

# 四川盆地川西坳陷龙门山前雷口坡组四段气藏层序划分及储层发育控制因素

李宏涛,胡向阳,史云清,肖开华,贾跃玮,魏修平,冯琼

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京 100083;

2. 中国石化海相油气藏开发重点实验室,北京 100083;

3. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

**摘要:**通过薄片、岩心、测井和地震资料,对四川盆地川西坳陷中段龙门山前石羊场-金马-鸭子河地区雷口坡组四段上亚段储层高频层序、沉积微相进行研究;结合储层测井解释结果,总结储层在层序和沉积微相中的分布,分析层序沉积对储层发育的控制。结果表明,雷四上亚段构成一个完整四级层序,并可进一步划分为多个五级和六级高频层序。高频层序的向上变浅沉积旋回特征明显,横向对比好。雷四段上亚段在研究区主要为潮坪相沉积,主要发育潮间带和潮下带亚相,纵向上岩性多变,横向上分布较为稳定。潮间带是储层发育的有利亚相,可划分为云坪、藻云坪和灰云坪等微相;潮下带可划分为灰坪、藻灰坪和云灰坪等微相。潮间带粉晶云坪、藻(层叠)云坪是优质储层发育的有利微相,一般发育于上、下两个储层段高频层序中、上部,储层旋回对比性好。高频层序控制潮间带有利沉积微相分布,对后期成岩作用也具有一定的影响,是储层空间展布与储层发育的关键控制因素。

**关键词:**层序地层;储层分布;沉积相;气藏;雷口坡组;川西坳陷;四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

## Sequence division and controlling factors of reservoir development of the 4th Member of Leikoupo Formation in foreland of Longmen Mountains in the Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

Li Hongtao, Hu Xiangyang, Shi Yunqing, Xiao Kaihua, Jia Yuewei, Wei Xiuping, Feng Qiong

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory for Marine Oil and Gas Exploitation, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on detailed observation of cores, thin section, well logging and seismic data analysis, high frequency sequence and sedimentary microfacies of the Upper  $T_2l^4$  were studied in the Shiyangchang-Jinma-Yazihe area of foreland of Longmen Mountains in western Sichuan Depression. Combined with logging interpretation results, the reservoir distribution and controlling factors of reservoir development are analyzed. The results indicate that the Upper  $T_2l^4$  can be divided into one fourth-order sequence, and may be further divided into multiple fifth-order and sixth-order high frequency sequences. The high frequency sequence has the characteristics of sedimentary assemblages obviously shallowing upward and their horizontal correlation is good. Sedimentary environments mainly are tidal flat in the research area, and the tidal flat deposits mainly develop intertidal zone and subtidal zone sub-facies. Lithology of flat deposits is varied in the vertical direction and is more stable in horizontal orientation. Intertidal zone is a favorite sub-facies for reservoir development, and can be divided into dolomite flat, algae dolomite flat, dolomite-lime flat micro-facies. Subtidal zone can be divided into lime flat, algae lime flat, dolomite lime flat micro-facies. Silty-fine dolomite flat, algal (laminated) dolomite flat in the intertidal zone is favorable micro-facies for reservoir development. They were usually distributed in middle-upper part of upper and lower reservoir with clear reservoir cycles. The favorable intertidal micro-facies distribution reservoir for development is

收稿日期:2016-11-10;修订日期:2017-04-12。

第一作者简介:李宏涛(1977—),男,博士、高级工程师,气藏开发地质和气藏描述。E-mail:liht.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05017005);中石化科技部项目(P16111)。

controlled by (high frequency) sequence, which also has a certain impact to later diagenesis. The high frequency sequence is the key factor to affect reservoir formation and distribution.

**Key words:** sequence stratigraphy, reservoir distribution, sedimentary facies, gas pool, Leikoupo Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin

四川盆地川西坳陷龙门山前构造带彭州1井在雷口坡组四段上亚段(雷四上亚段)发现白云岩(岩溶)储层<sup>[1]</sup>,测试日产天然气达 $115 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业气流,随后羊深1井和鸭深1井也相继获得突破,测试产量分别为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,  $48.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的中产工业气流,从而发现雷四上亚段气藏(简称雷四气藏),2015年已提交预测+控制储量达数千万方。邻区新场构造部分钻井在雷四上亚段测试后,也获中-高产工业气流<sup>[2-4]</sup>,显示川西海相雷口坡组是继普光、元坝之后的又一规模海相气田,亦是中石化“十三五”增储上产的重点目标。

前人对川西坳陷雷四气藏的研究主要集中在以新场构造带为主体的基础地质研究,如烃源评价、储集条件分析和生储盖组合配置等成藏要素和勘探潜力等方面<sup>[1-2]</sup>,或分析岩溶储层的发育控制因素,如古地貌、岩性和古气候等<sup>[3]</sup>,以及通过地球物理反演等方法手段对岩溶储层的平面分布进行预测<sup>[4]</sup>。然而,对于以龙门山前构造带为主体的雷四气藏的开发地质评价,由于该区岩性组合多样,非均质性强,展布规律复杂,产能差异大<sup>[3-4]</sup>,在层序格架划分、沉积体系、沉积相及其对储层发育控制因素等方面有待深入分析。四川盆地雷口坡组四段岩溶型气藏还包括元坝气田和龙岗气田的雷口坡组气藏<sup>[5-6]</sup>,然而这两个地区的雷口坡组四段目的层的岩溶蚀蚀厚度、岩溶规模及沉积环境等,与川西雷四段均存在较明显的差异<sup>[7]</sup>,进行储层研究难以有效类比。例如,该区经历岩溶时间相对较短( $<5 \text{ Ma}$ ),总体岩溶标志相对不明显,为弱岩溶储层<sup>[5]</sup>。同时,分布特征与典型风化壳岩溶等成岩作用控制的缝洞型储层差异较大,即难以利用表层岩溶带、渗流岩溶带和潜流岩溶带等经典的岩溶分带来划分有利储层展布<sup>[8-10]</sup>。因此,层序及沉积所控制的原始岩相分布更可能是控制储层展布的关键因素<sup>[11-15]</sup>。然而,研究显示川西地区雷四段主要为台地边缘内的局限台地-蒸发台地沉积<sup>[2-3]</sup>,但上述认识用于目的层雷四段上亚段沉积相划分,过于笼统,不能更好地反映沉积水体深浅和水动力条件等因素,对沉积构造和岩性变化的影响<sup>[15]</sup>,需要进一步明确雷四上亚段目的层的沉积体系、沉积模式与亚(微)相类型等。更重要的是,在碳酸盐岩地层中建立高频层序地层格架,并结合

沉积和成岩等储层发育控制因素的分析,不仅可以确定有利的储层发育层段,分析产能差异的地质原因,更重要的是为储层精细对比和储层叠置结构分析提供了可靠依据<sup>[11-16]</sup>。

为此,本文利用川西龙门山前构造带石羊场-金马-鸭子河地区雷口坡组四段钻井岩心及薄片观察、测井等数据,通过沉积环境和岩相古地理识别和解释,运用高频层序精细层序划分和对比技术,在层序地层格架内分析沉积体系和沉积相展布,结合储层测井解释,分析有利储层发育段与层序、沉积的关系,弄清层序沉积对优质储层分布、产能差异的控制作用,为该气藏更精细的储层描述、评价等开发地质工作提供基础和依据。

## 1 研究区地质背景

### 1.1 构造特征

研究区位于四川盆地川西坳陷中段西部。川西坳陷构造上具有“东西分带、南北分段”的构造特征,自北向南可分为川西坳陷北段、中段和南段(图1a)。中国石化探区主要位于川西坳陷中段<sup>[15]</sup>,自西向东可分为龙门山逆冲推覆构造带、川西坳陷构造带、川中隆起西部斜坡构造带(图1a),并可进一步划分为“两隆、两凹、两斜坡”6个三级构造单元。两隆为金马-鸭子河-安县隆起带、新场隆起带,两凹为成都凹陷、绵竹凹陷,两斜坡为广汉-中江斜坡、永兴-绵阳斜坡(图1a)。本文研究区即位于北东走向的石羊场-金马-鸭子河构造带上(图1a),为关口断裂及彭县断裂之间所夹区域,呈北东向展布的断背斜,可以进一步划分出的3个次级构造圈闭,即鸭子河构造、金马构造和石羊场构造,分别以鸭深1井、彭州1井和羊深1井为相对高点,构造高点依次降低(图1b)。断裂以北东向逆断层为主,少量发育近东西向及北西向小规模逆断层。

### 1.2 沉积背景

四川盆地中三叠世雷口坡组沉积,主要为受限制的陆表海间歇性海水进退所形成的断续淹没的局限或蒸发台地,受东南江南古陆的隆升、雪峰古陆的急剧升起并向西北推覆,及泸州-开江水下隆起形成的影响,

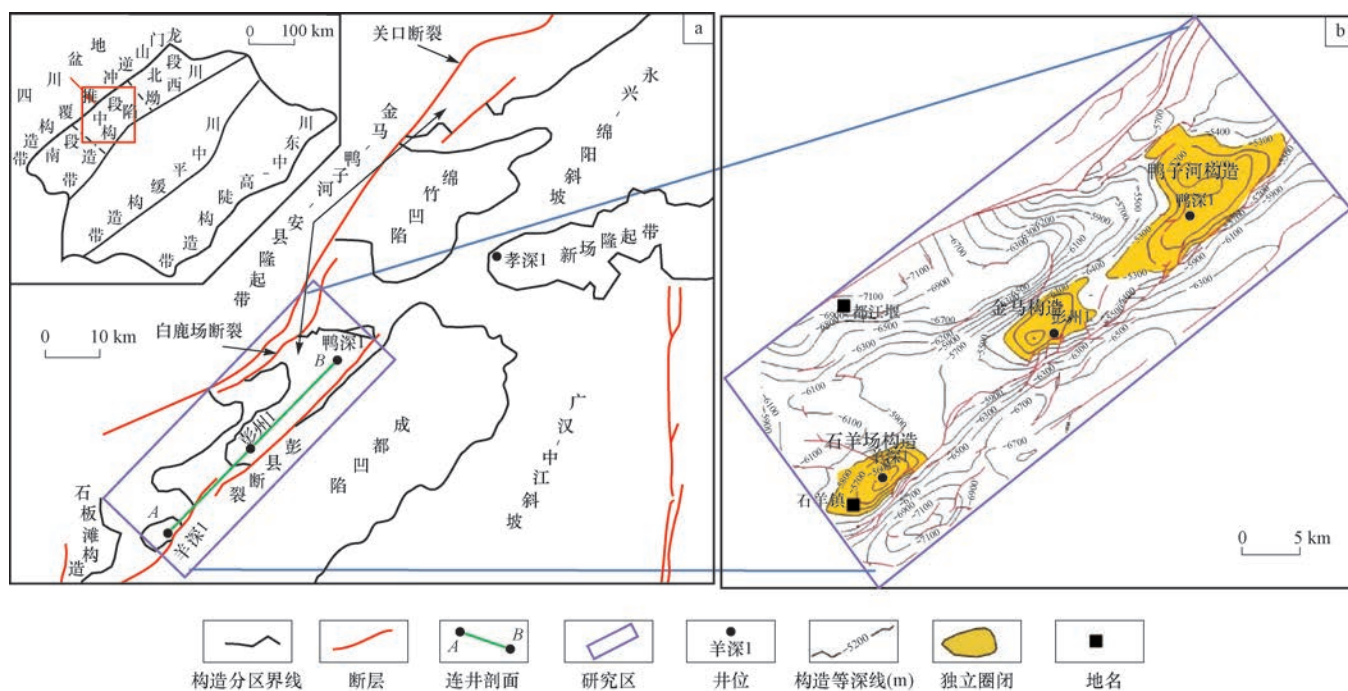


图1 川西地区雷口坡组顶面构造划分(a)及研究区构造等深线(b)特征

Fig. 1 Tectonic unit division at the top of Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression(a) and structure contour map of the study area(b)

台地整体逐渐演化为东高西低的古地理格局,并形成次一级的台内隆凹。随着局部区域构造升降及干旱、潮湿气候交替出现,海水进退频繁,形成多套白云岩-硬石膏岩为主的沉积旋回组合<sup>[17-18]</sup>,雷口坡组末期出现水进的灰岩沉积。

中三叠世末,受印支运动影响,四川盆地整体抬升,中三叠统碳酸盐岩普遍受到剥蚀和“喀斯特”化,形成了区域性不整合面,川西地区雷口坡组之上的天井山组基本被剥蚀殆尽<sup>[2-3]</sup>,雷四段在川西中国石化探区也遭受过不同程度的剥蚀,总体上剥蚀厚度由东向西减薄。

## 2 地层层序对比

### 2.1 四级层序界面识别、划分与对比

前人研究显示,雷四段可单独划分为一个三级层序<sup>[18]</sup>。本次研究根据沉积旋回韵律性,进一步在雷四段上亚段的底部识别出膏云岩与白云岩的岩性分界面(SSB2),和顶部区域岩溶侵蚀面(SSB1)<sup>[2-4]</sup>。作为四级层序界面,界面上下电测曲线亦呈较明显突变特征(图2)。例如顶界面之下为较典型的岩溶风化壳沉积,泥质含量增加,在测井曲线上形成容易识别的标志层,表现为高自然伽玛值、低电阻率值,与界面之上的厚层状致密灰岩低自然伽玛值、高电阻率值的电测响应特征区别明显。在四级层序内部,进一步对次级海泛面

(SMFS)进行了识别。然而,本区的海泛面的形成不是渐变的,而是突变的,为层状白云岩向厚层状灰岩突变的岩性转换面,由快速海侵形成最大海泛面的灰岩沉积,白云岩化作用最弱,灰质含量最高,测井曲线表现为厚层灰岩段的相对高自然伽玛值<sup>[11-12]</sup>,在测井曲线上显示为高电阻(LLD)、相对高伽马(GR)和低中子(CNL)。

研究区雷四上亚段内部低位域不发育,因此以海泛面为界,构成了由次级海侵体系域(STST)和次级海退体系域(SHST)组成的完整对称四级层序(图2)。四级层序界面在地震剖面上,也具有一定的响应。四级层序顶界面的SSB1界面位于强波峰处偏下约10ms左右,表现相对清晰,研究区内可追踪,该强波峰为区域标准反射层,即马鞍塘组一段灰岩与马鞍塘组二段下部泥岩构成的强波阻抗界面。雷四上亚段底界面的四级层序界面SSB2,即对应雷四上亚段白云岩与雷四中亚段膏云岩的界面,在地震剖面上,表现低频、中-弱振幅波峰反射,背斜轴部连续性好,两翼反射较弱,连续性较差(图3)。尽管四级层序界面SSB2在地震剖面上追踪相对困难,但在井震合成记录详细标定的约束下,依据研究区内地层厚度变化趋势基本一致的原则,依然可以追踪。由此,以钻井层序划分为基础,地震剖面解释的层序界面为约束,建立了雷四段井间四级层序格架。总体上,雷四上亚段在研究区范围四级层序格架。总体上,雷四上亚段在研究区范围内分布稳定,厚度介于135~140 m。



Fig. 3 Sequence and systems tract division from seismic profile across Well Yangshen 1-Pengzhou 1-Yashen 1 in the Western Sichuan Depression (see Fig. 1 for the cross-section location)

## 2.2 高频层序界面识别、划分与对比

在四级层序格架内,对雷四上亚段进行高频层序界面识别<sup>[19]</sup>,详细标定并总结界面测井响应特征,完成全井段高频层序划分与连井对比,为进一步沉积演化及储层发育的控制因素分析提供基础。

高频层序地层的概念由 Van Wagoner 等提出,指由周期为 0.1 ~ 0.5 Ma 的四级以上海平面旋回产生的沉积响应。然而,对于高频层序,国内外许多学者认识并不统一。对于不同级别高频层序的厚度和时限划分,不同的研究者也有不同的看法,但大多数人都认为四级层序和五级层序与米兰科维奇天文周期有关。四级层序是在米兰科维奇长周期内形成的,其时限为 0.1 ~ 0.4 Ma,大致相当于 Brett 的准层序组 (parasequence set)<sup>[16]</sup>;五级层序是在米兰科维奇短周期内形成的,其时限为 0.01 ~ 0.04 Ma,相当于 Vail 的单层序 (simple sequence) 或 Brett 的准层序 (parasequence)<sup>[16]</sup>。

需要强调的是,本文所指的高频层序(五级层序和六级层序)相当于经典层序地层学中的准层序及以下级别的概念<sup>[20]</sup>,即五级层序发育初期快速水进导致沉积空间突然增大,准层序边界相当于沉积间断面,而初始海泛面至最大海泛面时期的沉积记录,往往由于碳酸盐生长的“滞后效应”而欠发育,导致准层序边界相当于沉积间断面<sup>[13]</sup>,因而五级高频层序总体具有水体向上变浅的沉积特征。在五级层序内仍然可以识别出更小向上变浅的沉积韵律层,即六级层序<sup>[20-21]</sup>,相当于旋回层序地层学中的“米级旋回”,是高频海平面变化周期内,地层中能够识别的由异旋回机制控制的最小层序单元<sup>[22]</sup>。高频层序界面的识别要综合以下因素:岩性突变、层厚突然增加或减少、可能的冲刷与侵蚀、以及测井曲线值的突变等<sup>[16]</sup>。

本区五级层序界面一般为灰岩/云岩的岩性突变界面,电测曲线响应突变特征较明显(如电阻率曲线和三孔隙度曲线)。六级层序界面除上述的岩性突变面,还存在岩相转换面,如深灰色微晶云岩与灰色粉晶云岩的界面或鸟眼构造云岩与藻纹层构造云岩的分界面(图4中的⑥),同样具有界面之上沉积水体突然加深的准层序边界的特征。显然,上述通过岩心识别的高频层序界面详细标定测井曲线后,可进行全井段高频层序识别与划分。但需要说明的是,受钻井扩径因素的影响,GR、AC 和 DEN 等对岩性识别相对较差,而 LLD 曲线受钻井扩径的影响较小,对岩性的响应较为敏感,致密灰岩最高,膏岩次之,纯白云岩最低,而过渡

岩性如云质灰岩、灰质云岩、膏质云岩,则介于三者之间。目的层岩性主要为灰岩和云岩,因此,测井曲线 LLD 随着岩石中白云石含量增加电阻逐渐降低。由此,可构成一个明显向上变浅由灰岩向云岩转化的高频旋回(图4)。需要注意的是,在雷四段上亚段底部,可出现测井曲线 LLD 向上增加的向上变浅的高频层序,这是由于云岩向上变浅为含膏云岩造成的。这样,利用测井曲线在单井上完成多个五级和六级高频层序的识别与划分。依据厚层灰岩隔层和储层在层序中的分布,把下两个五级层序作为下储层段,把上两个五级层序划分为上储层段。在雷四段上亚段高频层序进行单井精细划分和对比基础上,建立连井的高频层序格架。高频层序在研究区纵向上具有良好的对比性,横向上变化具有同步性,揭示了这些高频层序主要是沉积背景(如海平面升降)变化所形成的异旋回。

## 3 沉积特征

### 3.1 沉积体系划分

地层对比结果表明,雷口坡组四段上亚段厚度稳定,六级高频层序数量多,且厚度薄,通常为 10 m 以内的米级旋回,向上变浅沉积特征明显,井间对比性好,反映了沉积环境相似,海平面升降的低幅波动对沉积环境具有一致的影响。岩心观察及显微镜下观察表明,岩性上为相对低能环境的云岩与灰岩,云岩以藻粘结构造云岩、藻纹层构造云岩、藻叠层构造云岩、藻屑云岩、微晶云岩和粉晶云岩为主(图5),少量泥晶云岩。生物除藻类外,其他生物不发育,偶见介形虫,进一步显示原始沉积环境为相对闭塞的中-低能量、相对高盐度水体环境。灰岩以藻砂屑灰岩、藻粘结灰岩和微晶灰岩为主。在沉积构造上,可见明显的叠层石构造、纹层构造和鸟眼构造等潮坪相沉积的相标志(图5)。考虑到在川西龙门山地区雷口坡组沉积时期,存在古岛链或水下古隆起、台缘滩的区域沉积背景<sup>[2,4]</sup>,以及地层对比结果、岩性特征、沉积构造相标志等证据,综合分析认为,川西地区雷四段上亚段总体为碳酸盐岩潟湖-潮坪沉积体系,研究区以潮坪沉积为主(图6)。

### 3.2 典型相标志及相带划分

研究区潮坪相可进一步细分为潮下带、潮间带和潮上带亚相(图6)。

#### 1) 潮下带亚相

颜色相对较深,以灰色、深灰色为主,沉积构造以

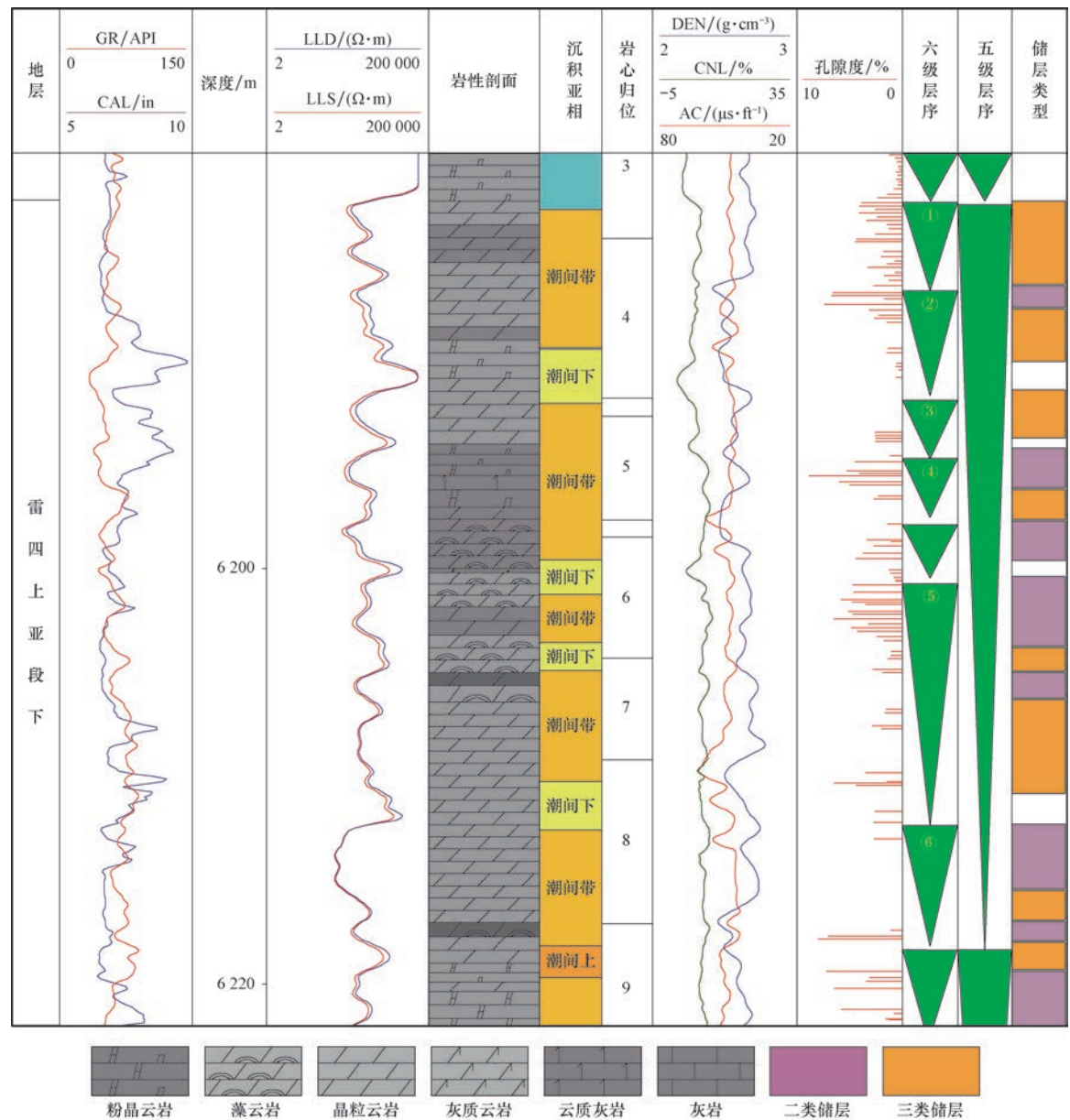


图 4 川西坳陷羊深 1 井雷四上亚段取心段高频层序界面划分与储层评价

Fig. 4 High frequency sequence boundaries division and reservoir evaluation of the Upper T<sub>2</sub>l<sub>4</sub> cores of Well Yangshen 1 in the Western Sichuan Depression

块状层理为主,其他构造相对不发育,岩性主要为微晶灰岩、(含)砂屑微晶灰岩和(含)藻屑灰岩等(图 5a, b),进一步划分为(云)灰坪、藻屑滩等微相(图 6),主要发育于雷四上亚段上储层段下部。

2) 潮间带亚相

藻层叠构造、鸟眼(或窗格)构造等典型潮间带沉积构造发育,岩性以云岩为主,包括微晶云岩、(微)粉晶云岩、藻层叠构造云岩、藻粘结构造云岩、(藻)砂屑云岩和纹层状构造云岩等,也可见(藻砂屑)云质灰岩等(图 5c—h),主要分布于雷四上亚段下储层段,以及上储层段的上部。按照碳酸盐岩灰质含量的高低(一定程度上反映沉积水体深浅),潮间带进一步划分为潮间下和潮

间上。相对而言,潮间下云岩中含有一定的灰质含量,潮间上云岩灰质含量较低。综合以上典型的岩相特征,进一步细分为(藻)(云)灰坪、灰云坪、藻屑滩、藻云坪、云坪和(含膏)(含泥)云坪等微相(图 6)。

3) 潮上带亚相

岩性主要有微晶云岩,部分含有似龟裂、结核等暴露标志,也可见有含膏云岩、膏质云岩(图 5i),主要发育于雷四上亚段下储层段的底部。进一步细分为云坪、膏云坪和云膏坪等微相(图 6)。

3.3 沉积相综合分析

岩心观察发现,在单井的五级或六级高频层序单



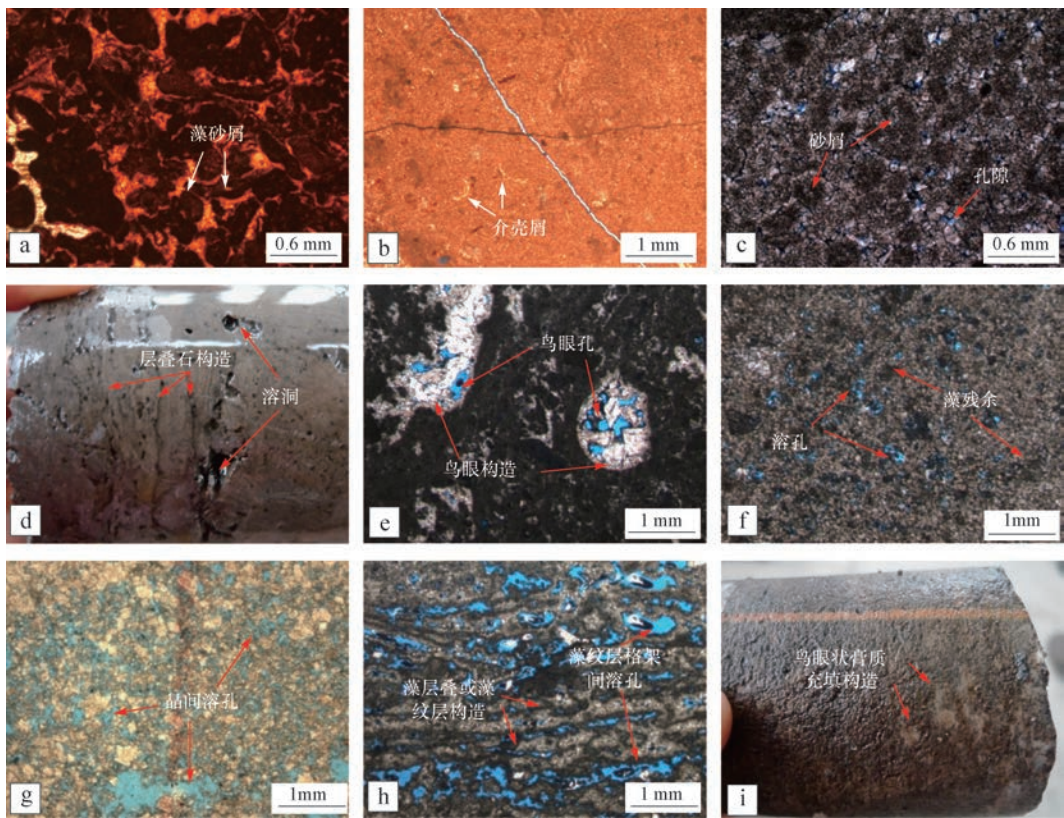


图 5 川西坳陷雷四上亚段典型沉积亚相岩相标志及储集空间类型

Fig. 5 Lithofacies marks of typical sedimentary micro-facies and reservoir space types of the Upper  $T_2l^4$  in the Western Sichuan Depression

a. 亮晶藻砂屑灰岩,局部见藻丝体相连,潮下带,羊深 1 井,埋深 6 123.3 m,染色薄片;b. 微晶灰岩,偶见介壳生物,见有微裂缝分布,潮下带或潟湖,羊深 1 井,埋深 6 125.6 m,染色薄片,岩心样品;c. 砂屑白云岩,球粒砂屑结构,见溶蚀孔隙发育,潮间下,鸭深 1 井,埋深 5780.5 m,铸体薄片;d. 层叠石云岩,藻层叠构造,潮间带,鸭深 1 井,埋深 5 780.46 m,岩心样品,直径为 8 cm;e. 藻粘结藻屑泥晶白云岩,潮间带,鸭深 1 井,埋深 5 789.2 m,蓝色铸体;f. 含藻粉晶白云岩,潮间上,鸭深 1 井,埋深 5 777.58 m,蓝色铸体;g. 粉微晶云岩,晶间溶孔发育,彭州 1 井,埋深 5 818.2 m,蓝色铸体;h. 藻粘结白云岩,藻层叠格架孔发育,羊深 1 井,埋深 6 223.2 m,蓝色铸体;i. 鸟眼雪花构造,孔隙膏质充填,潮上带,羊深 1 井,埋深 6 243.77 m,岩心样品,直径为 8 cm

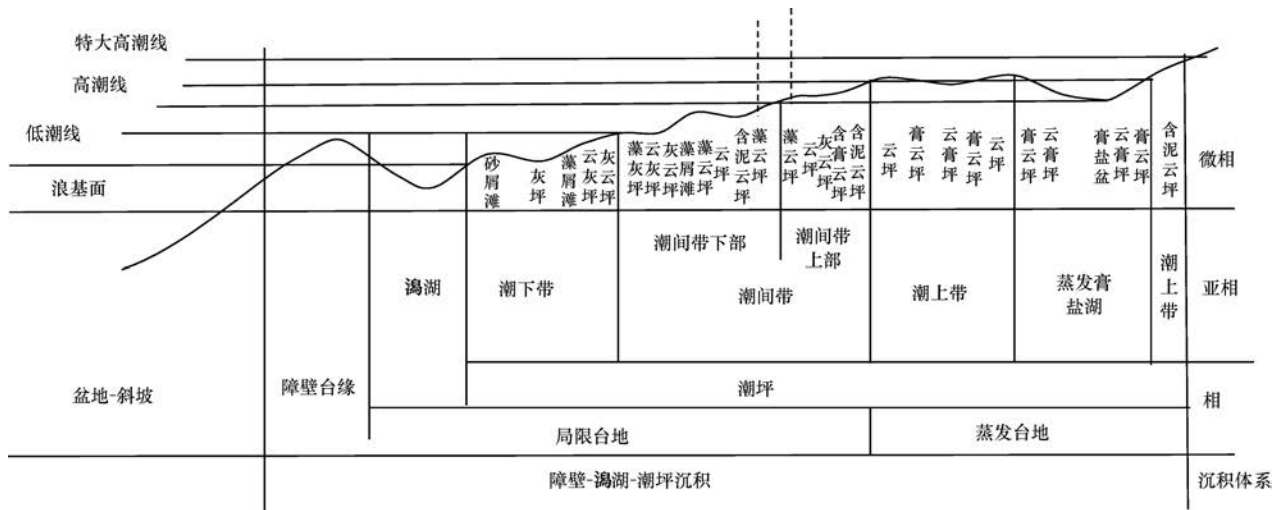


图 6 川西坳陷雷四上亚段沉积体系及相带划分

Fig. 6 Sedimentary system and facies of the Upper  $T_2l^4$  in the Western Sichuan Depression

元内,自下而上多发育潮下带微晶灰岩或生屑滩灰岩沉积,向上渐变为潮间带灰质云岩、藻层叠构造云岩、藻屑(粉晶)云岩,再向上渐变为潮上带的微晶云岩或膏质微晶云岩,基本反映了沉积水体由潮下带至潮间带、潮间带至潮上带向上变浅的垂向相序组合,构成了完整的碳酸盐岩潮坪相垂向沉积序列,储层物性总体向上变好,电阻由高到低,与高频层序变化特征一致。

综合以上研究结果,进一步的沉积相分析表明,3口井亚相类型对比良好,雷四段上亚段总体以潮间带和潮下带沉积为主,井间沉积亚相变化一致性好,反映了整体沉积地形比较平缓,横向上分布相对稳定的特点。总体纵向上,雷四上亚段下储层段沉积早期为潮上-潮间亚相云坪微相,逐渐演变为潮间下-潮间亚相的藻云坪和云坪等微相,随后经历了一次大规模的海泛,形成了上储层段泻湖或潮下带灰坪与下储层段潮间带云坪呈突变接触的岩性分界面,上储层段由潮下带灰岩逐渐演变为潮间云坪沉积(图2),横向上微相类型则略有变化,可能反映了沉积环境的差异。

## 4 储层发育控制因素探讨

### 4.1 储层测井解释结果及其展布

在岩心归位的基础上,详细标定测井曲线,建立储层的岩性、物性、含气性及电性之间的“四性”关系。通过详细的岩心观察与薄片镜下观察,雷四上亚段储集岩岩性总体以云岩为主,包括微-粉晶云岩、藻粘结云岩、(藻)砂屑云岩等,部分灰质云岩(图5),灰岩则较少,除有裂缝性储集岩以外,其余几乎均为非储集岩。储集类型主要为晶间溶孔、藻叠层格架溶孔、藻粘结粒间(溶)孔、膏模孔、溶洞和裂缝等(图5c—h),总体以前3种类型为主。有效储层孔隙度、渗透率平均为5.26%和 $9.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,然而,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品可达总数的55.9%。总体上,显示出本区储层具有特低孔-特低渗的储集特征。孔喉组合主要为中小孔-细喉,其中粉晶云岩喉道相对较大,与孔隙连通配置条件好。

通过上述储层基本岩性、物性特征进而确定适合研究区目的层的储层参数测井解释模型,建立测井解释标准,对石羊场-金马-鸭子河构造3口井进行了处理及精细解释,按照储层测井分类评价标准对储层进行测井评价,即Ⅰ类储层:孔隙度 $\geq 10\%$ ;Ⅱ类储层: $5\% \leq \text{孔隙度} < 10\%$ ;Ⅲ类储层: $2\% \leq \text{孔隙度} < 5\%$ 。储层纵向分布结果表明,石羊场-金马-鸭子河地区雷四上亚段,有利储层总体发育于下储层段四级层序

海侵体系域的上部五级高频层序内,以Ⅱ和Ⅲ类储层为主,Ⅰ类储层相对较少,不同类型储层呈“薄互层间互”分布的特征(图2,图4),主要受高频海平面升降频繁的影响。尽管储层分布复杂,非均质性极强,但进一步观察发现,不同类型储层的分布与在高频层序中的位置关系密切,特别是六级高频层序内,自下而上多数实测样品的储层物性(孔隙度)逐渐变好,而在高频层序界面处,优质储层向上可突变为非储层(图2,图4),这与高频层序界面上下多数岩性由云岩突变为灰岩的特征相一致,由此构成了多个物性由差变好的叠置组合。显然,通过高频层序分析,强非均质储层的分布有一定规律可循。

### 4.2 层序和沉积对储层发育的控制

层序、沉积与储层的发育的具有密切关系。层序的不同位置及类型控制着可容空间的大小及变化。进而控制着沉积物的类型及组合<sup>[23]</sup>,从而控制着储层发育的有利岩性,而岩性垂向变化所体现的旋回性是层序叠加样式的具体表现形式。

从不同类型储层在层序和沉积相中分布,以及前述储层基本特征的岩性物性分析来看,储层物性与岩性密切相关,即潮间带的云岩类物性最好,而潮下带的灰岩物性最差,特别是四级层序以海侵为主的潮间带亚相发育的各种云岩微相(图2,图4,图5),是储层发育的有利岩相。尤其在四级层序海侵体系域中-晚期,随着海平面逐渐上升,沉积环境总体由潮上-潮间上亚相转变为潮间亚相,水动力条件逐渐增强(如雷四上亚段下储层段上部五级层序),并适当保持准同生白云岩化(蒸发作用与回流渗透)的条件,形成有利储层的白云岩岩相,且胶结作用相对较弱<sup>[11-13,24-26]</sup>,原始孔隙度较高。进一步分析发现,在高频层序格架内,Ⅰ,Ⅱ类优质有效储层一般发育于五、六级高频层序潮间带中上部(图2,图4),藻砂屑云岩、藻层叠云岩、藻粘结云岩等可间歇性暴露于海平面之上,形成沉积及成岩暴露面,即高频层序的界面。随着潮湿、干旱气候的周期性交替变化,高频层序界面之下地层,大气水的淋滤以及层叠石中有机质的氧化分解,形成白云石晶间溶孔、层叠石格架溶孔以及砂屑粒间溶孔,而且这种环境也进一步有利于蒸发白云岩化、回流渗透白云岩化作用发生<sup>[11-13,24-26]</sup>,从而为有利储层白云岩岩相的形成提供了有利沉积和成岩环境,也为印支期岩溶及后期埋藏溶蚀等成岩作用提供流体运移通道与溶蚀空间<sup>[1-4,11-14]</sup>。四级层序海退体系域早期(如雷四上亚段上储层段下部),由于大规模的海侵作用,沉积水体



快速加深,发育潮下带砂屑灰岩及潟湖相的微晶灰岩,尽管部分藻砂屑云岩原始孔隙度较高,但整体处于水下,回流渗透白云岩化与暴露溶蚀作用弱,海底胶结作用较强<sup>[27-29]</sup>。

综上,川西坳陷中段西部地区雷口坡组四段上亚段(高频)层序与沉积对白云岩储层的形成与分布控制作用明显,即受高频层序叠置样式的控制,是储层发育的关键,亦可能为准同生期成岩作用、后期的风化壳岩溶及晚期的埋藏溶蚀等成岩作用提供了良好的流体运移通道与空间<sup>[11-14,30]</sup>,总体具有相控储层特征,即层序的叠置样式和变化控制着沉积亚相、微相的发育分布,进而控制着储层岩石类型、储层物性。

雷四上亚段下储层段(高频)层序格架内沉积微相横向变化,可能是影响本区3口井下储层段测试产量的关键因素之一。随着四级层序海侵体系域的逐渐水进,下储层段上部五级高频层序在金马地区以潮间带藻云坪、粉晶云坪等有利沉积微相为主(图5),尤其是粉晶云岩,孔隙连通性好,而在石羊场地区则主要为潮间-潮间下的藻云坪(图4,图5),储层物性相对较差。下储层段下部五级层序在石羊场构造区总体藻云坪有利微相更加发育(图4,图5),岩心观察中也可见白云岩岩心中含有较多的泥质,以及含有在相对高盐度、较深水体中的介形虫、介壳等生屑,显示沉积水体相对稍深。而在鸭子河地区,整体可能处潮间偏上的浅水低水动力微晶云坪微相(图2,图5),储层物性相对较差。因此,以上地质因素是导致研究区测试产量彭州1井>羊深1井>鸭深1井的可能原因之一。当然,影响气井测试产能的因素较多,如裂缝的发育程度与类型,通过成像测井解释发现,3口井裂缝发育规模和数量,彭州1井明显大于羊深1井和鸭深1井,且彭州1井高角度裂缝相对更加发育,而羊深1井、鸭深1井则以低角度缝和水平缝为主。考虑到本文主要从层序沉积的角度分析储层的分布与控制,裂缝及其他因素对钻井测试产量高低的影响在此不做深入讨论。

## 5 结论

1) 川西龙门山前石羊场-鸭子河构造带雷四上亚段可构成一个完整四级层序,进一步划分为4个五级和21个六级高频层序。高频层序界面主要为岩性突变面,界面上、下电测曲线突变响应特征明显。研究区高频层序总体具有向上变浅沉积特征,井间对比具有良好的可比性和一致性,反映总体沉积背景或沉积环境大致相似。

2) 研究区雷四上亚段主要属于潮坪沉积,主要发育潮下带、潮间带亚相,潮间带是储层发育的有利亚相;纵向上沉积环境变化快,岩性变化大,是导致本区储层非均质性强的关键因素;横向上各亚相井间对比好,分布相对稳定,沉积微相在横向上略有差异,反映了局部地形差异导致岩相的分异。

3) 研究区储层总体以Ⅱ和Ⅲ类储层为主,潮间带粉晶云坪、藻(层叠)云坪是优质储层发育的有利微相,Ⅰ和Ⅱ类优质储层一般发育于上、下两个储层段中上部和高频层序的中上部;高频层序控制着潮间带有利微相分布,对后期成岩作用也具有一定的影响,是影响储层发育与空间展布的关键,总体具有相控储层发育的特征。

致谢:感谢中石化西南局武恒志副总经理在文中就层序沉积对储层发育控制的指导建议!

## 参 考 文 献

- [1] 孟昱璋,徐国盛,刘勇,等. 川西雷口坡组古风化壳喀斯特气藏成藏条件[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(1): 70-79.  
Meng Yuzhang, Xu Guosheng, Liu Yong, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of the weathering crust paleokarst gas reservoir of Leikoupo Formation, West Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(1): 70-79.
- [2] 许国明,宋晓波,冯霞,等. 川西地区中三叠统雷口坡组天然气勘探潜力[J]. 天然气工业,2013,33(8): 8-14.  
Xu Guoming, Song Xiaobo, Feng Xia, et al. Gas potential of the middle Triassic Leikoupo Fm in the western Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 8-14.
- [3] 唐宇. 川西地区雷口坡组沉积与其顶部风化壳储层特征[J]. 石油与天然气地质,2013,34(1): 42-47.  
Tang Yu. Characterization of the sedimentation of the Leikoupo Formation and the weathering crust reservoirs at the top of the Formation in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 42-47.
- [4] 李素华,卢齐军,许国明,等. 川西XC地区雷口坡组顶不整合面储层预测方法[J]. 石油地球物理勘探,2013,48(5): 793-798.  
Li Suhua, Lu Qijun, Xu Guoming, et al. Reservoir prediction in the top Leikoupo unconformity surface in the area XC, Sichuan[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(5): 793-798.
- [5] 辛勇光,谷明峰,周进高,等. 四川盆地雷口坡末期古岩溶特征及其对储层的影响——以龙岗地区雷口坡组四3段为例[J]. 海相油气地质,2012,17(1): 73-78.  
Xin Yongguang, Gu Mingfeng, Zhou Jingao, et al. Characteristics and affection of Middle Triassic karstification on Leikoupo 43 reservoir in Longgang area, Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(1): 73-78.
- [6] 钟怡江,陈洪德,林良彪,等. 川东北地区中三叠统雷口坡组四段

- 古岩溶作用与储层分布[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2272–2280.
- Zhong Yijiang, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. Paleokarstification and reservoir distribution in the Middle Triassic carbonates of the 4th member of the Leikoupo Formation, northeastern Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2272–2280.
- [7] 周进高, 辛勇光, 谷明峰, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探方向[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 16–21.
- Zhou Jingao, Xin Yongguang, Gu Mingfeng, et al. Direction of gas exploration in the Middle Triassic Leikoupo Formation of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(12): 16–21.
- [8] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101–106.
- Li Yang, Fan Zhihui. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 32(1): 101–106.
- [9] 何江, 方少仙, 侯方浩, 等. 风化壳古岩溶垂向分带与储集层评价预测——以鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组马五5—马五1亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 534–542.
- He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Vertical zonation of weathered crust ancient karst and the reservoir evaluation and prediction—A case study of M<sub>55</sub>–M<sub>51</sub> sub-members of Majiagou Formation in gas fields, central Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 534–542.
- [10] 顾家裕. 塔里木盆地轮南地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶储层特征及形成模式[J]. 古地理学报, 1999, 1(1): 54–60.
- Gu Jiayu. Characteristics and evolutionary model of karst reservoirs of Lower Ordovician carbonate rocks in Lunan area of Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 1999, 1(1): 54–60.
- [11] 李宏涛, 龙胜祥, 游瑜春, 等. 元坝气田长兴组生物礁层序地层及其对储层发育的控制[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 39–48.
- 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 reservoirs development in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 39–48.
- [12] 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.
- [13] Moore C H. 2001. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Amsterdam: Elsevier, 1–444.
- [14] 郑剑, 王振宇, 杨海军, 等. 高频层序格架内礁型微地貌特征及其控储机理——以塔中东部地区上奥陶统为例[J]. 地质学报, 2015, 89(5): 942–956.
- Zheng Jian, Wang Zhenyu, Yang Haijun, et al. The control mechanism of microtopography in the high frequency sequence framework to reef-Bank complex reservoir: An example from the Upper Ordovician Lianglitge Formation in Eastern Tazhong Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(5): 942–956.
- [15] 李宏涛, 龙胜祥, 吴世祥, 等. 川西坳陷中段下三叠统碳酸盐岩储层成岩作用与机理[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 552–559.
- Li Hongtao, Long Shengxiang, Wu Shixiang, et al. Diagenesis and forming mechanism of the Lower Triassic carbonate reservoirs in the middle Part of the western Sichuan Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(4): 552–559.
- [16] 游李伟, 彭军, 汪彦, 等. 高频层序研究在碳酸盐岩储层对比中的应用——以塔河油田 TK625 井区鹰山组上部储层为例[J]. 新疆地质, 2006, 24(1): 59–63.
- You Liwei, Peng Jun, Wang Yan, et al. Application of high-frequency sequence study in the correlation of carbonate reservoirs—Illustration in Upper Yingshan Formation around TK625 Well in Tahe Oil Field[J]. *Xinjiang Geology*, 2006, 24(1): 59–63.
- [17] 李凌, 谭秀成, 邹春, 等. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及膏盐盆迁移演化与构造意义[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 316–324.
- Li Ling, Tan Xiucheng, Zhou Chun, et al. Origin of the Leikoupo Formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in the Sichuan basin, and their structural significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(2): 316–324.
- [18] 吕玉珍, 倪超, 张建勇, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组有利沉积相带及岩相古地理特征[J]. 海相油气地质, 2013, 18(1): 26–32.
- Lu Yuzhen, Ni Chao, Zhang Jianyong, et al. Favorable sedimentary facies zones and lithofacies palaeogeography of middle Triassic Leikoupo formation in Sichuan basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(1): 26–32.
- [19] 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(2): 131–160.
- [20] Brett C E, Goodman W M, Loefer S T. 1990. Sequences, cycles and basin dynamics in the Silurian of the Appalachian foreland basin[J]. *Sedimentary Geology*, 69: 191–224.
- [21] Vail P R, Audemard F, Bowman S A et al. 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology an overview In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A eds. *Cycles and events in stratigraphy*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 617–659.
- [22] 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.
- [23] 邓宏文, 王红亮, 宁宁. 沉积物体积分配原理——高分辨率层序地层学的理论基础[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2000, 7(4): 305–313.
- Deng Hongwen, Wang Hongliang, Ning Ning. Sediment volume partition principle: theory basis for high resolution sequence stratigraphy[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 2000, 7(4): 305–313.
- [24] Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics[J]. *AAPG bulletin*, 1995, 79(2): 186–204.
- [25] Lucia F J, Major R P. Porosity evolution through hypersaline reflux

- dolomitization[M]. International Association of Sedimentologists Special Publication 1994, 325–341.
- [26] 杜金虎, 张宝民, 汪泽成, 等. 四川盆地下寒武统龙王庙组碳酸盐缓坡双颗粒滩沉积模式及储层成因[J]. 天然气工业, 2016, 36(6): 1–10.
- Du Jinhu, Zhang Baomin, Wang Zecheng, et al. Sedimentary model and reservoir genesis of dual grain banks at the Lower Cambrian Longwangmiao Fm carbonate ramp in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(6): 1–10.
- [27] 李宏涛. 河坝气藏飞仙关组三段储集岩特征及成岩作用[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 263–271.
- Li Hongtao. Diagenesis and characteristics of reservoirs in the member 3 of the lower Triassic Feixianguan formation in Heba gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 263–271.
- [28] 李宏涛. 台内鲕粒滩气藏成藏过程与模式——以川东北河坝地区下三叠统飞仙关组三段为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 723–732.
- Li Hongtao. Accumulation process and pattern of oolitic shoal gas pools in the platform: a case from member 3 of lower Triassic Feixianguan formation in the Heba area, northeastern Sichuan basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(5): 723–732.
- [29] Morse, J W, Machenzie, F T. 1990. Geochemistry of sedimentary carbonates[M]. New York, Elsevier Scientific Publ. Co., 696.
- [30] 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, 2016, 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, 2016, 35(6): 853–859.

(编辑 张玉银)

(上接第644页)

- [66] 高林. 碳酸盐岩成岩史及其对储层的控制作用——以普光气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 733–739.
- Gao Lin. Diagenesis of carbonate rocks and their control over reservoirs—An example from the Puguang gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 733–739.
- [67] 王恕一, 蒋小琼, 管宏林, 等. 川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(4): 366–372.
- Wang Shuyi, Jiang Xiaoqiong, Guan Honglin, et al. Diagenesis effects of Lower Triassic Feixianguan Formation reservoir in Puguang gas field, Northeast Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(4): 366–372.
- [68] 吴仕强, 朱井泉, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩结构构造类型及其形成机理[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1390–1400.
- Wu Shiqiang, Zhu Jingquan, Wang Guoxue, et al. Types and origin of Cambrian-Ordovician dolomites in Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(6): 1390–1400.
- [69] 朱井泉, 吴仕强, 王国学, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 67–79.
- Zhu Jingquan, Wu Shiqiang, Wang Guoxue, et al. Types and porosity characteristics of the Cambrian-Ordovician dolostones in Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(2): 67–79.
- [70] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 深层海相碳酸盐岩优质储层的形成、保存和破坏机制——以四川盆地震旦系—志留系为例[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 875–895.
- Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Formation, preservation and mechanism of marine deep carbonate high quality reservoir rocks: Illustrated by Sinian to Silurian System in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 875–895.
- [71] 朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 等. 深层白云岩储层油充注对孔隙保存作用研究[J]. 地质学报, 2015, 89(4): 794–804.
- Zhu Dongya, Zhang Dianwei, Zhang Rongqiang, et al. Role of oil charge in preservation of deep dolomite reservoir space[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(4): 794–804.
- [72] 彭守涛, 何治亮, 钱一雄, 等. 岩溶储层洞穴演化时限的沉积学、地球化学和年代学约束[C]//第五届中国石油地质年会文集, 2013: 157–158.
- Peng Shoutao, He Zhiliang, Qian Yixiong, et al. Evolutional time limit of karst reservoirs constraining from the sedimentological, geochemical and chronological data[C]//A collection of the Fifth Annual Meeting of China Petroleum and Geology, 2013: 157–158.
- [73] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合—联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743–752.
- He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 743–752.
- [74] 朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 等. 中国南方地区灯影组白云岩储层流体溶蚀改造机制[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1188–1198.
- Zhu Dongya, Zhang Dianwei, Zhang Rongqiang, et al. Fluid alteration mechanism of dolomite reservoirs in Dengying Formation, South China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 36(10): 1188–1198.
- [75] 朱东亚, 张殿伟, 刘全有, 等. 多种流体作用下的白云岩储层发育过程和机制[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(11): 2053–2062.
- Zhu Dongya, Zhang Dianwei, Liu Quanyou, et al. Dynamic development process and mechanism of dolomite reservoir under multi-fluid alterations[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(11): 2053–2062.

(编辑 李 军)