

层序地层与同位素地球化学响应特征及礁滩发育模式

——以川东城口—鄂西海槽边缘带长兴组为例

董庆民¹, 胡忠贵¹, 蔡家兰², 李世临², 苏楠³, 左洛滔¹, 秦鹏¹

(1. 长江大学 沉积盆地研究中心, 武汉 430100; 2. 中国石油 西南油气田公司 重庆气矿, 重庆 400021;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 川东地区上二叠统长兴组生物礁滩相带具有巨大的油气勘探潜力, 分析层序地层与同位素组成的响应特征及礁滩发育模式, 可为该区礁滩勘探提供可靠的地质依据。通过对城口—鄂西海槽边缘带典型露头剖面观察及层序地层分析, 结合长兴组碳同位素组成特征, 对长兴组层序地层与同位素地球化学响应特征及同一区域内礁滩发育模式进行了研究, 将长兴组划分为2个三级层序, 5个四级层序, 层序格架内碳同位素与海平面升降变化具有良好响应关系。不同沉积相带其礁滩发育模式具有明显差异, 迎风一侧的盘龙洞剖面处于最高能台缘相带, 礁滩最为发育, 云化作用明显, 储层发育; 背风一侧, 同属于台缘带的羊鼓洞剖面, 礁滩发育次之, 云化作用较弱; 而处于开阔台地的渡口剖面, 只发育台内颗粒滩沉积, 储层不发育。

关键词: 礁滩; 层序地层; 同位素地球化学; 长兴组; 上二叠统; 城口—鄂西海槽; 川东地区

中图分类号: TE121.34

文献标识码: A

Sequence stratigraphy and isotope geochemical response and development pattern of reef and shoal: a case study of Changxing Formation in the marginal zone of Eastern Sichuan Chengkou–Western Hubei Oceanic Trough

DONG Qingmin¹, HU Zhonggui¹, CAI Jialan², LI Shilin², SU Nan³, ZUO Mingtao¹, QIN Peng¹

(1. *Sedimentary Basin Research Center, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;*

2. *Chongqing Gas District, Southwest Oil and Gas Field Co., Ltd., PetroChina, Chongqing 400021, China;*

3. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China)*

Abstract: The Upper Permian Changxing Formation reef and shoal in the eastern Sichuan Basin has great potential for oil and gas exploration. The analysis of sequence stratigraphic and isotopic composition response as well as reef and shoal development patterns can provide a reliable geologic basis for reef and shoal exploration in this area. Observation of the typical outcrop section and the sequence stratigraphic analysis of the margin of the Chengkou–Western Hubei Oceanic Trough, combined with the carbon isotope composition of the Changxing Formation, show the sequence stratigraphic and geochemical response characteristics of the Changxing Formation and the reef and shoal development patterns. The Changxing Formation was divided into two third-order sequences and five fourth-order sequences. The carbon isotope distributions in the sequence framework have a good relationship with sea level fluctuation. There are obvious differences in the development patterns of reef and shoal in different sedimentary facies belts. The Panlongdong section on the windward side is in the highest energy platform margin belt, where reef and shoal are the most developed, the dolomitization of reef and shoal is obvious, and the reservoir is developed. In the Yanggudong section, which is on the leeward side of the platform margin, the development of reef and shoal takes the second place, and the dolomitization is weak. However, only the intra-platform grain shoal is developed in the Dukou section in the open platform, and reservoir is not developed.

收稿日期: 2018-10-11; 修订日期: 2019-02-11。

作者简介: 董庆民(1993—), 男, 硕士研究生, 从事沉积学方面的研究。E-mail: 416648529@qq.com。

通信作者: 胡忠贵(1979—), 男, 博士, 副教授, 从事储层沉积学方面的研究。E-mail: hzg1978@yangtzeu.edu.cn。

基金项目: “十三五”国家科技重大专项“重点海相层系构造—沉积响应与有利储层分布预测”(2016ZX05007002)和长江青年人才基金项目(2015cqr09)资助。

Key words: reef and shoal; sequence stratigraphy; isotope geochemistry; Changxing Formation; Upper Permian; Chengkou–Western Hubei Oceanic Trough; eastern Sichuan region

近年来,川东地区海相碳酸盐岩油气勘探取得了重大突破,尤其是普光等一批以礁滩相为储层的大型气藏的发现,展现了该区良好的勘探潜力,生物礁滩作为油气储集体越来越成为国内外学者研究的热点^[1-7]。层序地层学是进行沉积盆地分析和海平面变化研究的重要理论方法,层序地层的发育与海平面的升降紧密相关,海平面的变化对于层序发育及层序界面的识别有重要意义;碳、氧等同位素地球化学方法在海平面演化对比与反映成岩环境过程中扮演着十分重要的角色,因此可以作为层序地层划分和对比的一种指示性标志^[8-9]。前人对川东地区上二叠统长兴组生物礁滩特征、沉积环境、储层及碳氧同位素特征等进行过研究^[10-12],大多是基于区内较宏观的研究,但对局部重点区域的长兴组礁滩相沉积演化模式及其差异性对比尚不充分,而且将层序地层学与同位素组成特征这两个关键因素综合分析的研究相对缺乏。本文选取野外出露较好、处于同一台地区但不同位置的宣汉盘龙洞、羊鼓洞和渡口3条剖面,在对川东地区区域地质背景和层序地层分析的基础上,结合长兴组碳酸盐岩的碳同位素组成,对同位素变化特征与海平面升降变化、层序地层形成演化的关系进行分析对比,研究了局部重点区域长兴组礁滩相沉积演化模式及其差异性,以期为该区下一步的油气藏预

测及开发提供依据。

1 区域地质概况

四川盆地位于扬子准地台西部,北部紧邻秦岭褶皱带,西部为松滋—甘孜褶皱带。自震旦纪以来,研究区先后经历了加里东运动、海西运动等多期构造运动,区内海相沉积具有多元化的显著特点,不同区域、不同地质时期所接受的沉积物在沉积及成岩演化后形成了复杂多样的储集岩类型,尤以长兴组—飞仙关组礁滩相储层最为典型^[13]。本次研究的3条剖面自东向西依次为盘龙洞、羊鼓洞和渡口剖面(图1),构造上属于大巴山—米仓山前缘地带。盘龙洞剖面位于四川东北部宣汉县鸡鸣乡附近;羊鼓洞剖面位于宣汉县龙泉镇羊鼓洞隧道附近,距盘龙洞剖面约8 km;渡口剖面位于宣汉县樊哙镇向东5 km的渡口乡附近,距盘龙洞剖面约10 km。

2 地层特征与沉积格局

区域上长兴组地层发育广泛,是一套以礁相和非礁相并存的沉积体,厚度一般为76~375 m,其中有生物礁发育的区域对应沉积厚度略大。长兴组中下部主要发育灰色中—厚层至块状礁灰岩(图2a-b)、礁云岩(图2c)、泥晶生屑灰岩(图2d)、燧

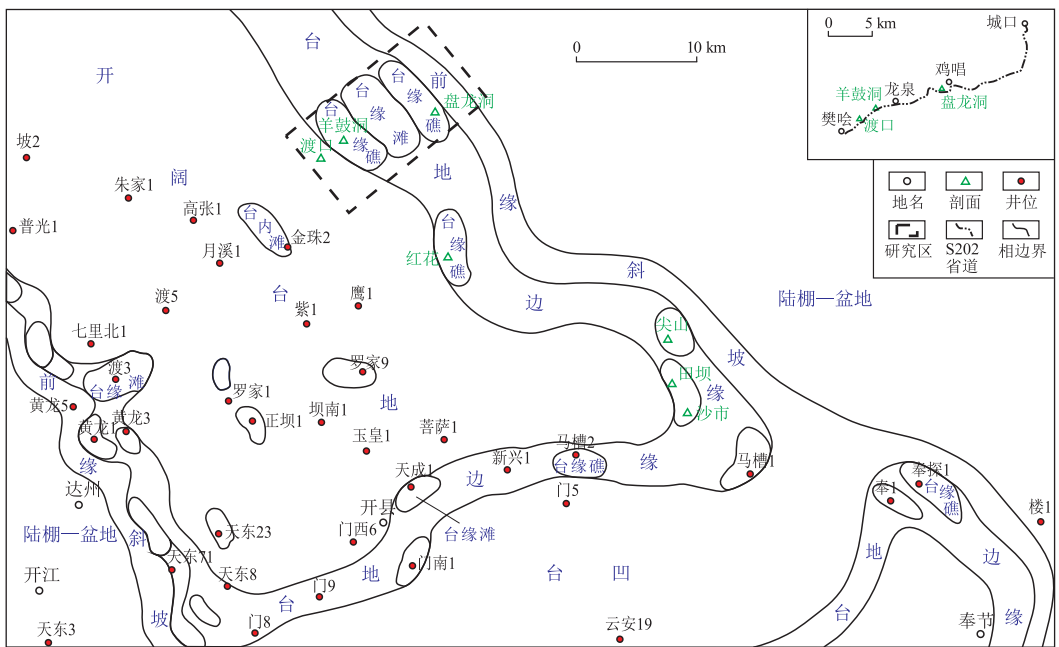


图1 川东地区晚二叠世长兴期沉积格局及研究区位置

Fig.1 Depositional pattern of the eastern Sichuan region during the Late Permian Changxing phase and the location of the study area

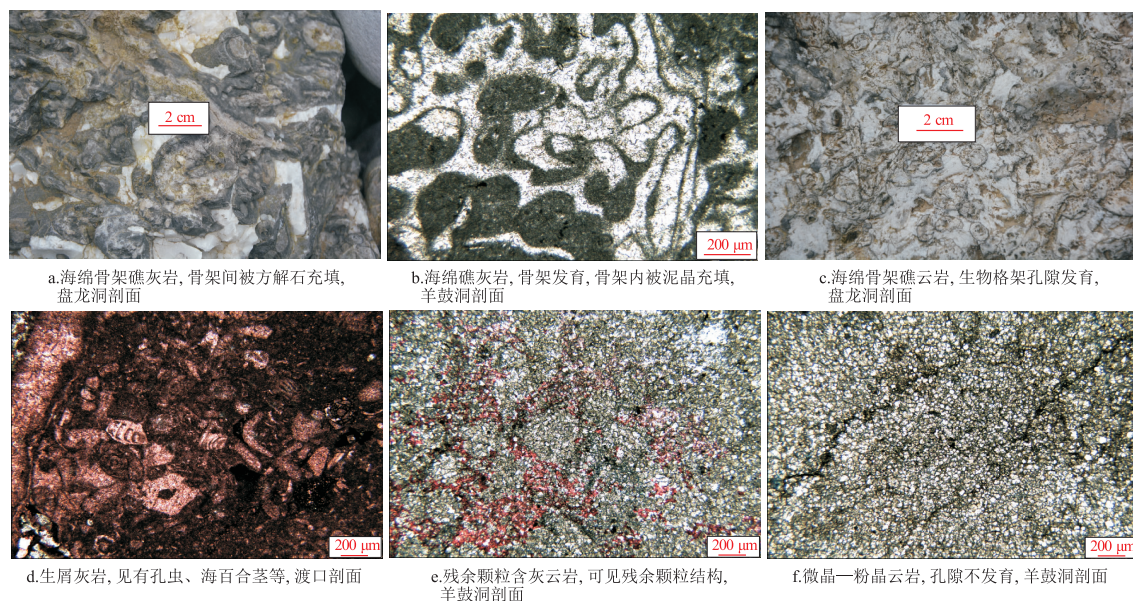


图2 川东地区城口—鄂西海槽边缘带上二叠统长兴组主要岩石类型

Fig.2 Main rock types of Upper Permian Changxing Formation in the marginal zone of Eastern Sichuan Chengkou—Western Hubei Oceanic Trough

石结核灰岩、泥质灰岩和泥晶灰岩等。以盘龙洞剖面为例,该剖面长兴组中下部发育海绵礁灰岩、礁云岩和生屑灰岩,造礁生物主要为海绵,附礁生物有腕足、海百合、蠕类及有孔虫等;上部岩性主要为浅灰色、灰色中—厚层至块状(残余)砂砾屑、鲕粒云岩(图2e)、晶粒白云岩(图2f)、含灰云岩和泥晶灰岩等。

特提斯构造在晚二叠世时期较为活跃,上扬子板块西缘因峨眉山玄武岩大范围喷发而发展成陆地,因此四川盆地总体上呈现西高东低的古地貌特征^[14]。盆地西侧海水较浅,东侧海水深,沉积区由西向东依次为陆相区、海陆交互相区、海相区沉积。在此期间,四川盆地处于拉张伸展构造环境下,台内断陷活动发育,在上扬子板块发育南充—绵阳、开江—梁平和城口—鄂西3个呈北西—南东方向展布的拗拉槽,整体形成了“槽台相间”的古地理格局^[15]。研究区主要位于城口—鄂西海槽西侧,自海槽向台地地方,沉积相带由陆棚—盆地向开阔台地相展布(图1)。由于研究区在长兴组沉积期整体处于低纬度区,充足的有机物质及古温度适合生物发育,在海槽两侧发育较大范围的生物礁及生屑滩相沉积。

3 层序地层划分

3.1 层序界面类型

层序和体系域边界的判别以及分析层序的结构特征是明确层序地层格架的基础^[16]。VAIL 依

据构造沉降和海平面升降变化相关联系对被动大陆边缘盆地进行研究,划分出I型和II型2种层序界面。值得注意的是同一类型的层序界面其表示方式也可能存在较大差异,比如I型界面,划分为角度不整合面或平行不整合面;II型层序界面可划分为暴露不整合面或岩性—岩相转换面^[17]。基于露头剖面观察及钻井资料分析,将研究区层序界面划分为暴露不整合和淹没不整合层序界面2种类型。

3.1.1 暴露不整合层序界面

局部暴露不整合层序界面发育于长兴组的中上部,与长一段、长二段和长三段的分界面一致。此时研究区为一套碳酸盐台地沉积,由于海平面的小范围下降而导致生物礁滩体顶部局部暴露,形成不连续的沉积间断面^[8],考虑区域对比此类界面属于II型层序界面。

城口—鄂西海槽边缘带局部暴露不整合层序界面主要表现为:①界面下部为台缘滩亚相生屑灰岩,界面上部为滩间亚相泥晶灰岩,此类型层序界面发育于台地边缘浅滩环境;②界面下部为微晶—粉晶白云岩,这是由于发育白云石化作用的结果,界面上部为台缘滩亚相粉—细晶砂屑灰岩,此类型层序界面发育于台地边缘生物礁—台地边缘浅滩环境;③界面下部为台缘滩亚相生屑灰岩,界面上部为滩间燧石结核灰岩,此类型层序界面发育于台地边缘浅滩环境。

3.1.2 淹没不整合层序界面

淹没不整合层序界面最早是在TUCKER提出

淹没型台地的基础上,由 SCHLAGER 将其界面定名为“淹没不整合面”,此后梅冥相等部分国内学者也证实了淹没不整合层序界面的存在。淹没不整合层序界面主要是因碳酸盐岩沉积速度小于海平面上升速度,碳酸盐岩的沉积发育遭受限制而造成的一种沉积间断面^[17]。从成因上判断此类层序界面亦属于 II 型层序界面。

城口—鄂西海槽边缘带淹没不整合层序界面表现为:①台地内部的淹没不整合界面,见于长兴组与下伏吴家坪组分界处,两者之间为岩性—岩相转换界面,界面下部为吴家坪组泥—微晶灰岩夹硅质条带互层,界面之上为泥质灰岩或生屑泥晶灰岩;②台地内部的淹没不整合界面,见于飞仙关组与下伏长兴组分界处,两者之间亦为岩性—岩相转换界面,界面下部主要发育生屑微晶灰岩、灰质云岩或微晶云岩,界面上部为灰质云岩、泥质灰岩或泥质云岩。

3.2 层序地层划分

研究区长兴组为一套由碳酸盐缓坡向碳酸盐台地转化的沉积,基于地震及钻井资料,结合 3 条典型露头剖面进行层序界面识别及层序地层分析,将长兴组划分为 2 个三级层序(自下而上依次为 SQ1 和 SQ2),并进一步根据岩相变化特征细分为 5 个四级层序(自下而上依次为 sq1、sq2、sq3、sq4 和 sq5),海侵体系域和高位体系域界线明显(图 3)。

盘龙洞和羊鼓洞剖面长兴组 sq1—sq2 由碳酸盐缓坡—台地边缘生物礁沉积构成,sq1—sq2 内海侵体系域和高位体系域发育。海侵体系域主要由浅水缓坡亚相的微晶灰岩和泥质灰岩组成,夹硅质条带;高位体系域主要由礁基及礁核亚相的生屑灰岩、礁灰岩、礁云岩组成。渡口剖面长兴组 sq1—sq2 为一套碳酸盐缓坡—开阔台地相沉积,海侵体系域发育浅水缓坡亚相的泥晶灰岩,高位体系域主要由台内滩亚相的生屑灰岩和潮下亚相的泥晶灰岩组成。

进入 sq3 时期后,只发育高位体系域而无海侵体系域存在。盘龙洞剖面在此时期仍为一套台地边缘生物礁相,发育完整的礁基、礁核、礁顶亚相;岩性主要为礁灰岩、砂屑泥晶灰岩、微晶—粉晶云岩。羊鼓洞剖面和渡口剖面则无生物礁发育,羊鼓洞地区已进入台地边缘浅滩沉积,主要发育台缘滩亚相的生屑灰岩沉积;渡口地区为一套开阔台地沉积,主要由潮下亚相的泥晶灰岩和台内滩亚相的生屑灰岩沉积组成。

随着台地边缘生物礁沉积的结束,研究区进入

sq4 时期,sq4 内部发育海侵体系域和高位体系域。盘龙洞和羊鼓洞剖面为台地边缘浅滩沉积,盘龙洞剖面海侵体系域及高位体系域主要由台缘滩亚相的砂屑灰岩和砂屑沉积组成,中部夹薄层的鲕粒灰岩;羊鼓洞剖面海侵体系域主要发育滩间亚相的泥晶灰岩沉积,高位体系域是由台缘滩和滩间亚相的生屑灰岩、泥晶灰岩、云质灰岩沉积组成。渡口剖面与前两者存在较大的区别,渡口剖面在海侵及高位体系域主要为潮下亚相的燧石结核灰岩及泥晶灰岩沉积,在顶部发育白云岩。

由于古地貌形态及沉积相带的差异,渡口剖面在 sq5 时期进入开阔台地—局限台地沉积,sq5 内发育海侵和高位体系域,海侵和高位体系域由潮下亚相的泥晶灰岩和潮坪亚相的白云岩沉积组成。羊鼓洞及盘龙洞剖面在该层序仍由台地边缘浅滩沉积构成,不同的是羊鼓洞剖面在 sq5 内亦存在海侵和高位体系域,其由滩间亚相的泥晶灰岩和白云岩沉积组成;而盘龙洞剖面在 sq5 内部只发育高位体系域,高位体系域主要由台缘滩亚相和滩间亚相的砂屑灰岩、白云岩沉积组成。

4 层序地层与碳同位素响应特征

4.1 同位素组成的影响因素

研究表明,碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)与介质古盐度关系密切,两者存在明显的正相关关系, $\delta^{13}\text{C}$ 值随介质盐度升高而升高,且海水中的硫酸盐含量对 $\delta^{13}\text{C}$ 也有部分影响,在海水中硫酸盐含量高的情况下,硫酸盐产生的还原作用使有机质发生氧化,因此海水含大量 ^{12}C 的物质,使得 $\delta^{13}\text{C}$ 降低^[20]。此外,海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 与有机碳埋藏速度也具有明显相关关系,有机碳中往往含大量较轻的碳同位素 ^{12}C ,当海洋生物生长繁盛时,便会有大量有机碳被埋藏下来,使得自然界碳库中多余的 ^{12}C 被有机碳吸收,自然界碳库中的 ^{13}C 含量相对增多,与其相对平衡的海水中的无机碳的 ^{13}C 也会增多,即 $\delta^{13}\text{C}$ 相对增大,所以生物的兴衰对 $\delta^{13}\text{C}$ 具有重要的影响。同时海洋中有机碳的埋藏量与海平面升降变化有密切关系,海平面升高期间,一方面使得有机碳的埋藏量增多,另一方面导致陆地还原面积增大,有机质中的 ^{12}C 迅速被埋藏,从而使得与之平衡的碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 亦相应增高^[21-22]。因此,碳酸盐岩碳同位素组成变化与海平面升降变化之间具明显响应特征。

4.2 碳同位素响应特征

研究区长兴组沉积期碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -1.876‰ ~

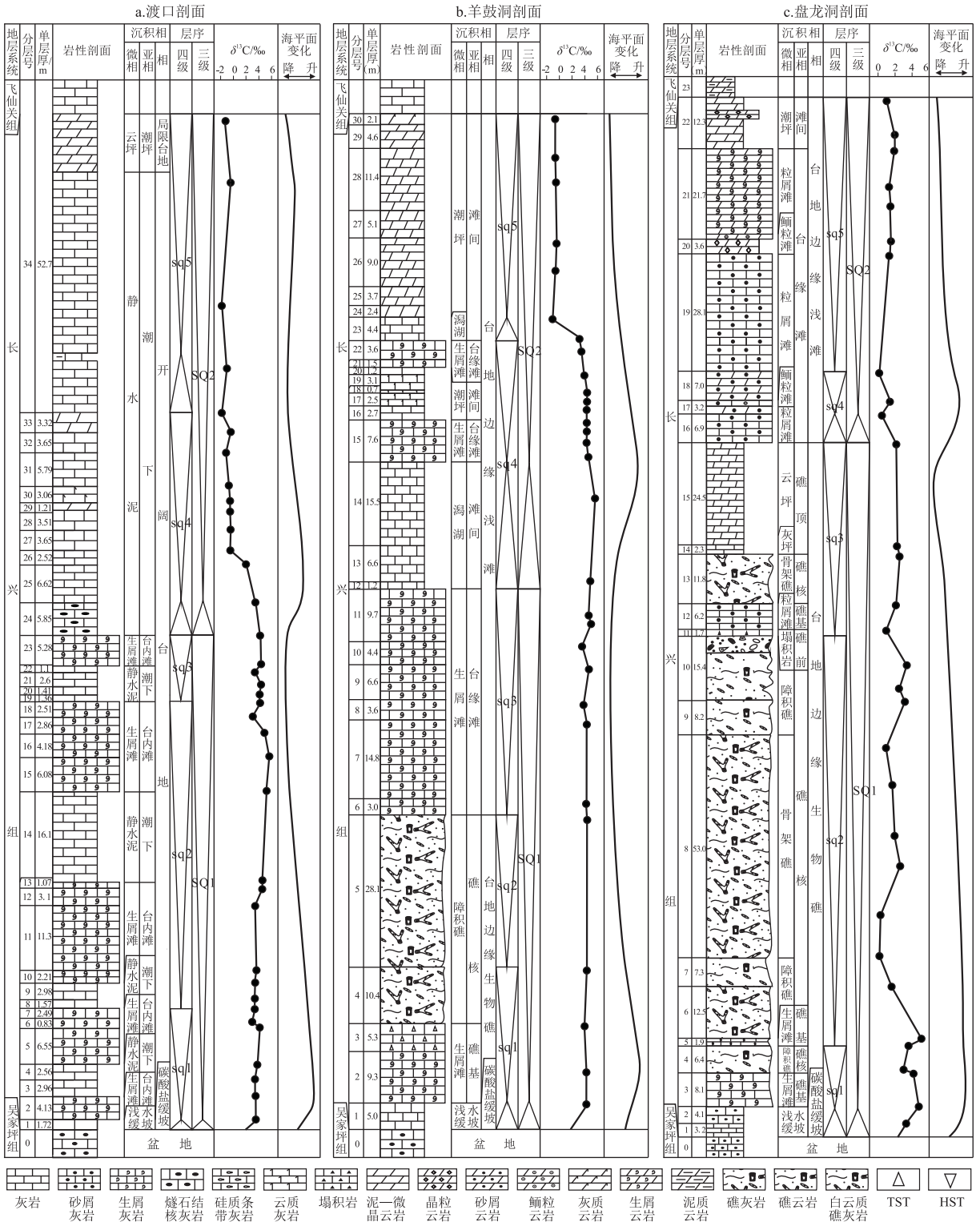


图 3 川东城口—鄂西海槽边缘带长兴组层序地层划分及碳同位素地球化学响应特征

Fig.3 Sequence stratigraphic division and carbon isotope geochemical response of the Changxing Formation in the marginal zone of the East Sichuan Chengkou-Western Hubei Oceanic Trough

5.566‰,在 5 个四级层序及层序内部的体系域中,碳酸盐岩 δ¹³C 存在明显的区别。长兴组发育一套由碳酸盐岩缓坡转化为碳酸盐岩台地相沉积,长兴组沉积期海平面的升降幅度较大,最大幅度差达到 7.442‰,此时海平面呈下降趋势,碳同位素有明显

减小的趋势,反映了碳同位素值与相对海平面升降有较好的响应特征(图 3)。

长兴组沉积初期,由东北向西方向发生大规模的海侵,大致对应于 sq1 中的海侵体系域,碳同位素值也呈现增加的趋势,增加幅度在 0.03‰~

1.488‰左右,此时其相应的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 3.447‰ ~ 4.806‰,表现出碳同位素值具高赋值的特征。从 sq1 中的海侵体系域之后,一直到 sq3 时期,研究区一直处于高位体系域之中,海平面不断的下降,碳同位素值整体也处于下降的趋势,中间存在小范围的波动。紧接着,海退转为海侵,大致对应于 sq4 中的海侵体系域,碳同位素值呈现增加的趋势,继长兴中晚期海侵之后,水动力条件继续动荡,同时在大规模的海退背景下,研究区转变为台地边缘浅滩相和开阔台地相沉积,大致对应于 sq4—sq5 中的高位体系域,碳同位素值不断下降。与盘龙洞和羊鼓洞剖面不同的是,渡口剖面在 sq5 内部还存在较明显的海侵,对应于碳同位素值有上升趋势。

对川东地区长兴组地层剖面不同相带采取由底到顶系统采样,在采样过程中采集新鲜样品,并避开构造断裂带、方解石脉及溶洞等部位,以保证样品的有效性。数据分析在长江大学湖盆沉积实验室的 DELTA V Advantage 气体同位素质谱仪上采用磷酸法进行实验分析,分析结果相对于 PDB 标准, $\delta^{13}\text{C}$ 测定值的标准偏差为 $\pm 0.2\text{‰}$; 同时本文在研究碳同位素组成中也使用了部分白云岩样品。在前人的报道中显示,白云岩的碳同位素可以反映当时海水的原始值,而氧同位值相较于碳同位素更易发生变化^[21]。

综上所述,研究区层序内海侵体系域 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现出由低到高的特征,而在高位体系域期间, $\delta^{13}\text{C}$ 具由高到低的变化,可见 $\delta^{13}\text{C}$ 与海平面升降变化

存在明显的响应特征,并且当海平面升降幅度较大时, $\delta^{13}\text{C}$ 也会出现较大的波动。

5 礁滩发育模式

5.1 四级层序 sq1 礁滩发育模式

长兴组沉积早期,研究区内典型露头剖面为浅水缓坡沉积,随着相对海平面由上升至下降期间,盘龙洞和羊鼓洞剖面转换为碳酸盐台地沉积,而渡口剖面转为开阔台地沉积。在此时海水相对较深,盘龙洞和羊鼓洞剖面造礁生物发育较少,布局呈现出不均匀状,此套礁滩体发育在由生屑滩组成的礁基之上,礁核由造礁生物捕捉碳酸盐灰泥及生物碎屑形成的障积岩为主,沉积厚度较小。渡口剖面在 sq1 时期主要发育由泥晶灰岩及生屑灰岩互层组成的台内滩沉积(图 4)。

5.2 四级层序 sq2 礁滩发育模式

sq2 主要由高位体系域组成,无海侵体系域发育,盘龙洞和羊鼓洞剖面为一套台地边缘生物礁沉积。此阶段生物礁发育在第一期生物礁的基础上,古地貌相对较高,水动力条件较强。此时造礁生物繁盛,腕足类等生物大量发育;其后海平面不断下降,钙质海绵等造礁生物在硬质基底上陆续发育,同时由于水体变浅而水动力变强,其结果是形成有效的抗浪格架,其中第二期生物礁达到最发育阶段,沉积厚度相对也较大。盘龙洞剖面由障积礁—骨架礁的沉积旋回,以及有生屑滩沉积作为礁基;而羊鼓洞剖面仅由障积礁沉积旋回组成。渡口剖

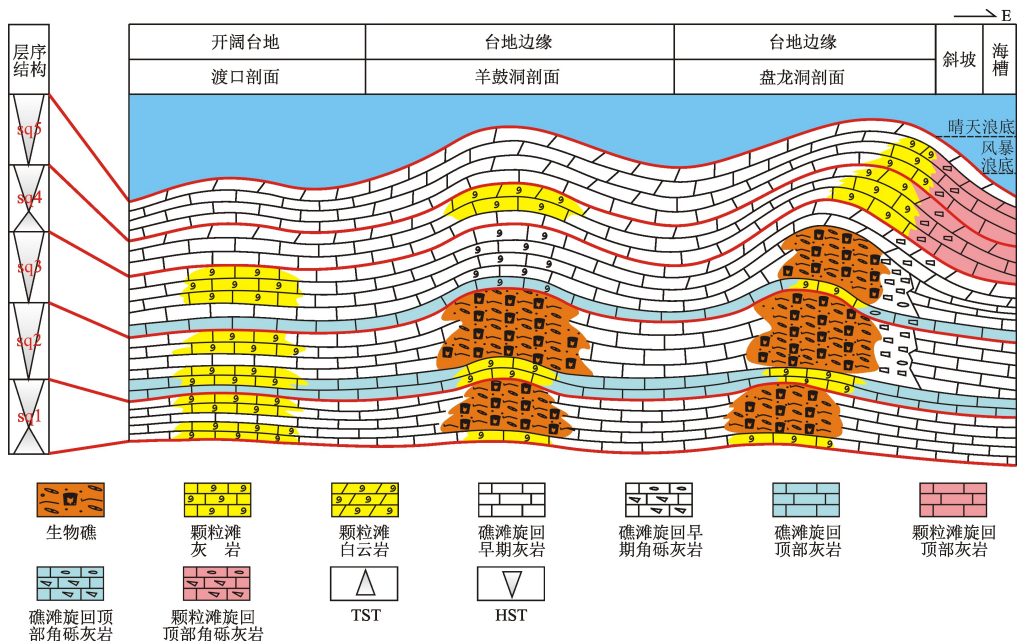


图 4 川东地区渡口—羊鼓洞—盘龙洞剖面礁滩发育模式

Fig.4 Development pattern of reef and shoal along Dukou—Yanggudong—Panlongdong section, eastern Sichuan region

面为一套开阔台地沉积,无生物礁发育,岩性以生屑灰岩和泥晶灰岩为主。

5.3 四级层序 sq3 礁滩发育模式

sq3 同样是由高位体系域组成,盘龙洞剖面持续发育生物礁,由礁基、礁核、礁盖组成完整的生物礁沉积旋回,造礁生物的种类相较于上一期呈大幅度减少,沉积厚度也相应变薄。礁的发育与沉积模式具有明显的规律性,在粒屑滩形成礁基的基础上,海绵、水螅等造礁生物开始生长成礁,再次经过波浪破坏、死亡、钙质藻类的粘结、重新生长等阶段,形成呈块状的骨架礁。由于骨架礁生长速度大于海平面上升速度而导致其出露水面干死,在顶部发育由微晶—粉晶云岩组成的礁顶沉积,至此,长兴组生物礁发育进入尾声。羊鼓洞剖面由于古地貌等原因,在 sq3 时期是由生屑滩组成的浅滩沉积旋回;而渡口剖面浅滩是由静水泥+生屑滩组成的浅滩沉积旋回。

5.4 四级层序 sq4 礁滩发育模式

研究区内羊鼓洞和盘龙洞剖面在 sq4 时期进入台地边缘浅滩沉积,渡口剖面仍为开阔台地沉积。台缘带与台内差异较明显,盘龙洞剖面在 sq4 期内发育粒屑滩+鲕粒滩沉积旋回;羊鼓洞剖面滩相沉积一般由粒屑滩+滩间组成,渡口剖面由于处于台地内部,主要由潮下沉积组成,无颗粒滩发育。

5.5 四级层序 sq5 礁滩发育模式

盘龙洞剖面第二期浅滩沉积在第一期基础上持续发育,sq5 早期以粒屑滩沉积为主,岩性主要为亮晶砂屑灰岩;中期由于海平面升降幅度大,导致颗粒滩云化作用明显,储层较发育;发展至晚期,海平面持续下降,发育潮坪微相,岩性为泥—微晶白云岩。在 sq5 时期羊鼓洞剖面整体为滩间亚相组成;渡口剖面由开阔台地环境转为局限台地环境,主要发育静水泥和云坪微相。典型露头剖面顶部由于受白云石化作用而发育白云岩,总体而言,盘龙洞剖面礁滩云化作用最为强烈。

6 结论

(1)川东地区城口—鄂西海槽边缘带长兴组底部为一套碳酸盐缓坡沉积,向上转化为一套碳酸盐台地沉积。研究区长兴组可划分为2个三级层序,5个四级层序;该区层序界面可划分为局部暴露不整合和淹没不整合2种类型,界面组合特征可细分为5种表现形式。

(2)城口—鄂西海槽边缘带长兴组碳同位素

与海平面升降变化存在明显响应特征,长兴组沉积期整体为一海退过程,碳同位素也呈明显下降趋势,各个层序顶部碳同位素值较小,层序内海侵体系域碳同位素值呈现出由低到高的特征,而在高位体系域期间碳同位素值呈现出由高到低的变化,并且当海平面升降幅度较大时,碳同位素值也会出现较大的波动。因此碳同位素值的组成特征在层序界面识别和层序地层划分中起到至关重要的作用。

(3)通过3个重点研究剖面的对比分析,长兴组沉积期台缘带与台内带沉积相差异明显,因而影响到其礁滩演化模式。盘龙洞剖面处于最高能台缘相带,发育3期生物礁,2期颗粒滩;羊鼓洞剖面相较于盘龙洞剖面处于靠近台地一侧,发育2期生物礁,2期颗粒滩;渡口剖面处于开阔台地内部,无生物礁发育,只发育颗粒滩。

参考文献:

- [1] 胡忠贵,黎荣,胡明毅,等.川东华蓥山地区长兴组台内礁滩内部结构及发育模式[J].岩性油气藏,2015,27(5):67-73. HU Zhonggui, LI Rong, HU Mingyi, et al. Internal structure and development model of intra-platform reef and shoal of Changxing Formation in Huayingshan area, eastern Sichuan[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 67-73.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.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, et al. 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.
- [3] 马永生,蔡勋育,李国雄.四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J].地质学报,2005,79(6):858-865. MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Guoxiong. Basic characteristics and concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 858-865.
- [4] 郭彤楼.川东北地区台地边缘礁、滩气藏沉积与储层特征[J].地质前缘,2011,18(4):201-211. GUO Tonglou. The characteristics of sedimentation and reservoirs of reef-beach gas fields in carbonate platform margins, northeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 201-211.
- [5] 刘宏,谭秀成,周彦,等.川东北黄龙场气田飞仙关组台缘滩型碳酸盐岩储层预测[J].石油学报,2009,30(2):219-224. LIU Hong, TAN Xiucheng, ZHOU Yan, et al. Prediction of platform-edge bank carbonate reservoir in Feixianguan Formation of Huanglongchang Gas Field in the northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(2): 219-224.
- [6] 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 Permian Changxing Formation in

- northeast of Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 2009, 30(2): 219-224.
- [7] 周刚, 郑荣才, 罗韧, 等. 环开江—梁平海槽长兴组生物礁类型及储层特征[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(1): 81-87.
ZHOU Gang, ZHENG Rongcai, LUO Ren, et al. Types and characteristics of reefs of Permian Changxing Formation around Kaijiang-Liangping Trough, eastern Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(1): 81-87.
- [8] 胡明毅, 钱勇, 胡忠贵, 等. 塔里木柯坪地区奥陶系层序地层与同位素地球化学响应特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(2): 199-205.
HU Mingyi, QIAN Yong, HU Zhonggui, et al. Carbon isotopic and element geochemical responses of carbonate rocks and Ordovician sequence stratigraphy in Keping area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(2): 199-205.
- [9] 贾承造, 刘德来, 赵文智, 等. 层序地层学研究新进展[J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(5): 1-4.
JIA Chengzao, LIU Delai, ZHAO Wenzhi, et al. Some new achievements in sequence stratigraphy research [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(5): 1-4.
- [10] 李小燕, 王琪, 韩元红, 等. 川东北地区长兴组—飞仙关组礁滩相沉积体系优质储层形成过程及储集空间演化主控因素分析[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(10): 1594-1602.
LI Xiaoyan, WANG Qi, HAN Yuanhong, et al. Main controlling factors on reservoir space evolution and high quality reservoir forming process of reef-beach facies in Changxing-Feixianguan formation of northeastern Sichuan area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1594-1602.
- [11] 杨雨, 文应初. 川东北开江—梁平海槽发育对 T_1f 鲕粒的预测[J]. *天然气工业*, 2002, 22(增刊): 30-32.
YANG Yu, WEN Yingchu. Northeastern Sichuan Kaijiang-Liangping Trough development of oolitic forecast [J]. *The Natural Gas Industry*, 2002, 22(Supp.): 30-32.
- [12] 杨雨, 王一刚, 文应初, 等. 川东飞仙关组沉积相与鲕滩气藏的分布[J]. *天然气勘探与开发*, 2001, 24(3): 18-21.
YANG Yu, WANG Yigang, WEN Yingchu, et al. Eastern Sichuan Basin Feixianguan oolitic sedimentary facies and the distribution of gas reservoir [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2001, 24(3): 18-21.
- [13] 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.
- [14] 邹才能, 徐春春, 汪泽成, 等. 四川盆地台缘带礁滩大气区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 Chunchun, WANG Zengtao, 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.
- [15] 腾飞, 胡忠贵, 刘忠保, 等. 川东奉节及周缘地区下三叠统飞仙关组沉积特征及相带演化[J]. *石油天然气学报*, 2016, 38(4): 23-31.
TENG Fei, HU Zhonggui, LIU Zhongbao, et al. The sedimentary characteristics and facies evolution of the Lower Triassic Feixianguan Formation in Fengjie and its peripheral areas in the east Sichuan region [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2016, 38(4): 23-31.
- [16] 王必金, 胡明毅. 建南地区上二叠统长兴组层序地层特征研究[J]. *石油天然气学报*, 2013, 35(10): 14-19.
WANG Bijin, HU Mingyi. The sequence stratigraphic characteristics of Upper Permian Changxing Formation in Jiannan area [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2013, 35(10): 14-19.
- [17] 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 45-55.
HU Mingyi, HU Zhonggui, WEI Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 45-55.
- [18] 张建勇, 周进高, 郝毅, 等. 四川盆地环开江—梁平海槽长兴组—飞仙关组沉积模式[J]. *海相油气地质*, 2011, 16(3): 45-54.
ZHANG Jianyong, ZHOU Jingao, HAO Yi, et al. A sedimentary model of Changxing and Feixianguan reservoirs around Kaijiang-Liangping Trough in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011, 16(3): 45-54.
- [19] 符颖, 韩林. 淹没不整合层序: 一种特殊的加深淹没[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(3): 15-20.
FU Ying, HAN Lin. Drowned unconformity sequence: a special type of deepened submerge sequence interface [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(3): 15-20.
- [20] 朱金富, 于炳松, 黄文辉, 等. 塔里木盆地塔中地区晚寒武世—奥陶世碳酸盐岩碳、氧同位素特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 2008, 27(1): 40-42.
ZHU Jinfu, YU Bingsong, HUANG Wenhui, et al. Carbon and oxygen isotope features of Late Cambrian-Ordovician in central Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2008, 27(1): 40-42.
- [21] 彭苏萍, 何宏, 邵龙义, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩碳同位素组成特征[J]. *中国矿业大学学报*, 2002, 31(4): 353-358.
PENG Suping, HE Hong, SHAO Longyi, et al. Carbon isotopic compositions of the Cambrian-Ordovician carbonates in Tarim Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(4): 353-358.
- [22] 肖娇静, 王龙樟, 陈梅, 等. 四川盆地早三叠世多尺度海平面变化旋回及对储层发育的影响[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(5): 618-624.
XIAO Jiaojing, WANG Longzhang, CHEN Mei, et al. Multiple scale fluctuations of the Early Triassic sea level and its influence on reservoirs in the Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(5): 618-624.
- [23] 黄可可, 黄思静, 胡作维, 等. 四川盆地宣汉渡口和重庆北碚下三叠统海相碳酸盐岩的碳同位素组成与演化[J]. *古地理学报*, 2016, 18(1): 101-114.
HUANG Keki, HUANG Sijing, HU Zuwei, et al. Carbon isotopic composition and evolution of Early Triassic marine carbonate from Dukou of Xuanhan and Beibei of Chongqing, Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(1): 101-114.