

川北地区茅口中晚期斜坡相沉积特征 及其油气地质意义

蒋航¹, 张玺华¹, 陈聪¹, 高兆龙¹, 山述娇¹, 罗平², 陈廷贵¹, 李天军¹, 胡罗嘉¹

1 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院; 2 中国石油勘探开发研究院

摘要 基于JG1井等最新钻井及地震资料,对四川盆地北部茅口组开展了详细的地层层序、沉积特征等方面的研究。结果表明:①JG1井茅口组发育斜坡相,证实了川北地区茅口组沉积的中晚期发生台槽分异,沉积分异时期为茅二b亚段沉积晚期至茅三末期。②JG1井茅二段中上部为下斜坡亚相,以灰黑色泥质灰岩和泥晶灰岩沉积为主,发育风暴沉积、硅质互层及页理;茅三段为上斜坡亚相,以生物碎屑泥晶灰岩和泥晶生物碎屑灰岩沉积为主,反映低能沉积环境,发育生物潜穴、生物碎屑叠瓦状层理。③川北地区斜坡相纵向上构成连续变浅的沉积序列,平面上沿剑阁—阆中一线呈北西向展布,在茅口中晚期形成进积型镶边碳酸盐台地沉积模式。④下斜坡亚相有机质丰度高,其中风暴岩的总有机碳含量可达15%,具有优越的生烃潜力。建立了茅口组旁生侧储、下生上储的成藏模式,这对认识和评价川北地区茅口组的资源潜力具有重要意义。

关键词 斜坡相; 沉积特征; 沉积演化; 勘探领域; 茅口组; 川北地区

中图分类号:TE121.3¹ **文献标识码**:A

0 前言

作为重要的油气勘探目的层系,对四川盆地中二叠统茅口组的勘探已有近70年的历程。前期针对茅口组的勘探研究主要集中在川中—川南地区的岩溶裂缝型储层^[1-4]。直至近年,部署于元坝地区的探井在茅口组获得工业气流,掀起了川北地区茅口组滩相孔隙型储层的研究热潮^[5-6],特别是茅口组顶部孤峰段的深水沉积以及LT1井茅口组盆地相的发现^[7-8],推动了针对四川盆地北部茅口组台地—斜坡—盆地沉积体系的台地边缘相的钻探部署。前人针对茅口组的地层层序、储层特征、白云岩成因以及孔隙型储层识别预测等方面已做了大量研究^[8-15],但由于钻井资料的局限性,茅口组深水沉积特征及其纵横向发育规律的相关研究还不够深入。胡东风^[6]基于对YB7井茅三段上部滩相白云岩的研究,认为茅口组台槽分异在茅三晚期发育,并根据地震相差异推测斜坡相位于YB6井附近;郝毅等^[10]基于野外剖面和钻井岩

心的研究,认为川北地区茅口组沉积晚期发育缓坡台地—斜坡—盆地沉积体系,推测斜坡相位于盆地外缘城口一带;陈轩等^[14]基于野外剖面的研究系统阐述了茅口组斜坡相的沉积特征,并通过地震资料预测斜坡相在九龙山地区的分布;钟原等^[15]在层序地层研究的基础上,以地震资料为主要依据预测茅口组斜坡—盆地相发育在剑阁地区以北。尽管川北地区已有不少井钻遇茅口组,也已认识到川北地区茅口组发育台地—斜坡—盆地沉积体系,但对斜坡相的研究仅限于野外露头,没有钻井明确证实,台槽分异的时空展布也主要是基于地震资料的推测^[13-14]。

2021年初,基于台缘—斜坡沉积体系的认识部署的JT1井在茅口组钻遇滩相孔隙型储层,并在茅二段测试获 $112.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业气流,展示了川北地区茅口组台缘带的良好勘探潜力^[5]。但是,随后在JT1井北侧部署的JG1井在茅口组并未钻遇优势相带及优质储层,表明前人依据野外露头、地震资料取得的有关台槽分异的认识仍不能满足油

收稿日期:2022-03-30;改回日期:2023-08-17

本文受国家科技重大专项“大气田富集规律与勘探关键技术”子课题“四川盆地二叠系—中三叠统天然气富集规律与目标评价”(编号:2016ZX05007-004)资助

第一作者:蒋航,硕士,工程师,主要从事石油与天然气勘探研究工作。通信地址:610041 四川省成都市高新区天府大道北段12号;E-mail:304176319@qq.com

为深灰色泥质灰岩和含泥灰岩,夹少量泥晶生物碎屑灰岩,自然伽马为齿状夹指状中高值,顶界自然伽马由高值向平直低值突变。茅三段岩性以灰色

泥晶生物碎屑灰岩为主,顶部与吴家坪组深灰色泥岩不整合接触,自然伽马整体为平直中低值,顶部受岩溶作用影响呈指状高值。

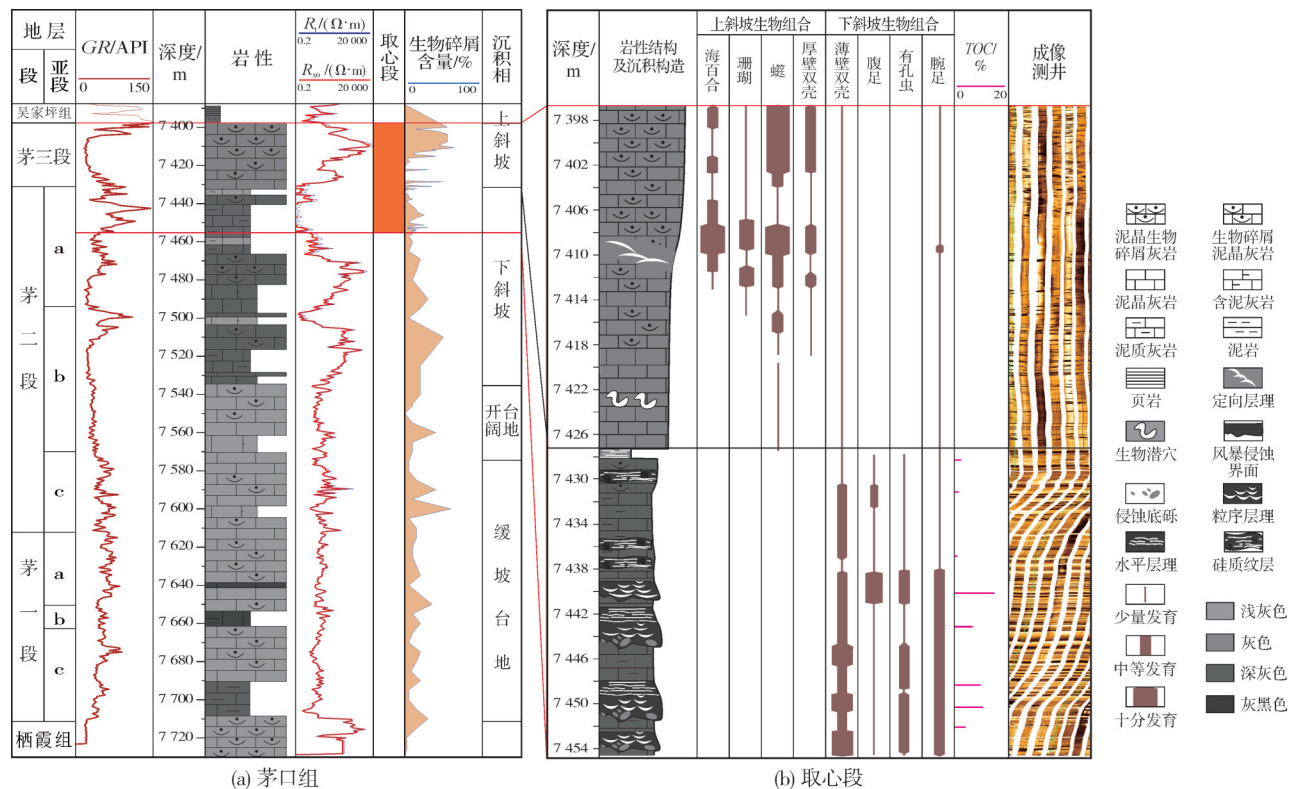


图2 川北地区JG1井茅口组综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of Maokou Formation of Well JG1 in northern Sichuan Basin

2.2 沉积特征

从JG1井茅口组的地层特征来看,茅二b亚段顶部至茅三段岩石的颜色普遍较深,同时自然伽马呈锥状高值,与茅一段相比在岩电特征上表现出相对深水的沉积特征,该特征与区域上茅口组中上部为向上变浅的沉积特征相悖。基于JG1井大量岩石学及沉积学特征的研究,认为茅口组中上部具有斜坡相沉积特征,并将斜坡沉积进一步划分为下斜坡亚相、上斜坡亚相。其中,下斜坡亚相在茅二b亚段上部至茅二a亚段发育,上斜坡亚相在茅三段发育,斜坡沉积由下至上连续沉积,构成向上变浅的沉积序列(图2)。

2.2.1 下斜坡亚相沉积特征

下斜坡水体较深,除风暴作用外,水动力一般较弱,岩性整体以暗色薄层泥质灰岩、泥晶灰岩与灰黑色硅质岩不均匀互层,以及风暴岩为主。JG1

井的茅二段上部可以见到大量下斜坡沉积相标志(图3)。

(1)整体岩性以灰黑色泥质灰岩和泥晶灰岩为主,颜色深且生物碎屑含量低,反映了还原环境下的静水沉积。

(2)发育大量几厘米至十几厘米不等的风暴沉积(图3a—3d),其主要识别标志为底界受风暴侵蚀作用而形成起伏微弱的不整合界面(图3b),其起伏程度均为毫米级,为下切程度较弱的底侵蚀层界面,少数界面之上发育砾屑层(图3c),由底部原岩侵蚀破碎而形成,砾径为毫米级,且分布极不均匀。由于风暴携带了大量细粒沉积物快速沉积,因此其颜色较正常沉积物略深。在风暴高峰期可携卷许多生物碎屑富集,因此风暴沉积物中的生物碎屑含量明显增多,以壳类为主,壳类生物多凹面上向,常具定向排列(图3d),局部可见少量异地搬运的浅水生物,如苔藓虫等。随着风暴作用的减弱,生物碎

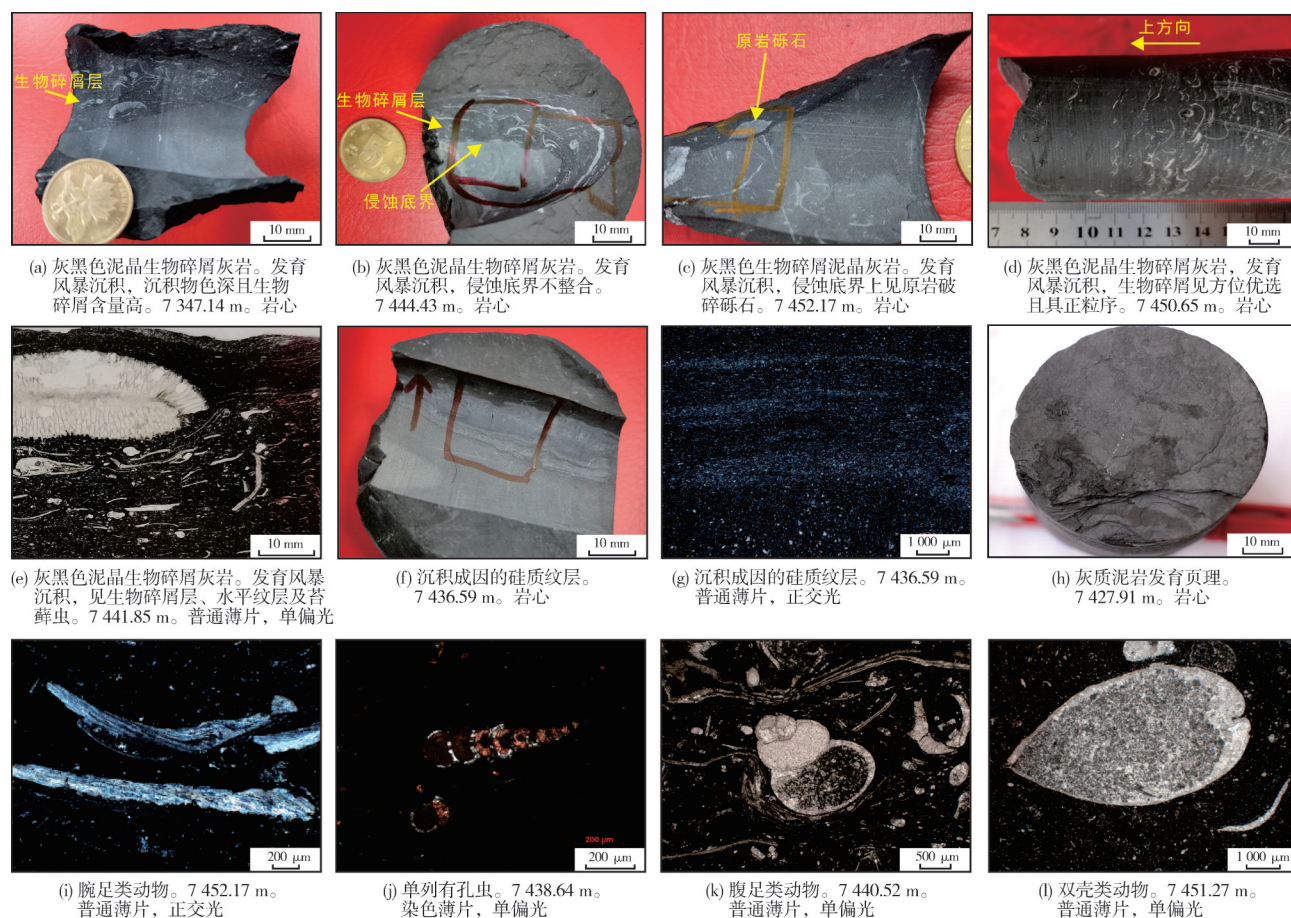


图3 川北地区JG1井茅二a亚段下斜坡沉积及生物特征

Fig. 3 Sedimentary and biological characteristics of the lower slope subfacies of submember-2a of Maokou Formation in Well JG1, northern Sichuan Basin

屑含量逐渐减少,形成生物碎屑层的粒序层理。在风暴衰减期,在风暴沉积的顶部形成微弱的水平层理(图3e),反映水动力进一步下降。在JG1井中完整的风暴沉积序列十分少见,主要由底侵蚀层+生物碎屑层构成(图3b),可见生物碎屑层+粒序层(图3d)、底侵蚀层+生物碎屑层+水平层(图3e)、底侵蚀层+砾屑层(图3c)等多种风暴沉积序列。从各序列组合及其厚度来看,风暴岩厚度多取决于生物碎屑层的沉积厚度^[19]。

(3)见到大量泥晶生物碎屑灰岩与硅质岩不均匀互层(图3f),硅质互层厚度为微米级至分米级(图3g),反映沉积水体整体较深;局部见少量灰质泥岩,且发育页理(图3h),指示欠补偿的沉积环境。

(4)在古生物特征方面,下斜坡以壳类、腕足类(图3i)、单列有孔虫为主(图3j),见少量腹足类(图3k),生物整体壳壁较薄,个体也十分微小,且保存相对完整(图3i—3l),具有低能深水生物组合特征^[20]。

(5)在成像测井方面,下斜坡亚相呈暗色与亮色薄互层状,说明地层为薄层状产出(图2b)。

2.2.2 上斜坡亚相沉积特征

上斜坡亚相位于台地向盆地方向一侧,其沉积水体较下斜坡的要浅,深度仍处于正常浪基面之下、氧化界面之上,水动力较弱;与下斜坡类似,上斜坡原地生物含量很低,整体上岩性组构与台地具有明显区分。JG1井上斜坡亚相发育在茅三段,其主要相标志见图4。

(1)在岩石学特征方面,茅三段下部为深灰色泥晶灰岩和含生物碎屑泥晶灰岩(图4a),生物含量很低;茅三段上部因紧邻台地边缘,其沉积物中含有大量异地搬运的浅水沉积物,颗粒沉积物不稳定,类型和大小变化很大,岩性为灰色—深灰色泥晶生物碎屑灰岩(图4b)。从岩石结构上看,整体泥晶含量较多,生物碎屑含量由下至上逐渐增多,且

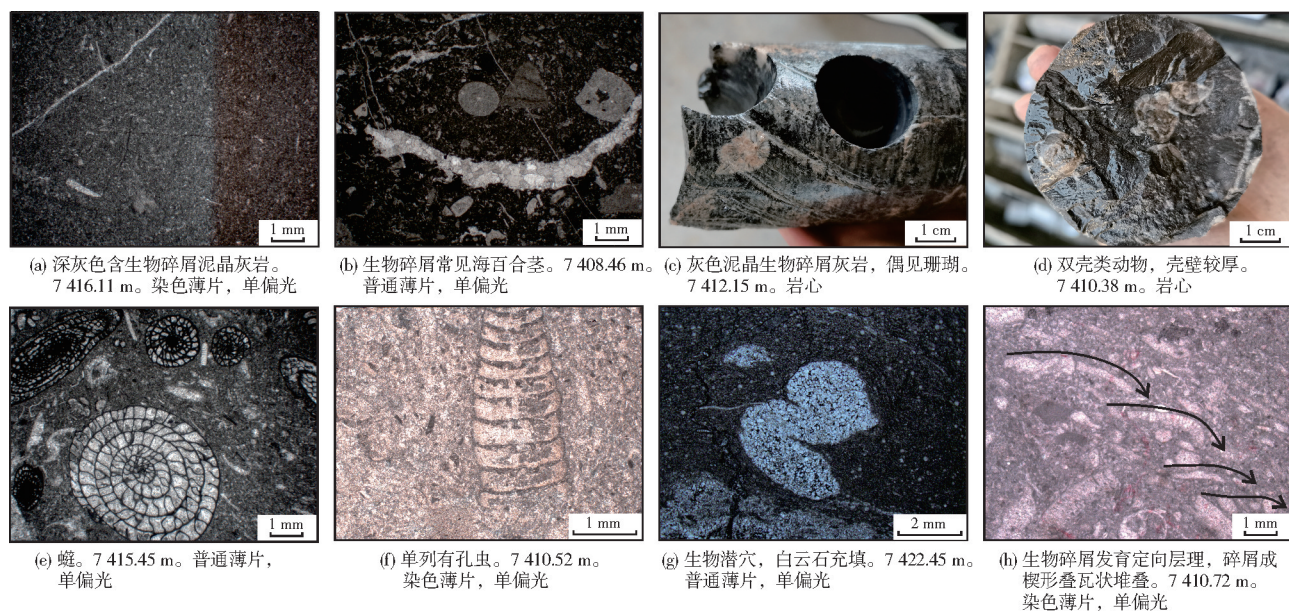


图4 川北地区JG1井茅三段上斜坡沉积及生物特征

Fig. 4 Sedimentary and biological characteristics of the upper slope subfacies of member-3 of Maokou Formation in Well JG1, northern Sichuan Basin

连续沉积,表明水体逐渐变浅。沉积水体深度变化较大,这是台内低能沉积环境所不具备的特征。

(2)在生物组合方面,上斜坡生物碎屑含量整体比台地内部更低,仅在茅三段中上部见大量的浅水生物或造礁生物(图2b),以海百合为主(图4b),见少量珊瑚(图4c),生物碎屑组分无分选,呈漂浮支撑结构,保存相对完整,无抗浪骨架特征,未受到波浪的长时间淘洗改造,具有浅水生物的深水低能沉积表现,这同样是台地沉积环境少有的沉积现象。此外还见到大量的双壳类、腕足类、蠕类。相比较于下斜坡,上斜坡亚相的生物碎片类型更加丰富,个体也更大,壳类生物的壳壁更厚(图4d),蠕类和孔虫结构更加复杂(图4e,4f)。

(3)在沉积构造方面,上斜坡的下部发育生物潜穴构造,潜穴后期被白云石充填(图4g),同样指示上斜坡安静低能的沉积环境。上斜坡上部的灰色泥晶生物碎屑灰岩中局部可见定向层理,生物碎屑相对破碎,但整体呈楔状定向分布,生物碎屑可见叠瓦状排列(图4h),表明生物碎屑受斜坡地貌控制出现定向滑塌堆积。生物潜穴、定向层理均是斜坡沉积中典型的沉积相标志,与缓坡有所区别。

(4)在成像测井上,上斜坡亚相表现为中层状亮色块状夹纹层状暗色条纹,而且茅三段上部暗色条纹较下部明显减少,说明地层产状由薄层状逐渐

增厚为块状,沉积水体逐渐变浅,但顶部受岩溶作用影响,暗色不规则条纹增多(图2b)。

3 沉积相对比及其演化模式

3.1 沉积相对比

在证实JG1井茅口组发育斜坡相的基础上,进一步结合区域钻井进行地层、沉积相纵横向对比,揭示茅口组沉积相平面变化,厘定台槽分异时期等关键问题。综合前人有关茅口组地层层序的研究成果以及JG1井茅口组岩性、电性划分特征,认为川北地区茅口组的地层划分可对比。

与JG1井一样,区域上茅一段依据岩性和电性特征也可进一步划分为a、b、c三个亚段,其特征为a、c两个高自然伽马、低电阻亚段夹厚度较薄的低自然伽马、高电阻的b亚段(图5)。川北地区茅一段岩电特征基本一致,以泥质灰岩(图6a)、生物碎屑泥晶灰岩为主的岩性特征和锯齿状的自然伽马特征,代表了茅口组典型的“眼皮”、“眼球”灰岩,反映该时期海水较深,为广泛的低能缓坡沉积环境^[10]。

茅二c亚段区域上地层特征同样较为稳定,其自然伽马相比茅一段有所降低,电阻率呈箱状或齿状高值,岩性与茅一段基本一致,与茅一段共同构成海侵旋回。茅二b亚段区域上整体表现为较平直的自然伽马低值(图5),在JT1井、NC2井、PS2井上岩性主要为灰色泥晶生物碎屑灰岩和生物碎屑泥

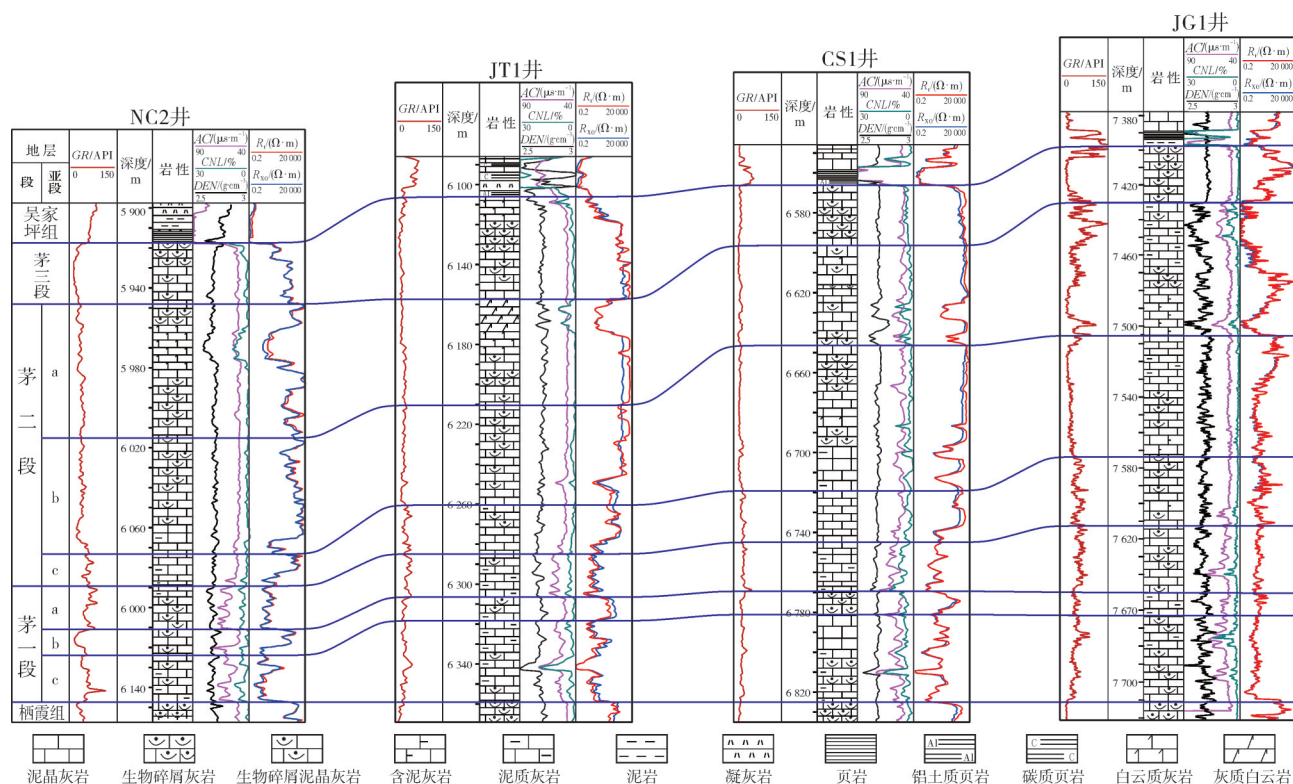


图5 川北地区茅口组地层对比(位置见图1a)

Fig. 5 Stratigraphic correlation of Maokou Formation in northern Sichuan Basin (location is shown in Fig. 1a)

晶灰岩(图6b),岩电特征表现为开阔台地的沉积产物。但JG1井茅二b亚段的上部岩性以深灰色泥质灰岩为主(图6c),同时自然伽马呈锥状增大,与取心段下部岩电特征相似(图2a),具有下斜坡沉积特征,表明茅二b晚期JG1井区与JT1井区可能发生沉积相变。在JT1井、NC2井、PS2井,茅二a亚段自然伽马呈向上变低的平直低值,岩性为灰色泥晶或亮晶生物碎屑灰岩(图6d)和残余颗粒白云岩(图6e),其亮晶胶结结构和受滩相控制的白云石化特征表明这些井区茅二a期为高能沉积环境^[5]。但JG1井茅二a亚段的自然伽马自下而上由低变高,多呈锥状高值,与JT1井等相反,岩性以深灰色含泥灰岩和泥质灰岩为主(图6f),为低能沉积产物,该段取心特征已证实为斜坡相沉积。

梓潼—阆中以南地区茅三段岩性为灰色泥晶生物碎屑灰岩或亮晶生物碎屑灰岩,见少量硅质灰岩和灰质白云岩(图6g),不同于JG1井的上斜坡岩相特征;该区域茅三段泥晶生物碎屑灰岩颜色更浅,同时亮晶组分增多(图6h),表现为开阔台地或局部弱白云石化滩相特征。

从地层、沉积对比来看,纵向上茅一c亚段至茅二c亚段构成海侵沉积旋回,为缓坡沉积环境。JT1井区由茅二b亚段向上至茅三段整体构成海退旋回,岩性由底部的含泥灰岩过渡为泥晶生物碎屑灰岩、亮晶生物碎屑灰岩和灰质白云岩,自然伽马值向上降低,沉积水体逐渐变浅,由缓坡转变为开阔台地到高能滩相沉积。而JG1井自茅二b亚段中上部向上,生物碎屑泥晶灰岩中的泥质含量增多,自然伽马呈锥状增大,表明沉积水体逐渐变深,与JT1井区存在沉积构造分异,基于钻井小层划分对比,基本能确定其沉积构造分异在茅二b中后期开始。从横向对比来看,茅二c亚段至茅一c亚段的地层厚度由南至北逐渐增大,表明沉积古地貌受加里东古隆起继承性控制,川北地区茅口期具有南高北低的特征。沉积相横向变化表明川北地区茅口中晚期存在台槽分异,其中JT1井区茅二a期的滩体规模最大,同时期JG1井处于下斜坡环境,沉积构造分异最为显著(图5)。茅二a期至茅三期JG1井区由下斜坡转变为上斜坡,构成海退旋回,与区域上沉积构造演化匹配,表明茅口末期沉积构造分异减弱。

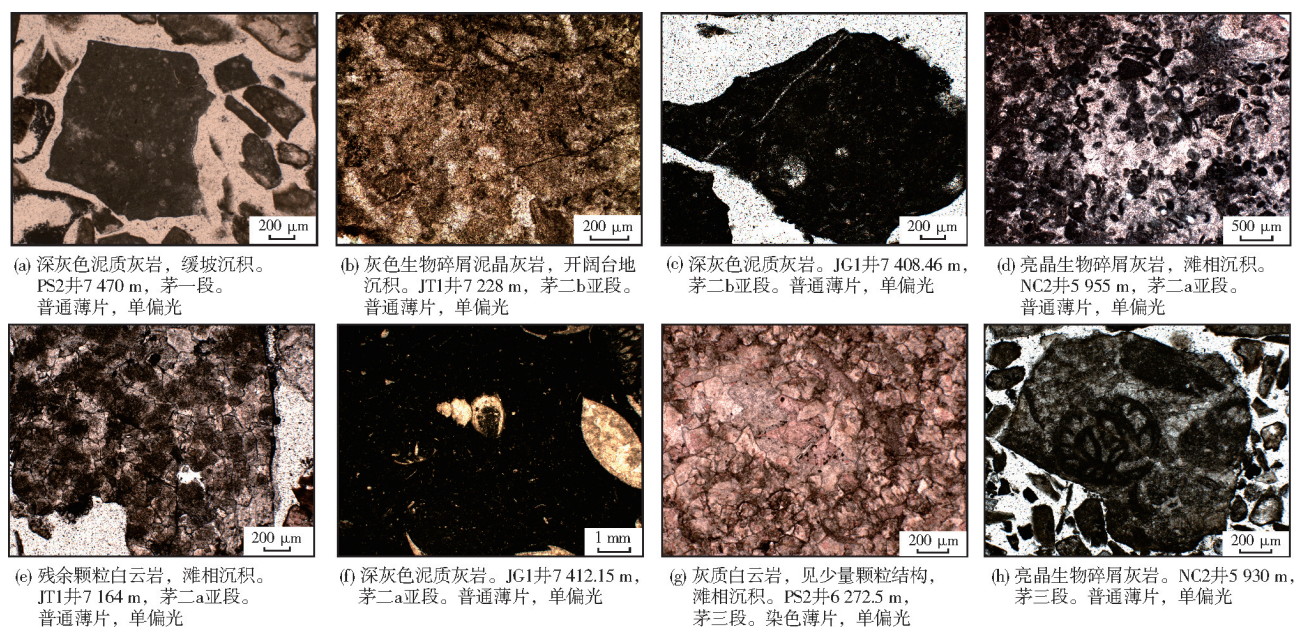


图6 川北地区茅口组岩性特征

Fig. 6 Lithologic characteristics of Maokou Formation in northern Sichuan Basin

3.2 地震相特征

井震结合分析进一步表明,区域上茅口组底部的地震响应特征较为一致,为一条较为连续平直的波峰反射(图7),印证了茅口组早期川北地区整体沉积环境均一稳定,为缓坡沉积。茅二b亚段底的地震响应特征在区域上存在明显差异,在NC2井、JT1井、PS2井均为弱连续波峰反射,在PS2井以北则为波谷反射,表明在茅二b期内区域上可能存在沉积构造差异,与钻井对比的沉积构造分异时期基本吻合。此外,在茅口组中上部,地震相南北差异显著:南侧的JT1、PS2井区茅二b亚段至茅三段见断续的弱波峰反射,而且JT1井上部波峰具有隆起特征,反映台地边缘沉积;而PS2井北侧至JG1井茅口组中上部为连续的强波峰反射,为斜坡相响应特征。在台地边缘与斜坡相之间,地震剖面上可识别出一条断层贯穿茅口组,断层在栖霞组至吴家坪组均可识别,说明茅口中晚期台槽分异除了具有勉略洋伸展的大地构造背景外,其直接因素可能与同沉积断层有关。通过对斜坡地震相平面位置的追踪,进一步明确相变点位于阆中附近,强波峰反射沿北西至南东方向连续稳定分布,表明斜坡相带呈北西向展布,直至LT1井区地层厚度明显减薄,指示斜坡相向北东过渡为盆地沉积。此外,斜坡相的强波峰反射具有向北侧下倾的趋势,波峰内部及末端均可识别出下超点(图7),指示海退的沉积过程,与JG1井斜坡相演化特征相匹配。

缘沉积;而PS2井北侧至JG1井茅口组中上部为连续的强波峰反射,为斜坡相响应特征。在台地边缘与斜坡相之间,地震剖面上可识别出一条断层贯穿茅口组,断层在栖霞组至吴家坪组均可识别,说明茅口中晚期台槽分异除了具有勉略洋伸展的大地构造背景外,其直接因素可能与同沉积断层有关。通过对斜坡地震相平面位置的追踪,进一步明确相变点位于阆中附近,强波峰反射沿北西至南东方向连续稳定分布,表明斜坡相带呈北西向展布,直至LT1井区地层厚度明显减薄,指示斜坡相向北东过渡为盆地沉积。此外,斜坡相的强波峰反射具有向北侧下倾的趋势,波峰内部及末端均可识别出下超点(图7),指示海退的沉积过程,与JG1井斜坡相演化特征相匹配。

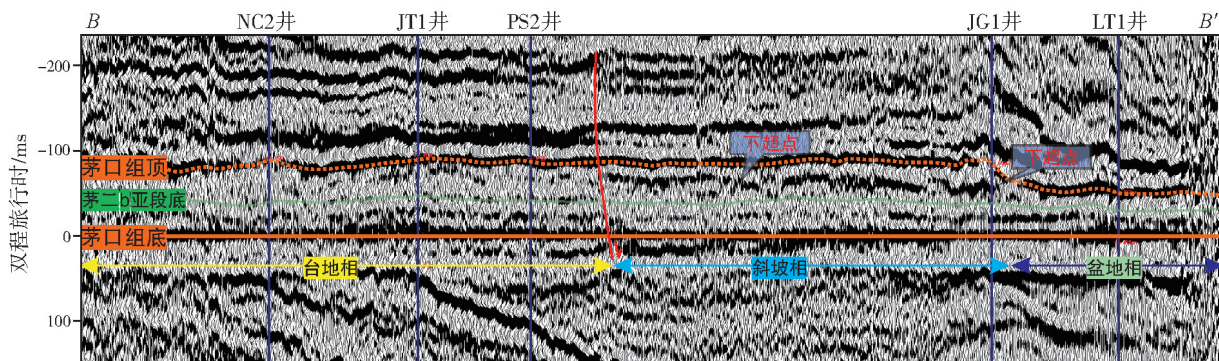


图7 川北地区茅口组地震相特征(剖面位置见图1a)

Fig. 7 Seismic facies section of Maokou Formation in northern Sichuan Basin (section location is shown in Fig. 1a)

3.3 沉积演化模式

茅口沉积早期为缓坡型台地沉积模式(图8),受早期古构造影响,川北地区南侧较北侧古地貌略高,故茅一段—茅二c亚段厚度较北侧薄。在茅口组沉积

中晚期,随着北缘勉略洋的延伸,川北地区剑阁—阆中一带早期断裂活动加强,使区域内北端变陡,西南侧转变为台地边缘沉积,东北侧为斜坡沉积。至茅口组沉积晚期,盆地西南峨眉地幔柱隆升,川北地区发生海退,形成进积型镶边碳酸盐台地(图8)。

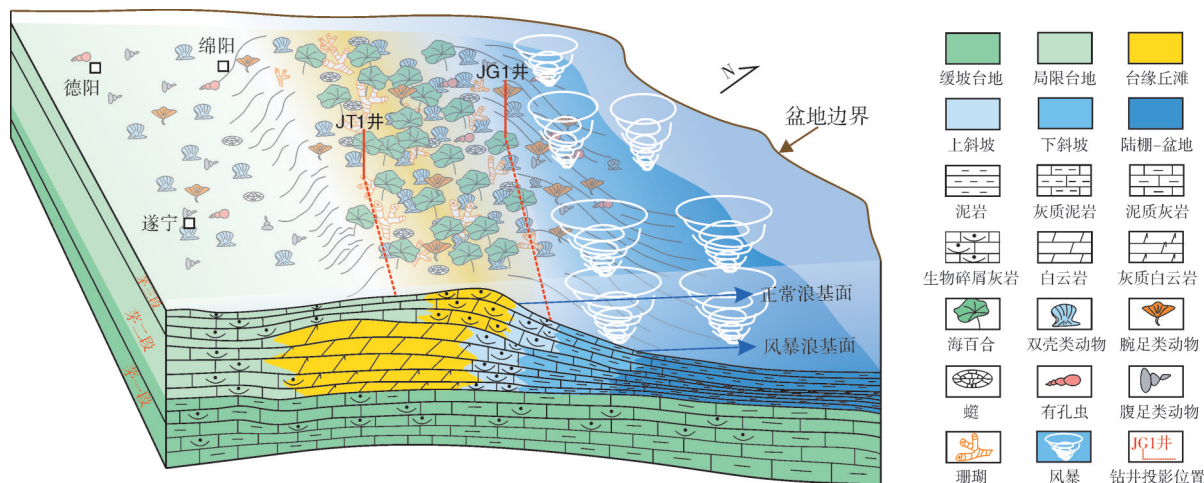


图8 川北地区茅口组沉积模式图

Fig. 8 Sedimentary model of Maokou Formation in northern Sichuan Basin

4 油气地质意义

近年来,勘探家一直在寻求四川盆地茅口组滩相孔隙型储层的突破。JG1井斜坡相的发现进一步表明川北地区可能发育镶边台地,斜坡相边界沿剑阁—阆中一线分布,指示高能滩相在其西南侧发育,可为下一步扩大滩相储层规模勘探确定目标。研究表明:川北地区斜坡相具有纵向迁移演化的特征,可形成加积型或进积型镶边碳酸盐台地,使高能滩体在纵向上多期叠置发育,在平面上大面积分布。这一认识揭示了川北地区茅口组台缘滩相勘探领域的规模前景。

此外,下斜坡亚相处于半还原—还原的沉积环境,安静低能的水体往往利于有机质的保存富集^[21]。对JG1井下斜坡亚相8个岩心样品进行TOC测试,其中4个样品为风暴岩,另外4个样品为泥晶灰岩。风暴岩TOC值介于6.83%~15.00%,平均值为10.80%;泥晶灰岩TOC值介于1.08%~4.17%,平均值为2.42%。下斜坡亚相整体TOC平均值为6.60%。测试结果表明,下斜坡亚相有机质丰度高,具有良好的生烃潜力。其中,风暴沉积物因携卷有机物丰富,沉积速率快,有机质丰度非常高,为优质烃源岩。该研究证实了川北地区茅口组

深水沉积具有良好的生烃潜力,可在区域上形成旁生侧储或由滩体迁移形成下生上储的成藏模式,这丰富了对茅口组成藏类型的认识,对评价茅口组资源潜力具有重要意义。

5 结论

(1)川北地区JG1井茅二b亚段—茅三段沉积期发育斜坡相,证实川北地区茅口组沉积中晚期发生台槽分异。下斜坡发育在茅二段,以灰黑色泥质灰岩和泥晶灰岩沉积为主,沉积构造丰富,发育风暴沉积、硅质互层及页理;上斜坡发育在茅三段,以生物碎屑泥晶灰岩和泥晶生物碎屑灰岩为主,岩石结构表现为浅水生物的低能深水沉积,同时发育生物潜穴、叠瓦状层理沉积构造。

(2)川北地区斜坡相在纵向上构成连续变浅的沉积序列,平面上沿剑阁—阆中一线呈北西向展布,在茅口组沉积中晚期形成进积型镶边碳酸盐台地沉积。

(3)在平面上落实了斜坡相带的分布,明确了下一步沿剑阁—阆中一线西南侧的高能滩体勘探领域。发现茅口组下斜坡亚相优质烃源岩,与滩相储层可构成茅口组旁生侧储、下生上储的成藏模式,这对认识和评价茅口组资源潜力具有重要意义。

参考文献

- [1] 苏成鹏,李蓉,石国山,等.四川盆地及周缘中二叠统茅口组一段储集层特征及对油气勘探的启示[J].石油勘探与开发,2021,48(6):1150-1161.
SU Chengpeng, LI Rong, SHI Guoshan, et al. Reservoir characteristics of the first member of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and its periphery and inspirations to petroleum exploration, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(6): 1150-1161.
- [2] 李蓉,苏成鹏,石国山,等.川南地区二叠系茅口组一段瘤状灰岩储层成因[J].天然气地球科学,2021,32(6):806-815.
LI Rong, SU Chengpeng, SHI Guoshan, et al. The genesis of nodular limestone reservoirs of the first period of Maokou Formation of Permian in southern Sichuan Basin[J]. Natural gas geoscience, 2021, 32(6): 806-815.
- [3] 张亚,陈双玲,张晓丽,等.四川盆地茅口组岩溶地貌刻画及油气勘探意义[J].岩性油气藏,2020,32(3):44-55.
ZHANG Ya, CHEN Shuangling, ZHANG Xiaoli, et al. Restoration of paleokarst geomorphology of Lower Permian Maokou Formation and its petroleum exploration implication in Sichuan Basin[J]. Lithologic reservoirs, 2020, 32(3): 44-55.
- [4] 戴晓峰,张明,江青春,等.四川盆地中部下二叠统茅口组岩溶储集层地震预测[J].石油勘探与开发,2017,44(1):79-88.
DAI Xiaofeng, ZHANG Ming, JIANG Qingchun, et al. Karst reservoirs seismic prediction of Lower Permian Maokou Formation in central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2017, 44(1): 79-88.
- [5] 杨雨,谢继容,赵路子,等.四川盆地茅口组滩相孔隙型白云岩储层天然气勘探的突破及启示:以川中北部地区JT1井天然气立体勘探为例[J].天然气工业,2021,41(2):1-9.
YANG Yu, XIE Jirong, ZHAO Luzi, et al. Breakthrough of natural gas exploration in the beach facies porous dolomite reservoir of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its enlightenment: a case study of the tridimensional exploration of Well JT1 in the central-northern Sichuan Basin[J]. Natural gas industry, 2021, 41(2): 1-9.
- [6] 胡东风.四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示[J].天然气工业,2019,39(3):1-10.
HU Dongfeng. Breakthrough in natural gas exploration in the platform margin shoal at the Maokou Fm in the Yuanba area, Sichuan Basin, and its implications[J]. Natural gas industry, 2019, 39(3): 1-10.
- [7] 付小东,陈娅娜,罗冰,等.四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义[J].地质学报,2021,95(6):1903-1920.
FU Xiaodong, CHEN Yana, LUO Bing, et al. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan Basin[J]. Acta geologica sinica, 2021, 95(6): 1903-1920.
- [8] 张玺华,陈聪,张亚,等.川西北地区茅口组海槽相地质特征及其油气地质意义[J].天然气勘探与开发,2018,41(3):42-50.
ZHANG Xihua, CHEN Cong, ZHANG Ya, et al. Geological characteristics of trough facies, Maokou Formation, northwestern Sichuan Basin: implications for geology[J]. Natural gas exploration and development, 2018, 41(3): 42-50.
- [9] 胡罗嘉,黄世伟,谭万仓,等.四川盆地东部二叠系茅口组层序地层特征及地质意义[J].海相油气地质,2021,26(4):357-366.
HU LuoJia, HUANG Shiwei, TAN Wancang, et al. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(4): 357-366.
- [10] 郝毅,姚倩颖,田瀚,等.四川盆地二叠系茅口组沉积特征及储层主控因素[J].海相油气地质,2020,25(3):202-209.
HAO Yi, YAO Qianying, TIAN Han, et al. Sedimentary characteristics and reservoir-controlling factors of the Permian Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2020, 25(3): 202-209.
- [11] 胡东风,王良军,黄仁春,等.四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J].天然气工业,2019,39(6):13-21.
HU Dongfeng, WANG Liangjun, HUANG Renchun, et al. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural gas industry, 2019, 39(6): 13-21.
- [12] 周进高,郝毅,邓红婴,等.四川盆地中西部栖霞组一茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J].海相油气地质,2019,24(4):67-78.
ZHOU Jingao, HAO Yi, DENG Hongying, et al. Genesis and distribution of vuggy dolomite reservoirs of the Lower Permian Qixia Formation and Maokou Formation, western-central Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(4): 67-78.
- [13] 杨帅,陈安清,张玺华,等.四川盆地二叠纪栖霞一茅口期古地理格局转换及勘探启示[J].沉积学报,2021,39(6):1466-1477.
YANG Shuai, CHEN Anqing, ZHANG Xihua, et al. Paleogeographic transition of the Permian Chixia-Maokou period in the Sichuan Basin and indications for oil-gas exploration[J]. Acta sedimentologica sinica, 2021, 39(6): 1466-1477.
- [14] 陈轩,赵宗举,高阳,等.四川盆地北部中二叠统茅口组碳酸盐岩斜坡沉积及其油气勘探意义[J].海相油气地质,2013,18(4):9-14.
CHEN Xuan, ZHAO Zongju, GAO Yang, et al. Middle Permian Maokou carbonate slope deposition and its significances for petroleum exploration in northern part of Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2013, 18(4): 9-14.
- [15] 钟原,杨跃明,文龙,等.四川盆地西北部中二叠统茅口组岩相古地理、古岩溶地貌恢复及其油气地质意义[J].石油勘探与开发,2021,48(1):81-93.
ZHONG Yuan, YANG Yueming, WEN Long, et al. Reconstruction and petroleum geological significance of lithofacies paleogeography and paleokarst geomorphology of the Middle Permian Maokou Formation in northwestern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(1): 81-93.
- [16] 王兴志,李博,杨西燕,等.四川盆地北部中二叠世晚期“广元一旺苍”海槽特征及其油气地质意义[J].石油勘探与开发,2021,48(3):562-574.
WANG Xingzhi, LI Bo, YANG Xiyan, et al. Characteristics of "Guangyuan-Wangcang" trough during late Middle Permian

- and its petroleum geological significance in northern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum exploration and development*, 2021, 48(3): 562–574.
- [17] 厚刚福, 周进高, 谷明峰, 等. 四川盆地中二叠统栖霞组、茅口组岩相古地理及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(1): 25–31.
HOU Gangfu, ZHOU Jingao, GU Mingfeng, et al. Lithofacies paleogeography and exploration realms of Middle Permian Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2017, 22(1): 25–31.
- [18] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. *天然气工业*, 2016, 36(4): 8–15.
ZHOU Jingao, YAO Genshun, YANG Guang, et al. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin [J]. *Natural gas industry*, 2016, 36(4): 8–15.
- [19] 薛武强, 李波, 颜佳新, 等. 黔南罗甸沱阳中二叠世茅口组风暴岩沉积特征及地质意义[J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 1010–1020.
XUE Wuqiang, LI Bo, YAN Jiaxin, et al. Sedimentary characteristics and geological implications of the Middle Permian tempestite in Moyang Section, Luodian, South of Guizhou [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2012, 30(6): 1010–1020.
- [20] 李芝君, 王大锐. 浙江省桐庐县瑶琳地区下二迭统栖霞—茅口组有孔虫动物群及其环境探讨[J]. *石油勘探与开发*, 1985(4): 28–35.
LI Zhijun, WANG Darui. Discussion on the foraminiferal fauna and its environment of the Lower Permian Qixia–Maokou Formation in the Yaolin area of Tonglu County, Zhejiang Province [J]. *Petroleum exploration and development*, 1985(4): 28–35.
- [21] 胡朝伟, 胡广, 张玺华, 等. 川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): 202–214.
HU Chaowei, HU Guang, ZHANG Xihua, et al. Sedimentary environment, hydrocarbon potential and development of black rocks in upper Maokou Formation, northwestern Sichuan [J]. *Petroleum geology and experiment*, 2020, 42(2): 202–214.

编辑:黄革萍

Sedimentary characteristics of slope facies in mid–late stage of Moukou Formation in northern Sichuan Basin and its petroleum geological significances

JIANG Hang, ZHANG Xihua, CHEN Cong, GAO Zhaolong, SHAN Shujiao, LUO Ping, CHEN Yangui, LI Tianjun, HU Luoia

Abstract: Recently, a great exploration breakthrough has been made in shoal porous reservoir of Maokou Formation in northern Sichuan Basin. Based on the latest drilling and seismic data, the stratigraphy, sedimentology and geochemistry of Maokou Formation in northern Sichuan Basin has been studied. The results show that: (1) The slope facies is developed in Maokou Formation of Well JG1, which confirms the differentiation of platform and trough occurring in mid–late stage of member–2 to late stage of member–3 of Maokou Formation. (2) The middle and upper part of member–2 of Maokou Formation develops the lower slope subfacies, which is mainly composed of grey–black micrite limestone and silty limestone, with storm deposits, silicon interlayer and lamellation developed. The storm deposition sequences that can be recognized mainly include combination of erosion surface and biotritus bedding, combination of biotritus bedding and graded bedding, combination of erosion surface and biotritus bedding and horizontal bedding, combination of erosion surface and gravel bedding. The member–2 of Maokou Formation develops upper slope subfacies, which consists of bioclastic micritic limestone and micrite bioclast limestone reflecting low–energy sedimentary environment, and the paleontology is a combination of shallow water organisms, with sediment structure of biological burrows and imbricated bedding developed. (3) The slope facies in the northern Sichuan Basin constitutes a continuous shallow sedimentary sequence in the vertical direction, and spreads along the Jiange–Langzhong line in a northwest direction. The slope and platform margin form the progradational sedimentary model of rimmed platform. (4) Organic geochemical analysis shows that the lower slope subfacies have a high abundance of organic carbon, among which tempestite is the best with *TOC* up to 15%, which has high–quality hydrocarbon generation potential. The study clarifies the period and plane position of platform and trough differentiation, and provides support for expanding the exploration of shoal porous reservoir of Maokou Formation. The discovery of high–quality hydrocarbon source rock in the lower slope subfacies can contribute to establish a variety of reservoir formation mode in the Maokou Formation, which is of great significance to evaluate the resource potential of the Maokou Formation in northern Sichuan Basin.

Key words: slope facies; sedimentary characteristics; sedimentary evolution; exploration field; Maokou Formation; northern Sichuan Basin

JIANG Hang, First author: MSc, Geological Engineer, mainly engaged in research on oil and gas exploration. Add: No.12, north section of Tianfu Avenue, Wuhou District, Chengdu, Sichuan 610041, China