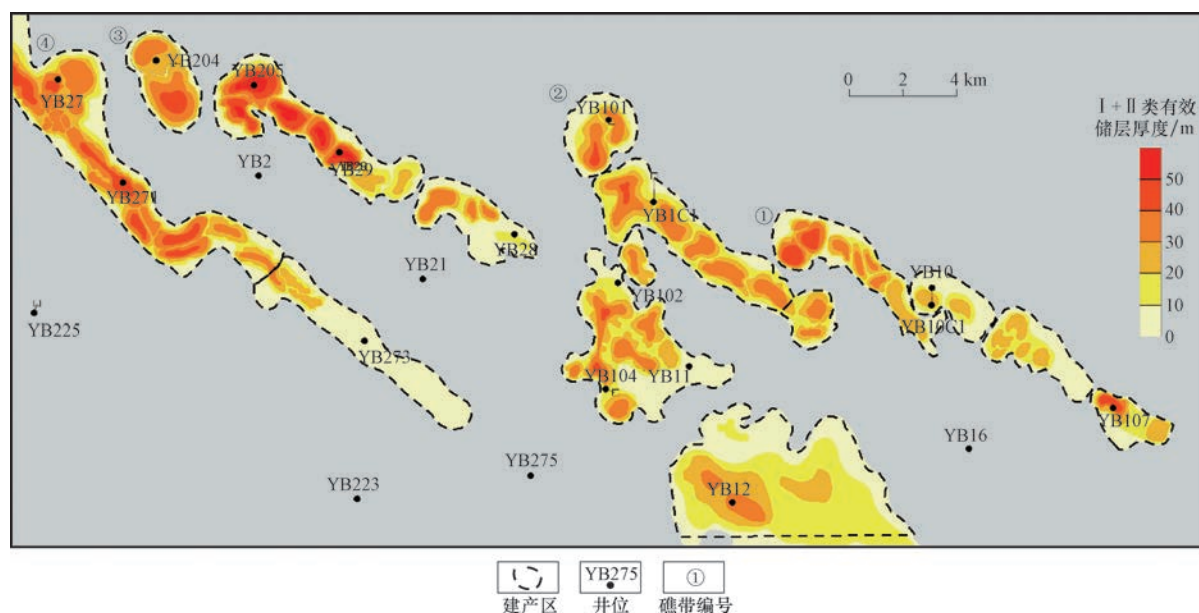


图8 元坝地区长兴组开发建产区有效储层厚度预测及开发井分布

Fig.8 Map showing the predicted effective reservoir thickness of the Changxing Formation and locations of development wells in Yuanba area

①号礁带和叠合区次之,礁带东南端最差。①号礁带 I+II 类储层均厚 25 m;②号礁带 I+II 类储层均厚 30 m;③号礁带 I+II 类储层均厚 40 m;④号礁带 I+II 类储层均厚 35 m;礁滩叠合区 I+II 类储层均厚 20 m (图8)。

4 应用效果

上述研究成果有力指导了元坝气田开发方案编制、井位部署、钻井实施及跟踪优化调整,方案设计 37 口生产井已全部完钻,开发部署新井(19 口)实施效果好,储层预测符合率达 95%,水平井储层钻遇率达 82%,单井平均无阻流量 $297 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,建成了我国第一个超深高含硫生物礁大气田,混合气产能达 $40 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。目前已有 24 口井投入生产,平均日产气 $813.65 \times 10^4 \text{ m}^3$,最高日产气 $1\,089.61 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

参 考 文 献

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘,2011,18(4):181-192.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181-192.
- [2] 贾承造,庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报,2015,36(12):1457-1469.
Jia Chengzao, Pang Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Pe-

- trolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469.
- [3] 黄福喜,杨涛,闫伟鹏,等. 四川盆地龙岗与元坝地区礁滩成藏对比分析[J]. 中国石油勘探,2014,19(3):12-20.
Huang Fuxi, Yang Tao, Yan Weipeng, et al. Comparison and analysis of reef-bank gas reservoirs in longgang and Yuanba Areas in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3): 12-20.
- [4] 张光亚,马锋,梁英波,等. 全球深层油气勘探领域及理论技术进步[J]. 石油学报,2015,36(9):1156-1166.
Zhang Guangya, Ma Feng, Liang Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration[J]. Acta Petroli Sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [5] 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 ocean trough[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(3): 326-331.
- [6] 徐安娜,汪泽成,江兴福,等. 四川盆地开江-梁平海槽两侧台地边缘形态及其对储层发育的影响[J]. 天然气工业,2014,34(4):37-43.
Xu Anna, Wang Zecheng, Jiang Xingfu, et al. Morphological characteristics of platform margins along the Kaijiang-Liangping Trough and their influences on reservoir development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 37-43.
- [7] 张兵,郑荣才,文华国,等. 开江-梁平台内海槽东段长兴组礁滩相储层识别标志及其预测[J]. 高校地质学报,2009,15(2):273-284.
Zhang Bing, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, et al. Identification criteria and prediction of reef and shoal facies reservoirs of the Changxing Formation in the Eastern Kaijiang-Liangping Area Intraplatform Trough[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(2):

- 273–284.
- [8] 陈辉,郭海洋,徐祥恺,等. 四川盆地剑阁–九龙山地区长兴期与飞仙关期古地貌演化特征及其对礁滩体的控制[J]. 石油与天然气地质,2016,37(6):854–861.
- Chen Hui, Guo Haiyang, Xu Xiangkai, et al. Features of paleogeomorphological evolution and its control on reef flat composite in Changxing-Feixianguan Formation in Jiange-Jiulongshan region, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 854–861.
- [9] 马永生,牟传龙,郭旭升,等. 四川盆地东北部长兴期沉积特征与沉积格局[J]. 地质论评,2006,52(1):25–31.
- Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Guo Xusheng, et al. Characteristic and Framework of the Changxingian Sedimentation in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2006, 52(1): 25–31.
- [10] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 元坝气田长兴组–飞仙关组礁滩相储层特征和形成机理[J]. 石油学报,2014,35(6):1001–1011.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. Characteristics and formation mechanisms of reef-shoal carbonate reservoirs of Changxing-Feixianguan formations, Yuanba gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1001–1011.
- [11] 王国茹,郭彤楼,付孝悦. 川东北元坝地区长兴组台缘礁滩体系内幕构成及时空配置[J]. 油气地质与采收率,2011,18(4):40–43.
- Wang Guoru, Guo Tonglou, Fu Xiaoyue. Characteristics and spatial-temporal configuration of platform margin reef-bank system, Changxing formation in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(4): 40–43.
- [12] 赵文光,郭彤楼,蔡忠贤,等. 川东北地区二叠系长兴组生物礁类型及控制因素[J]. 现代地质,2010,24(5):951–956.
- Zhao Wenguang, Guo Tonglou, Cai Zhongxian, et al. The controlling factors and types of carbonate reef of permian Changxing Formation in Northeast of Sichuan Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(5): 951–956.
- [13] 李宏涛,肖开华,龙胜祥,等. 四川盆地元坝地区长兴组生物礁储层形成控制因素与发育模式[J]. 石油与天然气地质,2016,37(5):744–755.
- Li Hongtao, Xiao Kaihua, Long Shengxiang, et al. Controlling factors and development models of biohermal reservoirs of the Changxing Formation in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 744–755.
- [14] 龙胜祥,游瑜春,刘国萍,等. 元坝气田长兴组超深层缓坡型礁滩相储层精细刻画[J]. 石油与天然气地质,2015,36(6):994–1000.
- Long Shengxiang, You Yuchun, Liu Guoping, et al. Fine characterization of ultra-deep reef-shoal reservoirs of ramp-type in Changxing Formation in Yuanba gas field, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 994–1000.
- [15] 王一刚,文应初,张帆,等. 川东地区上二叠统长兴组生物礁分布规律[J]. 天然气工业,1998,18(6):10–15.
- Wang Yigang, Wen Yingchu, Zhang Fan, et al. Distribution law of the organic reefs in Changxing Formation of Upper Permian in East Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 1998, 18(6): 10–15.
- [16] 何鲤,罗潇,刘莉萍,等. 试论四川盆地晚二叠世沉积环境与礁滩分布[J]. 天然气工业,2008,28(1):28–32.
- He Li, Luo Xiao, Liu Liping, et al. A Discussion on depositional environment in Late Permian and distribution of reef bank in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 28–32.
- [17] 刘治成,张廷山,党录瑞,等. 川东北地区长兴组生物礁成礁类型及分布[J]. 中国地质,2011,38(5):1298–1311.
- Liu Zhicheng, Zhang Tingshan, Dang Lurui, et al. Reef-forming types and distribution of organic reefs in Changxing Formation of northeastern Sichuan area[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1298–1311.
- [18] 赵邦六,杜小弟. 生物礁地质特征与地球物理识别[M]. 北京:石油工业出版社,2009:29–30.
- Zhao Bangliu, Du Xiaodi. Geological characteristics and geophysical identification of reefs[M]. Petroleum Industry Press, 2009: 29–30.
- [19] 邱燕,陈泓君,欧阳付成. 南海新生代盆地第三纪生物礁层序地层分析[J]. 南海地质研究,1999,53–66.
- Qiu Yan, Chen Hongjun, Ouyang Fucheng. Sequence stratigraphy of the Tertiary Rssfs in Cenozoic Basin of South China Sea[J]. Gresearch of Ecological South China Sea, 1999, 53–66.
- [20] 覃建雄,曾允孚,陈洪德,等. 右江盆地二叠纪生物礁层序地层学研究[J]. 地质科学,1999,34(4):506–517.
- Qin Jianxiong, Zeng Yunfu, Chen Hongde, et al. Sequence stratigraphy of Permian Reefs, Youjiang Basin, South West China[J]. Chinese Journal of Geology, 1999, 34(4): 506–517.
- [21] 李秋芬,苗顺德,江青春,等. 四川宣汉盘龙洞长兴组生物礁沉积特征及成礁模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2015,45(5):1322–1331.
- Li Qiufen, Miao Shunde, Jiang Qingchun, et al. Sedimentary characteristics and reef-forming model of Changxing Formation in Panlongdong Section of Xuanhan, Sichuan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(5): 1322–1331.
- [22] 牟传龙,谭钦银,余谦,等. 川东北地区上二叠统长兴组生物礁组成及成礁模式[J]. 沉积与特提斯地质,2004,24(3):65–71.
- Mou Chuanlong, Tan Qinyin, Yu Qian, et al. The organic reefs and their reef-forming model for the Upper Permian Changxing Formation in Northeastern Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2004, 24(3): 65–71.
- [23] 马永生,牟传龙,郭彤楼,等. 四川盆地东北部长兴组层序地层与储层分布[J]. 地学前缘,2005,12(3):179–185.
- Ma Yong sheng, Mou Chuanlong, Guo Tonglou, et al. Sequence stratigraphy and reservoir distribution of the Chan gxing Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 179–185.
- [24] 李宏涛,龙胜祥,游瑜春,等. 元坝气田长兴组生物礁层序沉积及其对储层发育的控制[J]. 天然气工业,2015,35(10):1–10.
- Li Hongtao, Long Shengxiang, You Yuchun, et al. Sequence and sedimentary characteristics of Changxing Formation organic reefs in the Yuanba Gasfield and their controlling effects on reservoir development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10): 1–10.