

磨溪气田嘉陵江组二段陆表海台地高频层序发育特征及对储层的控制

刘宏^{1,2},王高峰¹,刘南³,乔琳⁴,丁伟⁴,丁熊¹,段宏臻⁵,谭秀成^{1,2}

[1. 西南石油大学 地球科学与技术学院 天然气地质四川省重点实验室,四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 中国石油碳酸盐岩储层重点实验室沉积与成藏分室,四川 成都 610500; 3. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司,广东 广州 510240; 4. 中国石油 西南油气田分公司 勘探事业部,四川 成都 610041; 5. 中国石油集团测井有限公司 青海事业部,甘肃 敦煌 736202]

摘要:高频层序是由海平面高频振动变化而形成的地层记录,一般形成于具有稳定沉降背景的盆地中,可与米兰科维奇天文周期旋回相对应。作为非海岸沉积环境的陆表海台,其高频层序发育具有一定的特殊性和代表性。在大量岩心观察、薄片分析、测井相研究的基础上,按能量环境、海平面升降及海水咸化旋回以及相序组合等特征,并考虑高频层序格架下储集层成因类型,将川中磨溪气田嘉二段陆表海碳酸盐台地高频层序划分为3类:台坪型、台内浅滩型与泻湖型。以膏质岩类、颗粒岩类广泛发育为特征,常见各种暴露标志,总体表现为向上变浅序列的多种岩性组合。高频层序地层格架内各级层序界面特征清晰,岩性组合稳定,可对比性强。同时,探讨了高频层序格架下早期储层成因机制,指出稳定沉积陆表海台地背景下的高频层序控制了岩相发育序列及同生岩溶作用,进而控制了不同成因类型储集层发育。

关键词:高频层序;碳酸盐岩;嘉陵江组;陆表海台地;磨溪气田

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characterization of high-frequency sequences in the epicontinental carbonate platform of Jia 2 member in Moxi gas field and its controls over reservoirs

Liu Hong^{1,2}, Wang Gaofeng³, Liu Nan⁴, Qiao Lin⁴, Ding Wei⁴, Ding Xiong¹, Duan Hongzhen⁵, Tan Xiucheng^{1,2}

(1. Sichuan Province Key Laboratory of Natural Gas Geology, School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. PetroChina Deposition and Accumulation Department of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Shenzhen Branch Company, CNOOC, Guangzhou, Guangdong 510240, China; 4. Exploration Department of Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 5. CNPC Logging Qinghai Business Division, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: High-frequency sequences, generally formed in basins with stable subsidence settings and correspond well to astronomical Milankovitch cycles, are vivid records of high-frequency eustatic fluctuation. Such sequences developed in epicontinental platforms of non-coastal sedimentary environment are both representative and special in certain ways. By combining core observations, thin section analyses and logging facies studies with such factors as energy environment, eustatic fluctuation and sea water salinity cycle as well as reservoir genesis types under high-frequency sequential framework, we classified high-frequency sequences in the epicontinental carbonate platform of the Jia 2 member of the Moxi gas field into the following three types: platform flat type, intraplatform shoal type and lagoon type. The sequences are found to be characterized by widely-distributed gypsiferous rocks and grainstone with all kinds of exposure marks. As a whole, they consist of stratigraphic assemblages of shallowing upwards sequences. Within the framework, sequences are separated by clear boundaries and stratigraphic assemblages are stable and highly comparable. The paper also discussed the mechanisms behind the formation of early reservoirs in the high-frequency sequence framework and proposed that the high-frequency sequences controlled the order of lithofacies development and the syngenetic karstification, and thus controlled the development of different genetic types of reservoirs.

Key words: high-frequency sequence, carbonate rock, Jialinjiang Formation, epicontinental sea platform, Moxi gas field

收稿日期:2015-05-20;修订日期:2016-06-15。

第一作者简介:刘宏(1981—),男,博士、副教授,碳酸盐岩储层地质学与地震地层学。E-mail:nd123@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41472099);中国石油科技创新基金项目(2015D-5006-0107)。

在间断-沉积旋回机制^[1]与准层序组及准层序概念^[2-3]相继提出的基础上,作为层序地层学体系的进一步发展,Mitchum(1991)提出高频层序的概念及其成因,认为高频层序(四级或四级以上层序)是由海平面高频振动变化而形成的地层记录,一般形成于具有稳定沉降背景的盆地中^[4],与米兰科维奇天文周期旋回相对应。高频层序的提出及实践很大程度上将旋回地层学与层序地层学有机地融合到一起,高频旋回及其有序叠加样式已成为层序识别的重要标志^[5]。

赵玉光与许效松等人最先开展高频层序与海平面振荡变化研究^[6];陈洪德与彭军等人系统地总结了高频层序格架下岩石韵律组合特征^[7];梅冥相在 Einsele、Masetti 与 Oslege 等人研究的基础上,系统总结了碳酸盐岩及碎屑岩地层的米级旋回成因类型及其相序组构特征^[5,8];此外,梅冥相将天津蓟县剖面雾迷山组叠层石白云岩中近似对称的潮坪型碳酸盐岩米级旋回命名为“雾迷山旋回”^[5,9],其海平面高频变化特征代表性优于“洛菲尔旋回”;武法东提出自然伽玛测井曲线频率域分析方法为高频层序划分提供一个全新手段^[10]。总的来说,前人研究主要集中在高频层序的发育特征及成因机理上。作为非海岸沉积环境的陆表海台地上的高频层序发育具有一定的特殊性和代表性,本文以磨溪气田嘉(嘉陵江组)二段典型陆表海台地为例,从高频层序成因、层序界面类型、高频旋回及其有序叠加样式的识别等方面,系统论述陆表海台地高频层序特征及其对储层的控制作用。

1 地质概况

磨溪气田处于四川盆地川中古隆起中斜平缓构造带的南部(图1),因构造稳定,纵向上具有多个成藏组合。在多年的油气勘探过程中,从震旦系-三叠系的

各个碳酸盐岩地层中均有较大发现,是四川盆地立体勘探的典范。特别是近年来,随着深层天然气勘探重大突破更成为研究的热点。其下三叠统嘉陵江组自下而上可划分为5个岩性段,嘉二段地层主要由海相碳酸盐岩、蒸发岩和少量陆源碎屑岩组成,含瓣鳃类、腹足类、介形类、棘皮类和有孔虫等生物化石,钻厚从104 m到120 m不等,总体上表现出东厚西薄的变化趋势,与下伏嘉一段和上覆嘉三段地层均呈整合接触。区内共有嘉二段全取心井16口。

2 沉积背景

古地理格局控制了嘉陵江组沉积体系及演化。早三叠世嘉陵江期上扬子克拉通海盆受周边古隆起的抬升影响较大,尤其是在嘉二期,汉南海隆限制了东北侧的海盆边界并影响其前缘沉积。西部的康滇古陆及龙门山-九顶山岛链成为古特提斯洋海水东进的天然屏障,东南受限于江南古陆。因此,上扬子克拉通海域与广海的连通不畅。另一方面,由于华蓥山断裂在嘉陵江期的正断活动^[11]以及七曜山断裂的活动使川东地带向上抬升,地处上扬子克拉通海盆中央的川中海域,由于水下隆起的层层屏障,海水循环自东向西越来越不畅。在嘉二期的总体海退背景下,这些水下隆起的阻隔更加明显,致使东部海侵影响基本消失,这种古地理格局导致川中地区在嘉二期演变为局限海环境^[12]。

王鸿祯将早三叠世嘉陵江期上扬子海域确定为蒸发海^[13];王宓君等认为四川盆地早三叠世嘉陵江期继承性发育了碳酸盐岩台地沉积,并指出自西向东依次发育海陆过渡相、蒸发海台地相、局限海台地相和开阔海台地相^[14]。谭秀成等根据岩心分析结合古地理背景,认为川中磨溪地区嘉二期为典型陆表海型碳酸盐岩台地,总体上处于半干旱-干旱、炎热的气候条件

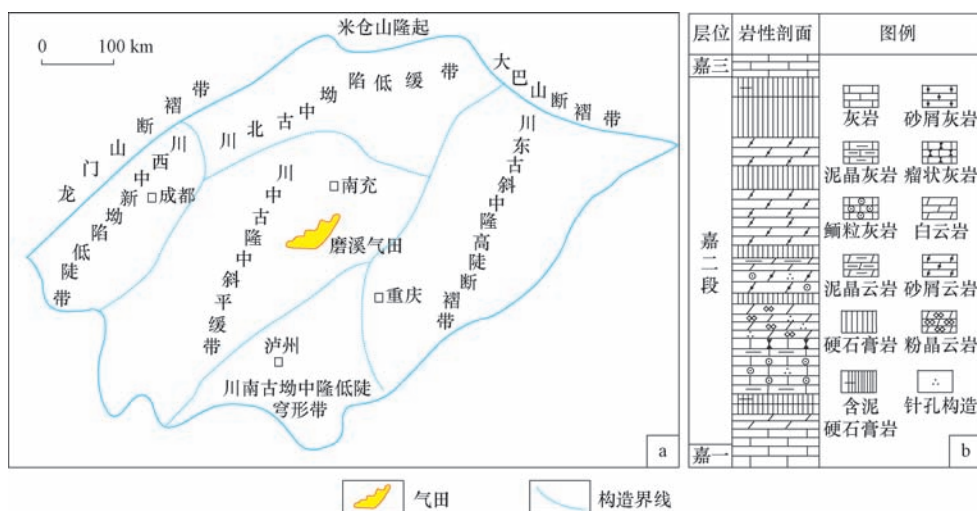


图1 磨溪气田地理位置(a)及地层岩性剖面(b)

Fig. 1 Location of Moxi gas field

下,蒸发作用基本上处于主导地位,以发育局限-蒸发海台地相为典型特征^[12],主要包括台坪、台内浅滩、滩间海、局限潟湖与蒸发潟湖等亚相,其中台坪与台内浅滩是最有利的沉积微相。

3 高频层序发育特征

因碳酸盐岩对海平面变化较敏感且以加积作用为主,横向上稳定分布。前人对碳酸盐岩高频层序的成因类型及相序组构特征研究程度较高,一般将碳酸盐岩米级旋回分为4大类^[5]:深水远洋背景下的L-M型^[15],台缘斜坡背景下的深水非对称型^[16],潮下型^[17]及环潮坪型^[18]。

在相关研究中,四川盆地嘉陵江组一般被划分为2~3个三级层序^[6,8,19],其下部的嘉一段-嘉二段为一个具有完整海侵-海退旋回的三级层序,嘉二段为该三级层序的高位体系域。在总体海退背景下,嘉二段内部发育了多个不同成因、不同级次的沉积旋回。由于陆表海台地为一个区域上可忽略地貌变化的广阔区域,台地上水体较浅(一般小于5~10 m)^[20],以浅水潮下和潮间沉积环境为主,其沉积物对地壳震荡性升降变化、海平面升降变化以及气候周期性变化等的响应比较明显。由于相对较高的沉积速率及稳定的沉降背景,高频低幅度的相对海平面变化均能以岩石记录的形式保存下来,其高频层序的成因类型及相序组构特征具有特殊性和代表性。

3.1 高频层序界面特征

相对于区域性不整合面,陆表海碳酸盐岩台地高频层序界面一般表现为受海平面高频低幅变化影响的瞬时暴露面或瞬时加深面,岩性组合及构造上则表现为干裂(图2d),含膏质团块粉晶云岩(图2c),膏溶角砾岩(图2b)等一系列暴露标志的出现。颗粒滩向上变浅序列顶部的大气淡水淋滤溶蚀作用发育(图2a,e),以及颗粒岩、膏质岩-泥灰岩的岩性突变等。

岩性组合的高频变化在地球物理测井曲线上往往表现为自然伽马及电阻率曲线的突变及垂向韵律变化特征,层序底界的突然加深面体现为自然伽马值的突然增大,电阻率值迅速变小(图3)。多个向上变浅序列的有序叠加使得自然伽马曲线总体表现为幅度不一的漏斗状、指状以及箱状等^[21],而电阻率曲线也呈现高频韵律变化特征。利用多尺度小波时频变换可将测井曲线与各级层序周期很好地对应起来,将自然伽马曲线从时间域转换到频率域,层序界面与沉积旋回等在频率域内有序变化明显^[22-23]。一般情况下,小尺度因子小波变换更能反映陆表海台地海平面高频振荡旋回^[24](图3)。

3.2 高频层序类型

在大量岩心观察与薄片分析的基础上,按能量环境、海平面升降及海水咸化旋回、相序组合等特征,并考虑高频层序格架下储集层成因类型,将磨溪嘉二段

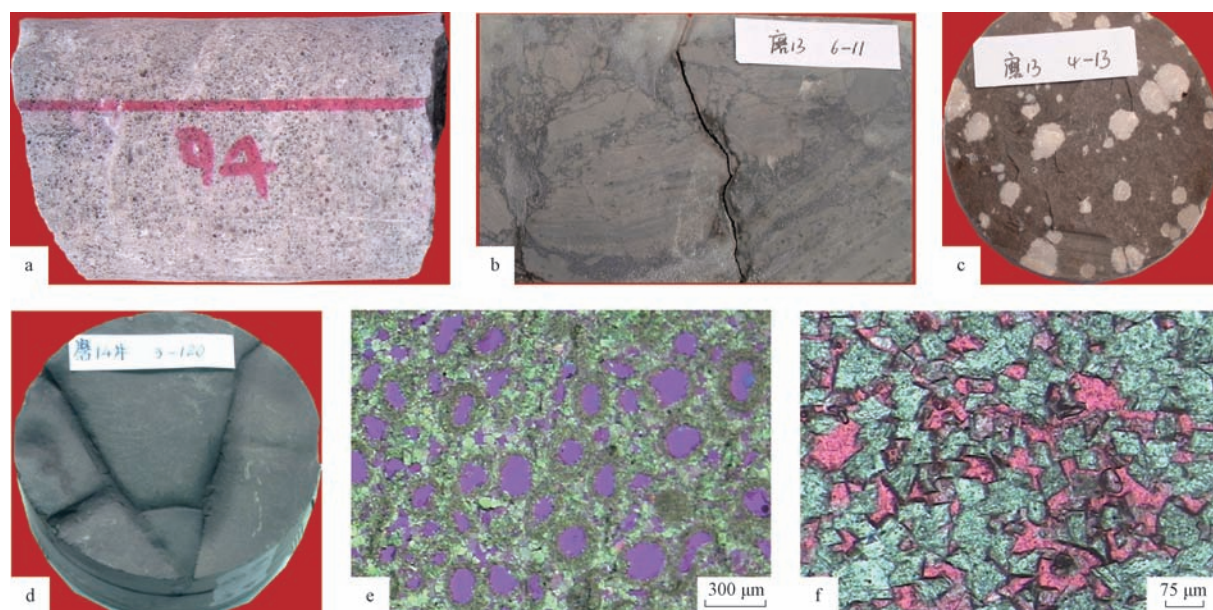


图2 磨溪气田嘉二段高频层序界面典型岩性及组合特征

Fig. 2 Typical lithology and assemblage features of high-frequency sequence interfaces in Jia 2 member, Moxi gas field

- a. 大气淡水淋滤针孔鲕粒灰岩,逆序序,m206井;b. 膏溶角砾岩,m13井;c. 含膏团的针孔粉晶云岩,m13井;d. 干裂,m14井;
e. 鲕粒灰岩中的铸模孔,m13井,R406,埋深3 124.03 m,石膏试板;f. 粉晶云岩中的白云石晶间溶孔,m151井,R126,埋深3 140.03 m,
铸体薄片

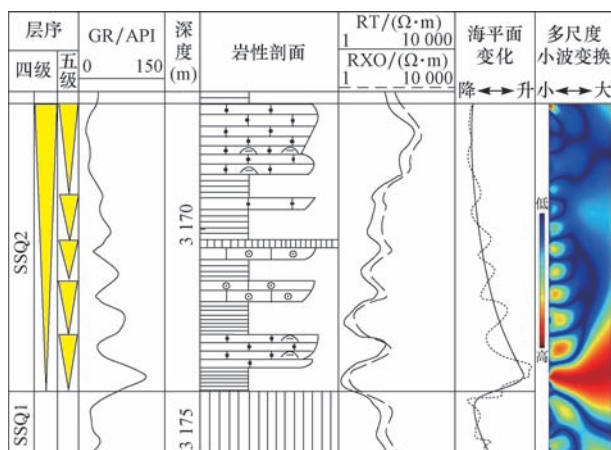


图3 磨溪气田嘉二段 SSQ2 高频层序
界面测井响应特征 (M15 井)

Fig. 3 Logging response characteristics of the SSQ2 high-frequency sequences in Jia 2 member, Moxi gas field (Well M15)

陆表海碳酸盐台地高频层序划分为3类:台坪型、台内浅滩型及潟湖型(图4),以膏岩与膏质云岩广泛发育为特征,常见各种暴露标志。

3.2.1 台坪型

台坪位于台地内部远离陆地的水下高台,地形相对平坦,沉积界面处于平均海平面附近,主要发育潮间和潮上环境,周期性或较长期暴露于大气之下,水动力条件总体较弱,往往具有潮坪相的典型沉积特征。但这种“潮坪”与连陆滨岸带潮坪在古地理位置和沉积动力学方面又有明显的差异^[12],主要表现在:台坪发育在浅水碳酸盐岩台地内部而非滨岸带的潮缘环境;动力因素主要是平均海平面的周期性变动而非潮汐流的影响;台坪亚相缺乏反映潮汐流特征的沉积构造及潮汐流成因的颗粒岩类;在碳酸盐岩层序向上变浅序列的顶部,常常是同生岩溶发育,且发育暴露面,能在

较大范围内追踪对比^[25]。

磨溪地区嘉二段台坪型高频层序存在两种类型,一种随着浅水高地上颗粒滩的快速生长,垂向加积使沉积界面处于潮间-潮上环境,形成颗粒滩-台坪高频层序,岩性组合上体现为砂屑云(灰)岩-粉晶云岩-含膏团粉晶云岩组合(图4b)。另一种为海侵后,封闭蒸发形成的向上变浅序列,沉积水体能量总体很低,在水下高地及周边逐渐形成潟湖-台坪的高频层序,岩性上表现为泥灰岩-泥晶灰岩-泥晶云岩-粉晶云岩-膏岩组合。单旋回厚度在6~9 m(图4a)。

总体上,水体能量由强变弱,海水盐度逐渐增大,蒸发作用强烈,以大面积云化及蒸发岩类为特征,层序顶界常表现为瞬时暴露面,出现膏溶角砾岩、干裂等暴露标志(图2),以及大气淡水淋滤形成的针孔状粉晶云岩。

3.2.2 台内浅滩型

在相对低能的陆表海环境中,只有在海侵期和海退初期,波浪作用相对较强,且沉积界面位于平均海平面附近的水下高地才有可能发育高能颗粒滩沉积。形成泥灰岩-灰岩-颗粒灰(云)岩的岩性组合,颗粒岩类型主要有浅灰色中厚层-块状亮晶鲕粒灰(云)岩、亮晶砂屑灰(云)岩与亮晶生屑灰(云)岩等多种类型,因此处于潮下高能带的高频层序类型较多,但总体上均表现为向上水体变浅与能量增大为特征,沉积构造以发育多种交错层理为典型特征,发育逆粒序层理(图2d)。自然伽马测井曲线形状表现为箱状与漏斗型^[26](图3)。随着粒屑滩生长,易出露海面接受大气淡水淋溶改造形成针孔型颗粒岩,因此层序顶界往往表现为瞬时暴露间断面,层序底界为海水突然加深间断面。受海水高频震荡变化影响,可出现多个向上变浅颗粒滩序列。

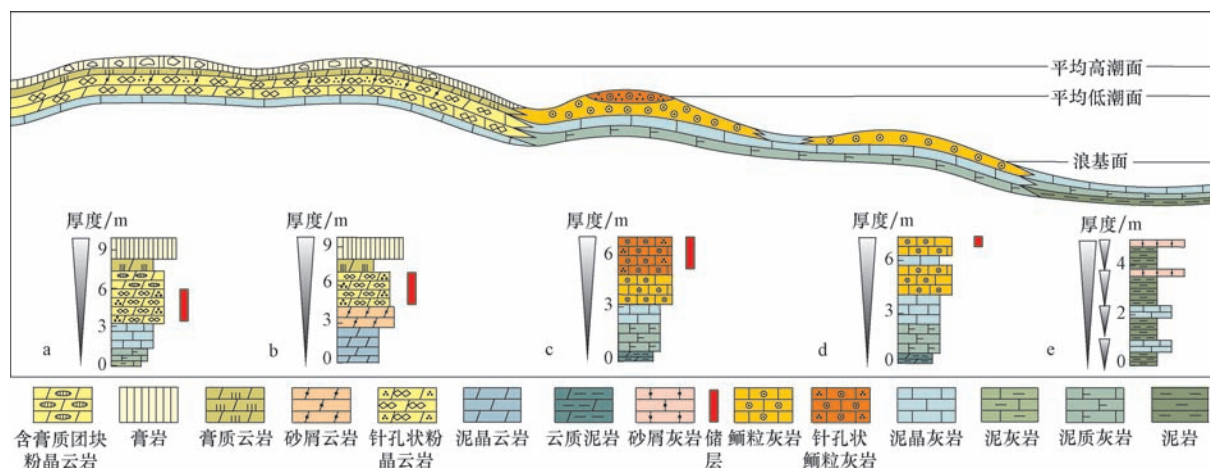


图4 磨溪气田嘉二段典型高频层序发育类型

Fig. 4 Types of typical high-frequency sequences in Jia 2 member, Moxi gas field

按滩体规模及颗粒滩是否暴露可分为两种层序类型。一种以颗粒岩颗粒含量高、单层厚度大、亮晶胶结为主,岩性上表现为泥岩-泥灰岩-颗粒灰岩-针孔状颗粒灰岩组合,高频间歇性暴露于海平面之上,以大气淡水成岩透镜体发育为典型特征^[20],或见白云石化(图4c)。另一种以颗粒岩颗粒粒径相对较小、颗粒含量低、单层颗粒岩厚度小(一般小于2 m)为特征,缺乏暴露标志,岩性上表现为泥岩-泥灰岩-薄互层颗粒灰岩为特征(图4d)。

3.2.3 潟湖型

潟湖处于浪基面以下的局限-蒸发海台地内较低洼地区,因水体循环受到限制,环境能量低,以静水沉积为主。岩石类型主要为深灰色泥灰岩、泥晶云岩等,水平虫迹发育,水平层理及韵律层理为主。此环境下高频层序岩性组合主要表现为泥岩(泥灰岩)-薄层颗粒灰岩组合(图4e),单个向上变浅旋回厚度为1~2 m,无暴露标志。自然伽马曲线表现为指状或锯齿状,反映振荡式海退的特征,高频层序界面表现为岩性转换面,海水突然加深面。此类高频层序以1:4或1:5构成了上一级别海退旋回(图4e),与米兰科维奇偏心率旋回1:4的叠加样式近似一致,类似于Einsele的深水远洋背景下的L-M型米级旋回。此外,该环境下在阶段性海侵期,具有较为发育的风暴岩序列,可见薄-极薄层的风暴流碎屑沉积,岩性组合表现为岩(泥灰岩)-风暴岩组合,而在闭塞期基本上为静水沉积,不发育风暴岩序列。

3.3 高频层序格架

陆表海碳酸盐岩台地上,地貌总体上比较平缓,高频层序发育主要受海平面变化影响,而层序的有序叠加样式主要以垂向加积为主,沉积厚度稳定。

磨溪地区嘉二段地层可划分出5个四级层序及14个五级层序,虽然不同沉积微相内高频层序成因类型存在一定差异,但各级层序横向上稳定分布,单个四级层序厚度一般为10~15 m,界面特征清晰。岩性组合均体现为向上变浅序列,岩性横向变化不大,往往以厚层膏质岩类广泛出现为层序顶界特征,层序底界一般表现为海水突然加深面。同样,五级层序格架下地层厚度及岩性组合发育稳定,横向上具有极强可对比性(图5),各级高频层序的稳定发育反映了陆表海碳酸盐岩台地上稳定的沉降背景,也说明受米兰科维奇天文周期控制的高频层序在陆表海台地上具有较强适用性。

4 高频层序格架下储层成因机制

人们对碳酸盐岩储层成因机制的讨论大多数基于

三级层序体系域框架下^[19,26],勘探实践表明,早期成因陆表海型碳酸盐岩储层主要分布在三级层序高位体系域的早-中期^[19]。随着整体海退背景下,水体能量的回升,水下高能浅滩型及台坪型储层发育,而高位体系域晚期,台地上基本处于蒸发海环境,以膏岩沉积为主,储层不发育。国内部分学者探讨了高频层序格架内碳酸盐岩储层发育控制因素,如马永生以普光气田为例探讨了高频旋回内台地边缘礁滩储层孔隙度分布特征^[27],刘嘉庆与李忠等研究了高频层序控制的早期成岩作用及其对储层分布的影响^[28]。

在总体海退背景下的海平面高频振荡旋回对陆表海碳酸盐岩储层具有明显的控制作用,而不同成因类型的高频层序及其有序叠加样式对储层的控制作用不尽相同,在前述总结的3种成因类型中,因潟湖型高频层序格架下早期成因储层不发育,本文以台内浅滩及台坪型这两种具代表性的陆表海碳酸盐岩储层来阐述高频层序对储层的控制作用。

4.1 台内浅滩型高频层序储层成因机制

高频向上变浅序列控制了颗粒滩的生长,嘉二段2亚段早期(SSQ2早期),受短期快速海侵影响,磨溪地区以泥岩及泥灰岩沉积为主,其底部的蓝灰色泥岩是全盆地稳定分布的区域性标志层。随着沉积物的垂向加积及能量的缓慢回升,沉积界面开始处于平均浪基面附近,水下高地开始发育颗粒滩,此时一般以生屑滩沉积为主,体现为生屑灰岩与泥晶灰岩的薄互层,反映海平面的高频振荡式变化。随着颗粒滩的快速生长,垂向加积使沉积界面位于平均低潮线附近时,随着水体能量的增大,颗粒滩的沉积速率达到最高,以中-厚层状颗粒岩沉积为主,具有颗粒岩含量高,粒径大,亮晶胶结,发育逆粒序等特征。高速加积的颗粒滩容易间歇性暴露于海面之上,受同生期大气淡水淋滤溶蚀作用改造成针孔型储层,此类储层主要存在以下特征:一般发育在各个向上变浅高频层序顶部(图3c, d)^[20],储层物性向上变好,镜下薄片鉴定可见大气淡水胶结物的存在及选择性溶蚀现象形成的粒内容孔及粒间溶孔为主的储集空间类型(图2),同时可见渗流粉砂的存在^[29]。

4.2 台坪型高频层序储层成因机制

在台坪型高频层序发育的早-中期,无论是颗粒滩-台坪沉积序列,还是蒸发浓缩形成的潟湖-台坪沉积序列,其沉积界面先后处于平均低潮面之上,局部高地甚至处于平均高潮面之上。盆地闭塞环境下的等效海退致使海水盐度逐渐增高,有利于早期白云石化作用。白云石化作用形成了大量的晶间孔隙,为同生

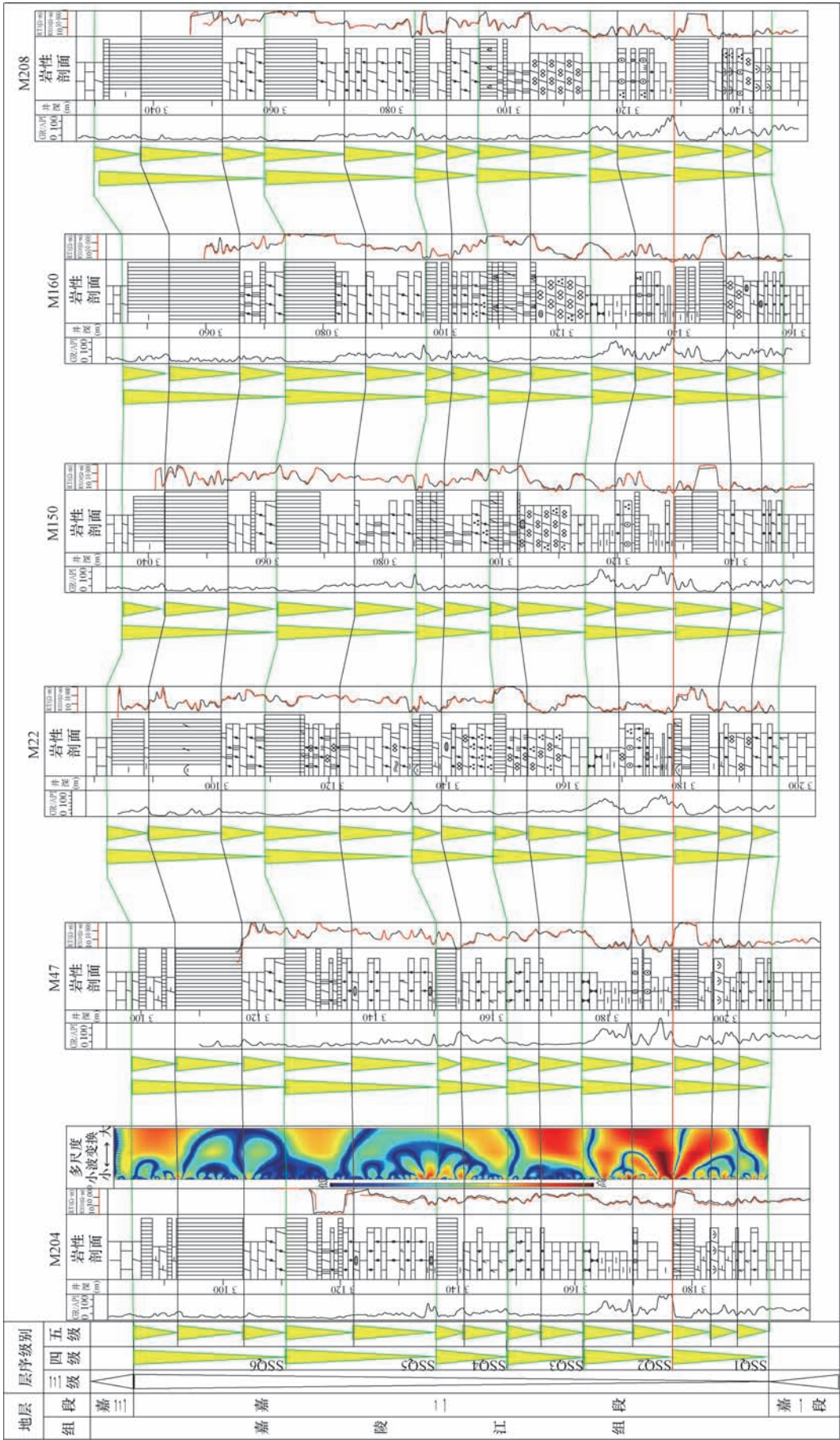


图5 磨溪气田嘉二段东西向高频层序地层格架
Fig.5 EW-trending stratigraphic framework of the high-frequency sequences in Jia 2 member, Moxi gas field

期和埋藏期的储层优化改造提供了优越的物质基础。同时,因自身环境特点,台坪相较之颗粒滩相具有暴露范围广、时间久的特征,形成的粉晶云岩储层更容易接受富含 CO_2 的大气淡水的淋滤溶蚀改造,形成稳定层状分布的优质碳酸盐岩储层,这也是磨溪嘉二气藏的主力产层。岩心观察发现该针孔型粉晶云岩储层面孔率可高达 20%^[30],镜下表明晶间溶孔大量发育,孔径大,储集性能极佳^[29-32]。在四级高频旋回晚期,随着蒸发作用愈加强烈,海水盐度越来越大,开始陆续出现含膏团粉晶云岩、云质膏岩及膏岩沉积(图 2),储层物性明显降低甚至不发育。因此,在台坪型高频层序格架下,由早中期至晚期,粉晶云岩储层物性先逐渐增大后又明显减小,优质储层主要发育在高频层序(四级)中部(图 3a,b),与台内浅滩型发育在层序顶部有着明显区别。

对于早期相控型陆表海碳酸盐岩储层,高频旋回及其叠加样式决定了早期物质基础,向上变浅沉积序列及次一级海平面振荡旋回使其周期性暴露海面之上,有利于白云石化及同生岩溶等建设性成岩作用的进行,形成独具特色的陆表海台地碳酸盐岩薄储层。

5 结论

1) 稳定沉降背景下的陆表海台地高频层序受海平面高频低幅振荡变化,可与米兰科维奇天文周期旋回相对应,以膏岩、膏质云岩广泛发育为特征,常见各种暴露标志,总体表现为向上变浅序列的多种岩性组合。

2) 按能量环境、海平面升降旋回以及相序组合等特征,将川中磨溪地区嘉二段陆表海碳酸盐台地高频层序划分为 3 类:台坪型、台内浅滩型与潟湖型,高频层序地层格架内各级层序界面特征清晰,岩性组合稳定,可对比性强。

3) 高频层序控制了陆表海台地碳酸盐岩岩相发育序列及同生岩溶作用,进而控制了不同成因类型储集层发育。

参 考 文 献

- [1] Goodwin P, W & Anderson E J. Punctuated aggradational cycles: a general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation[J]. *Journal of Geology*, 1985, 93: 515–533.
- [2] Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of sequence stratigraphy and key definitions, [C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, et al. Sea level changes: an integrated approach. SEPM (Special Publication), 1988, 42: 39–45.
- [3] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops: concepts for high resolution correlation of time and facies[J]. *AAPG*, 1990, 7: 1–55.
- [4] Mitchum R M, Van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles[J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70: 131–147.
- [5] 梅冥相. 从旋回的有序叠加形式到层序的识别和划分: 层序地层学进展之三[J]. *古地理学报*, 2011, 13(1): 37–54.
Mei Mingxiang. From vertical stacking pattern of cycles to discerning and division of sequences: The third advance in sequence stratigraphy[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(1): 37–54.
- [6] 赵玉光, 许效松, 刘宝珺. 上扬子台地西缘峨眉地区三叠纪高频层序与海平面振荡研究[J]. *岩相古地理*, 1996, 16(1): 1–18.
Zhao Yuguang, Xu Xiaosong, Liu Baojun. High-frequency sequences and sea-level oscillations in the Emei area on the western margin of the upper Yanzgtze platform[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1996, 16(1): 1–18.
- [7] 陈洪德, 彭军, 田景春, 等. 上扬子克拉通南缘中泥盆统一石炭系高频层序及复合海平面变化[J]. *沉积学报*, 2000, 18(2): 181–189.
Cheng Hongde, Peng Jun, Tian Jingchun, et al. The Middle Devonian to Carboniferous high-frequency sequences and composite sea-level changes on the southern margin of the upper Yanzgtze Craon basic[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(2): 181–189.
- [8] 梅冥相, 徐德斌, 周洪瑞. 米级旋回层序的成因类型及其相序结构特征[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 43–49.
Mei Mingxiang, Xu Debin, Zhou Hongrui. Genetic types of Meter-Scale Cyclic sequences and their fabric features of facies-succession[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(1): 43–49.
- [9] 梅冥相, 高金汉, 孟庆芬, 等. 天津蓟县中元古界雾迷山组微指状叠层石及其对 1250Ma ± 叠层石衰减事件的响应[J]. *古地理学报*, 2008, 05: 495–509.
Mei Mingxiang, Gao Jinhan, Meng Qingfen, et al. Microdigital stromatolites and their response to stromatolite decline at 1250, Ma + for the Mesoproterozoic Wunishan formation at Jixian section in Tianjin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 05: 495–509.
- [10] 武法东, 苏新, 周平, 等. 东海陆架盆地第三系高频层序分析[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 47–52.
Wu Fadong, Su Xin, Zhou Ping, et al. Analysis of paleogene high-frequency sequences in the east China sea shelf basin[J]. *Geological Review*, 2001, 47(1): 47–52.
- [11] 刘宏, 孙振, 李卓沛, 等. 三叠纪嘉陵江期华蓥山同沉积断层的沉积、储层响应[J]. *地层学杂志*, 2010, 03: 312–320.
Liu Hong, Sun Zhen, Li Zhuopei, et al. Syndepositional tectonic activities in the HuaYingShan Fracture belt during the Triassic JiaLing River phase and its impact on sedimentation and reservoir development[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 03: 312–320.
- [12] 谭秀成, 邹娟, 李凌, 等. 磨溪气田嘉二段陆表海型台地内沉积微相研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 219–225.
Tan Xiucheng, Zou Juan, Li Ling, et al. Research on sedimentary microfacies of the epicontinental sea platform of Jia 2 member in Moxi gas field[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 219–225.
- [13] 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1985: 1–283.
Wang Hongzhen. Atlas of the Palaeogeography of China[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1985: 1–283.
- [14] 王宓君, 包茨, 肖明德, 等. 中国石油地质志(卷十) 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 1–516
Wang Mijun, Bao Ci, Xiao Mingde, et al. *Petroleum Geology of China*

- (vol. 10) Sichuan hydrocarbon provinces [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 1–516.
- [15] Einsele G, Seilacher A. Cyclic and event stratification [M]. England: Springer-Verlag, 1982: 1–306.
- [16] Masetti D, Nero C, Bosellini A. Deep-water say-mmetric cycles and progradation of carbonate platforms governed by high-frequence eustatic oscillations [J]. *Geology*, 1991, 19: 336–339.
- [17] Osleger D. Subtidal carbonate cycles: implications for allocyclic vs. autocyclic controls [J]. *Geology*, 1991, 19: 917–920.
- [18] Read J F. Carbonate platform facies models [J]. *American Association Petrology Geology Bulletin*. 1985, 69: 1–21.
- [19] 胡明毅, 魏国齐, 李思田, 等. 四川盆地嘉陵江组层序—岩相古地理特征和储层预测 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1145–1152.
Hu Mingyi, Wei Guoqi, Li Sitian, et al. Characteristics of sequence-based lithofacies and paleogeography, and reservoir prediction of the Jialingjiang formation in Sichuan basin [J]. *Acta Sedimenologica Sinica*, 2010, 28(6): 1145–1152.
- [20] 谭秀成, 刘晓光, 陈景山, 等. 磨溪气田嘉二段陆表海碳酸盐岩台地内滩体发育规律 [J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 995–1001.
Tan Xiucheng, Liu Xiaoguang, Chen Jingshan, et al. Shoal development within the epicontinental carbonate platform, Jia 2 member, Lower Triassic, Moxi gas field, central Sichuan basin [J]. *Acta Sedimenologica Sinica*, 2009, 27(5): 995–1001.
- [21] 刘宏, 谭秀成, 周彦, 等. 颗粒碳酸盐岩测井相及其对滩相储层的指示意义 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 527–530.
Liu Hong, Tan Xiucheng, Zhou Yan, et al. Logging facies of granular carbonate rocks and its implication on reservoir evaluation [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 527–530.
- [22] 雷克辉, 朱广生, 毛宁波, 等. 在小波时频域中研究沉积旋回 [J]. *石油地球物理勘探*, 1998, S1: 72–78, 177.
Lei Kehui, Zhu Guangsheng, Mao Ningbo, et al. Frequency study sedimentary cycles in Wavelet Time-Frequency domain [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1998, S1: 72–78, 177.
- [23] 李庆谋, 刘少华. 地球物理测井序列的小波波谱方法 [J]. *地球物理学进展*, 2002, 01: 78–83, 101.
Li Qingmou, Liu Shaohua. Wavelet scalogram and application for geophysical well [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 01: 78–83, 101.
- [24] 余继峰, 李增学, 王明镇, 等. 鲁西—济阳 C—P 陆表海沉积测井层序对比分析 [J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 01: 85–90.
Yu Jifeng, Li Zengxue, Wang Mingzhen, et al. Correlation and analysis of well-log sequences of epicontinental sea sediments of Permian-carboniferous in Luxi and Jiyang [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, 01: 85–90.
- [25] Schwarzscher W. Sedimentary moelsand quantitative stratigraphy [M]. Amsterdam: Elsevier, 1975, 1–225.
- [26] 乔占峰, 李国蓉, 李弢, 等. 泸州古隆起地区嘉陵江组层序特征及其对碳酸盐岩储层的控制 [J]. *沉积学报*, 2008, 01: 92–99, 110.
Qiao Zhanfeng, Li Guorong, Li Tao, et al. Sequence-stratigraphic features and their control on carbonate reservoirs for the Triassic Jialingjiang formation of the Luzhou Paleohigh in Sichuan basin [J]. *Acta Sedimenologica Sinica*, 2008, 01: 92–99, 110.
- [27] 马永生, 储昭宏. 普光气田台地建造过程及其礁滩储层高精度层序地层学研究 [J]. *石油与天然气地质*, 2008, 05: 548–556.
Ma Yongsheng, Chu Zhaozhong. Building-up process of carbonate platform and high-resolution sequence stratigraphy of reservoirs of reef and oolitic shoal facies in Puguang gas field [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 05: 548–556.
- [28] 刘嘉庆, 李忠, 韩银学, 等. 塔里木盆地塔中上奥陶统碳酸盐台地高频层序控制的早期成岩作用及其对储层分布的影响 [J]. *岩石学报*, 2010, 12: 3629–3640.
Liu Jiaqing, Li Zhong, Han Yinxue, et al. Early diagenesis in high-frequency sequence framework of the Upper Ordovician carbonate platform in Tazhong, Tarim basin and its influence on reservoir distribution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 12: 3629–3640.
- [29] 刘宏, 谭秀成, 李凌, 等. 孔隙型碳酸盐岩储集层特征及主控因素—以川西南嘉陵江组嘉 5 段为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2011 38(3): 275–281.
Liu Hong, Tan Xiucheng, Li Ling, et al. Characteristics and main controlling factors of porous carbonate reservoirs: A case from the Jia 5 Member of the Jialingjiang formation, southwest Sichuan basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011 38(3): 275–281.
- [30] 周彦, 谭秀成, 刘宏, 等. 四川盆地磨溪构造嘉二段孔隙型碳酸盐岩储层的评价 [J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 372–377.
Zhou Yan, Tan Xiucheng, Liu Hong, et al. Evaluation of porous carbonate reservoir of Jia 2 Member in Moxi structure of Sichuan basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 30(3): 372–377.
- [31] 何治亮, 高志前, 张军涛, 等. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储层形成与分布的控制 [J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 853–859.
He Zhiliang, Gao Zhiqian, Zhang Juntao, et al. Types of sequence boundaries and their control over formation and distribution of quality carbonate reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 853–859.
- [32] 马宏霞, 孙辉, 邵大力, 等. 缅甸若开盆地上中新统—上新统深水沉积层序地层划分及控制因素 [J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 136–141.
Ma Hongxia, Sun Hui, Shao Dali, et al. Sequence stratigraphy of the Upper Miocene-Pliocene deepwater deposits and its controlling factors in Rakhine Basin, Myanmar [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 136–141.

(编辑 董立)