

中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室成果

四川盆地中三叠统雷口坡组沉积储层研究进展

王鑫^{1,2}, 辛勇光^{1,3}, 田瀚^{1,3}, 朱茂¹, 张豪^{1,3}, 李文正^{1,3}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室;

3 中国石油勘探开发研究院四川盆地研究中心

摘要 四川盆地中三叠统雷口坡组还未发现规模连片的油气田群, 勘探陷入困境, 关键问题是其储层形成机制与分布规律认识不清。利用最新的油气勘探成果和丰富的基础资料, 从层序地层划分与对比入手, 系统梳理和分析了中三叠统的地层分布、沉积与储层特征。研究结果表明: ①盆地内存在中三叠统天井山组(亦称“雷口坡组五段”), 为中三叠统重要的有利勘探层系之一; ②微生物岩为雷口坡组重要的碳酸盐岩类型, 具有规模发育和形成规模有效储层的潜力; ③准同生期的白云石化和岩溶作用、表生期的岩溶作用是雷口坡组储层成孔的主要控制因素, 早埋藏期酸性成岩环境和埋藏期溶蚀作用及构造裂缝是孔隙保持和改善、改造的关键因素; ④古隆起周缘的风化壳岩溶分布带、准同生岩溶作用叠加表生岩溶改造的微生物岩与颗粒滩分布带为有利储层发育区带。

关键词 储层成因; 微生物岩; 岩溶作用; 雷口坡组; 中三叠统; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 前言

四川盆地中三叠统的油气勘探始于20世纪60年代, 至今仅发现6个气田(藏)、5个含气构造, 主要分布于川东卧龙河与川中磨溪地区的雷口坡组一段1亚段(简称雷一¹亚段), 川中龙岗和元坝地区的雷四³亚段, 以及川西地区的雷三³亚段、雷四³亚段和天井山组。雷口坡组已发现气藏具多层段多点分布和局部富集的特点, 还未发现规模连片的油气田群。这除了与其气源不确定和成藏的复杂性有关外, 另外一个重要原因是对中三叠统的沉积特征、储层形成机制与分布规律缺乏整体性、系统性的研究和正确认识。

前人针对雷口坡组的沉积特征做了大量的研究工作: 辛勇光等^[1]、吕玉珍等^[2]认为雷口坡组发育一套蒸发岩、白云岩、石灰岩互层的障壁碳酸盐台地沉积体系, 依次发育台地边缘、台内滩、潟湖边缘坪; 李凌等^[3-4]、孙春燕等^[5]认为雷口坡组为一套较

浅水的碳酸盐台地相沉积体系, 处于局限台地—蒸发台地—开阔台地和台地边缘沉积环境, 发育台内滩和台缘滩2类颗粒滩储层。前人的研究均强调台内滩与台缘滩沉积的重要性, 但随着勘探的深入、资料的增多及认识的提高, 发现雷口坡组在干旱气候、浅水碳酸盐台地的广阔潮坪相带发育微生物岩, 这也是一类重要的储集岩类, 而且呈规模分布的态势^[6]。此外, 雷口坡组沉积期是否存在台缘滩也存在争议。

关于雷口坡组储层的成因机制, 以往的研究多局限于区带研究或针对某特定层系的研究。宋晓波等^[7]认为川西地区雷口坡组储层受沉积相和风化壳岩溶共同影响; 李蓉等^[8]认为埋藏期溶蚀作用是川西拗陷雷四³亚段储层形成的关键; 李宏涛等^[9]认为川西拗陷龙门山前雷四上亚段高频层序控制了潮间带有利沉积微相的分布, 这是储层空间展布与储层发育的关键控制因素; 沈安江等^[10]认为雷口坡组发育了石膏溶孔型储层和残留原生粒间孔型储

收稿日期: 2020-01-07; 改回日期: 2020-08-06

本文受中国石油重大科技项目“古老碳酸盐岩油气成藏分布规律与关键技术”(编号: 2019B-0405)、国家科技重大专项下课题“寒武系—中新元古界碳酸盐岩规模储层形成与分布研究”(编号: 2016ZX05004-002) 和中国石油天然气股份有限公司直属院所基础研究和战略储备技术研究基金项目“古老海相碳酸盐岩定年、定温与微量-稀土元素面扫描技术研发及应用”(编号: 2018D-5008-03) 共同资助

第一作者: 王鑫, 高级工程师, 主要从事沉积储层和油气地质研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路 920 号; E-mail: wangx_hz@petrochina.com.cn

层,将两套储层的发育定位于准同生期。前人关于雷口坡组储层成因机制的观点众多,不尽相同。实际上,不同层系、不同区带的储层有其各自特殊的关键控储要素,不能一概而论。近期的勘探发现,准同生岩溶改造型微生物白云岩储层为雷口坡组非常重要且占比较大的储层类型,这在之前不被大家所认知,关于其成孔和孔隙埋藏保持机制的研究有待加强。

本文利用最新的油气勘探成果和丰富的野外露头、钻井、分析化验等基础资料,从层序地层划分与对比入手,着眼于全盆地,以Ⅳ级层序为研究对象,注重盆地构造演化与沉积古地理背景演变的结合,系统梳理和分析中三叠统雷口坡组的沉积特征、储层发育与分布特征,特别对前期研究存在较大争议的分层问题,以及被忽视的微生物岩储层领域进行了深入研究,明确了四川盆地雷口坡组的储层特征、储层类型及其形成发育的主控因素,指出雷口坡组有利储层发育区带。研究成果对下一步雷口坡组勘探选区、选带和目标优选具重要指导意义。

1 区域地质概况

四川盆地中三叠统包含雷口坡组 and 天井山组。

其中,雷口坡组划分为4段,在全盆地分布范围较广;而天井山组(亦称“雷五段”)分布局限,盆地内仅在川西坳陷中部连片分布,地表露头主要沿龙门山冲断带西北缘出露。从大地构造上看,中三叠统沉积期,四川盆地为上扬子地台的一部分,西部经龙门山岛链与滇青藏古大洋相邻,北部经天井山、米仓山、大巴山隆起与秦岭海相邻,盆地西南部与东部分别被康滇古陆、江南古陆所围。盆地内部发育泸州—开江隆起^[11-12],同时受周围古陆相继上隆和盆地基底逐步抬升的影响,盆地内海水较浅、较封闭,水体能量总体不强,水体盐度总体较高。这一特殊的古地理格局导致海盆处于蒸发—局限的沉积环境,形成石灰岩、白云岩、石膏及盐岩的互层沉积^[11]。

受中三叠世末期印支运动早幕抬升作用影响,盆地内出现了北东向的大型隆起和坳陷。其中,以华蓥山为中心的隆起带上升幅度最大,形成泸州—开江隆起;而川西地区形成了川西坳陷。隆起带中三叠统普遍遭受剥蚀,泸州隆起核部下三叠统嘉陵江组中上部以上地层全被剥蚀(图1),开江隆起只残留中三叠统雷口坡组下部地层。印支期抬升作用在江油、广元附近的天井山隆起也有反映,其上雷口坡组部分被剥蚀。

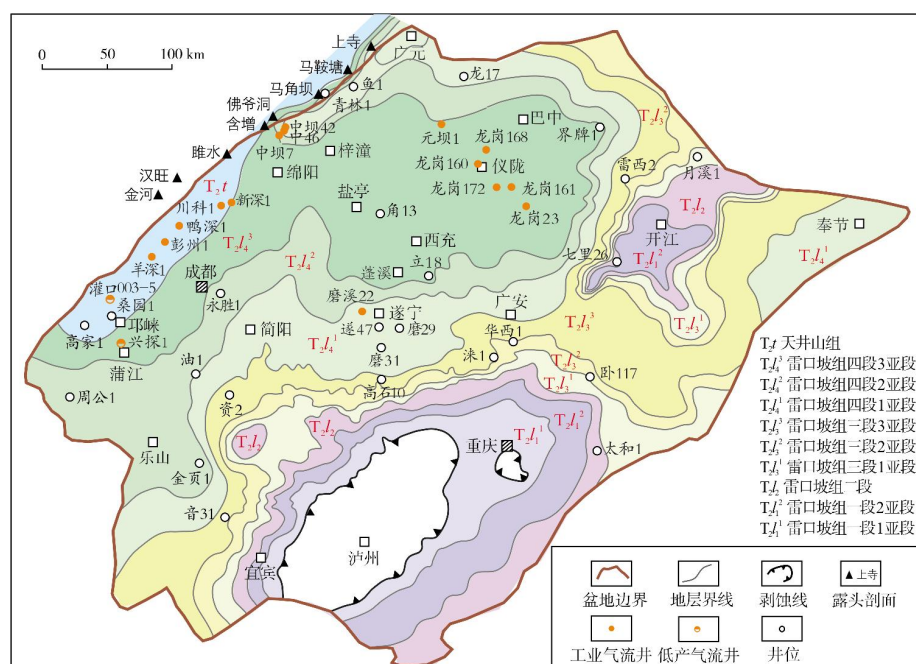


图1 四川盆地上三叠统沉积前古地质图

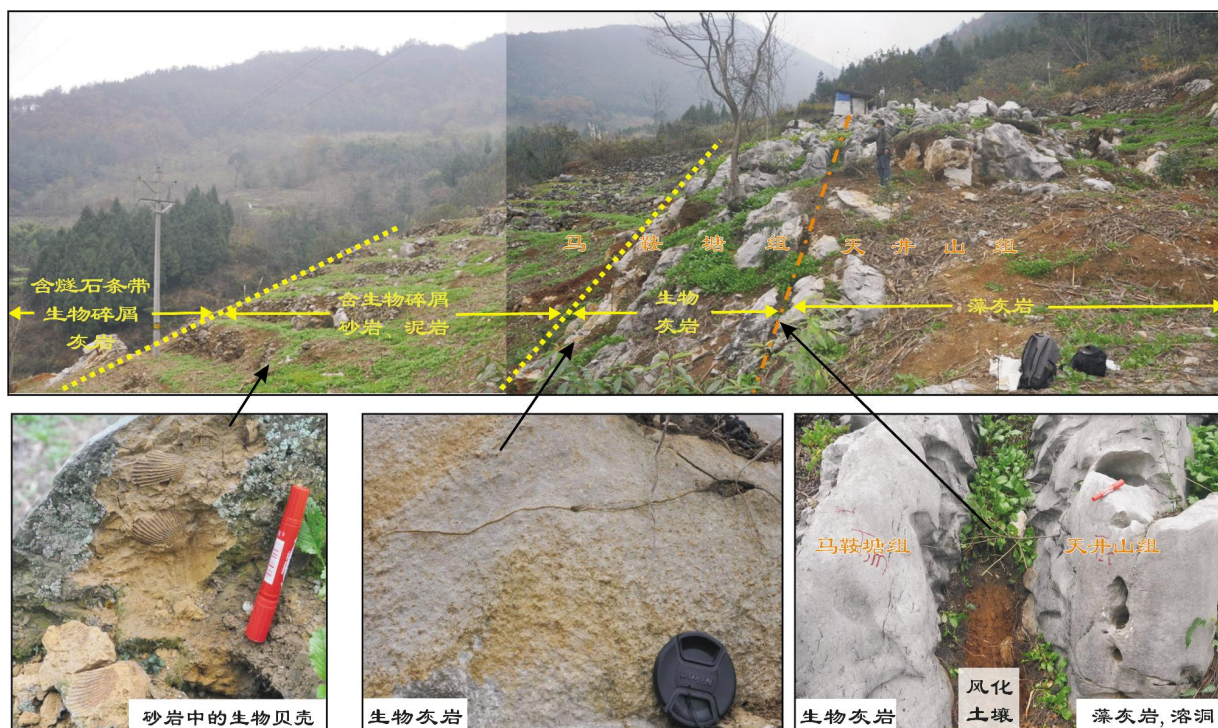
Fig. 1 Paleogeological map of Sichuan Basin before deposition of Upper Triassic

2 天井山组地层的厘定与中三叠统层序划分

2.1 天井山组的地层厘定

翟光明等^[11]将天井山组划归为雷口坡组,并命名为“雷五段”,将其表述为乳白色、浅灰色中—厚层至块状石灰岩,局部具有鲕状及生物碎屑灰岩,在川西北称“天井山石灰岩”。辜学达等^[13]将天井山组定义为以灰色厚层至块状石灰岩为主,上部夹鲕粒、砂屑、生物碎屑灰岩及硅质条带、结核,含有孔虫及少量双壳类、腕足类等生物化石的一套地层。以往这套地层主要见于盆地外西北缘的龙门山推覆带中段,认为盆地内缺失这套地层。近几年成都—绵竹凹陷的多口井在马鞍塘组与雷口坡组白云岩段之间钻遇大套石灰岩段,并获得天然气产量,早期川西南地区的灌口003-5井、桑园1井等井也钻遇这套石灰岩地层,并获得少量天然气,这套地层一直被归为上三叠统马鞍塘组。鉴于该石灰岩段有重大勘探突破,因此需对其地层归属重新厘定。

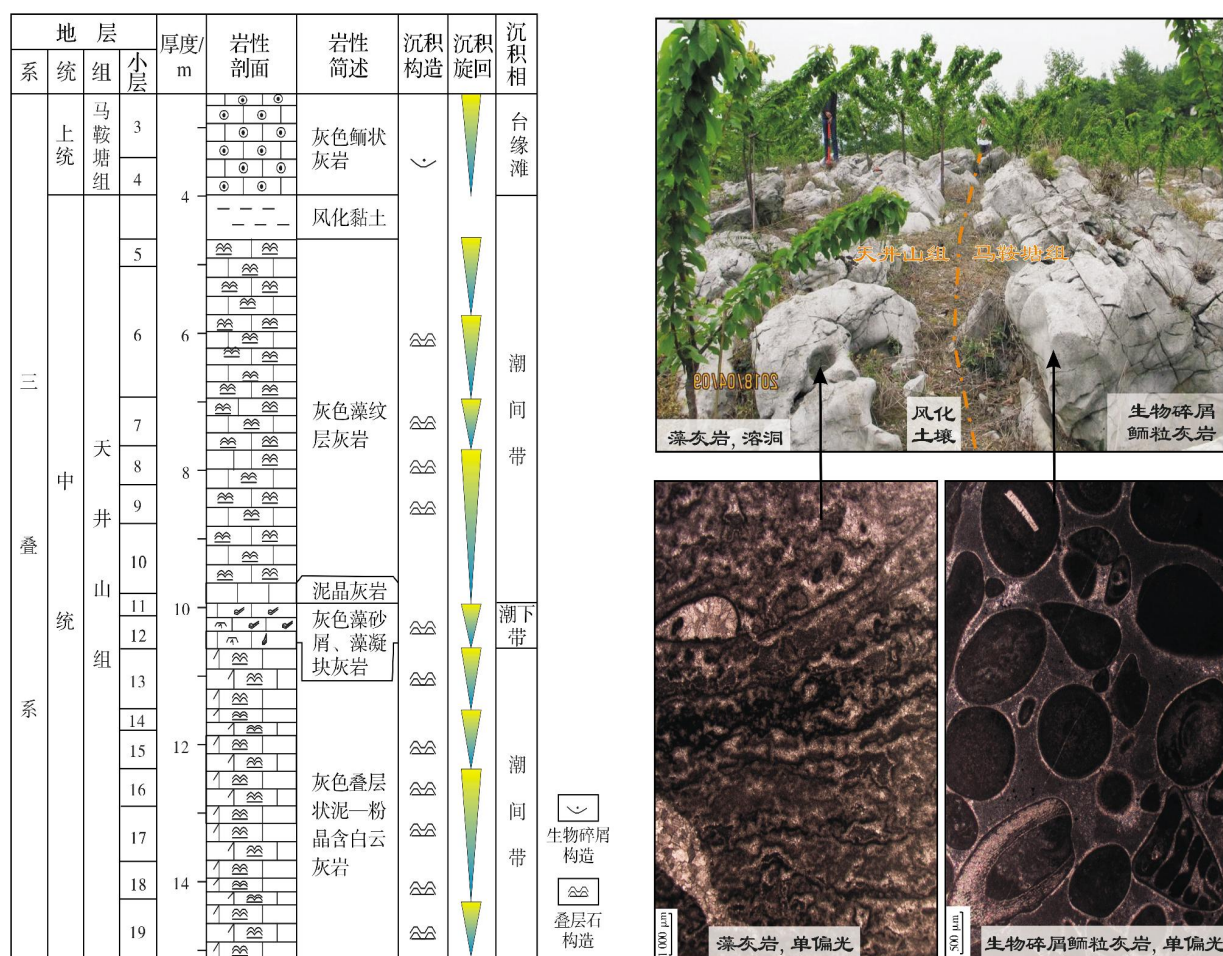
结合露头 and 钻井资料,依据岩性、电性、生物发育特征,以及风化土壤的发育、溶蚀现象等特征,认为原天井山组下部不含或极少含生物碎屑,但微生物藻异常发育的石灰岩段应为中三叠统,这符合中三叠世高盐度宏体海水生物不发育而微生物发育的背景,而上部的鲕粒灰岩、含丰富生物碎屑的石灰岩夹陆源碎屑岩段应为上三叠统马鞍塘组的下部地层。这两段地层间呈假整合接触,在江油马鞍塘露头(图2)、安县雒水镇金华村露头(图3)、江油佛爷洞露头见薄层风化土壤,之下的天井山组石灰岩中见溶洞,井下亦见风化混积岩和天井山组的溶蚀孔洞与充填的渗流沙,钻井测井曲线呈高GR和低R_h特征。因此,将原天井山组下部石灰岩段仍称为天井山组,归中三叠统,因其与雷口坡组顶部白云岩段呈整合接触,二者岩性呈过渡关系,因此习惯上又称为“雷五段”。盆地内天井山组厚度在0~200 m之间,北川含增、香水、黄连桥地区较厚,可达500 m左右^[14]。天井山组的重新厘定,对确认中三叠统顶发育风化壳储层、提出天井山组亦为勘探目的层之一具有重要意义。



上部为露头剖面宏观照片,示意岩性分带与地层界面位置;下部为局部特写照片。

图2 四川盆地马鞍塘露头剖面马鞍塘组与天井山组岩性与接触关系

Fig. 2 Lithology and contact relationship between Ma'antang Formation and Tianjingshan Formation in Ma'antang outcrop of Sichuan Basin



左侧为露头剖面柱状图, 右上为露头宏观照片, 右下为微观岩矿照片。

图3 四川盆地睢水露头剖面马鞍塘组与天井山组岩性与接触关系

Fig. 3 Lithology and contact relationship between Ma'antang Formation and Tianjingshan Formation in Jushui outcrop of Sichuan Basin

2.2 中三叠统地层层序划分

天井山组的重新厘定,确定了中三叠统顶部界线及属性:天井山组发育的地区,天井山组的顶即为中三叠统的顶界,与上三叠统呈假整合接触;天井山组不发育的地区,雷口坡组的顶为中三叠统的顶界,与上三叠统呈不整合接触。中三叠统底界仍以传统的“绿豆岩”为划分依据,与下三叠统呈整合接触。雷口坡组内部无明显的假整合面或不整合面,层序类型应以Ⅱ型层序为主,低位域特征不明显,并且海平面升、降具有快速海侵和缓慢海退的特点,因此,内部的三级、四级层序主要以岩性界面、电性转换面、主要和次要海泛面进行划分。

采用海进、高位体系域的二分法,将中三叠统划分为3个三级层序、11个四级层序(图4)。各层序的岩性、电性特征与界面特征及与雷口坡组各段、亚段地层的对应关系见图4。

受控于中三叠统的干旱、较封闭、浅水碳酸盐台地背景,其层序特征和储集体发育具一定的特殊性。海进体系域一般泥质含量由低到高,膏盐含量由高至低,灰质含量在海进期水体较浅时发育较少,在海进期水体较深时发育较多;相应地,自然伽马值由低到高,深电阻率值随泥质含量的增高而降低,当灰质含量增高时整体较高。高位体系域一般泥质含量由高到低,灰质含量相对减少,白云石化作用增强,可能伴随有准同生期表生岩溶作用,储层相对发育(图4)。



Fig. 4 Comprehensive strata column of Middle Triassic in Sichuan Basin

3 中三叠统沉积特征

3.1 沉积体系划分

四川盆地中三叠世特殊的古地理格局决定了雷口坡组为一套高盐度背景、较浅水、地势较缓的碳酸盐台地沉积体系,发育以蒸发台地、局限台地为主,以开阔台地和台地边缘为次的4种相类型,其沉积体系划分和微相类型如表1。

表 1 四川盆地中三叠统沉积相划分表
Table 1 Sedimentary facies division of Middle Triassic in Sichuan Basin

相区	相	亚 相	微 相	主要分布层位
碳酸盐台地	蒸发台地	蒸发潮坪	云膏坪、膏云坪、膏坪	雷一段、雷二段、雷三 ² 亚段、雷四 ¹⁻² 亚段
		蒸发潟湖	膏湖、盐湖、盐膏湖	
	局限台地	局限潮坪	云坪、膏云坪、灰云坪、灰坪、潮渠	雷一段、雷三段、雷四 ³ 亚段
		局限潟湖	云灰质潟湖、灰质潟湖	
		台内滩	藻屑滩、砂屑滩、鲕粒滩	
	开阔台地	台内滩	藻屑滩、砂屑滩、鲕粒滩	雷三段、天井山组
		开阔潟湖		
	台地边缘	台缘浅滩		
		生物礁		
		前缘斜坡		

3.2 川西地区微生物岩发育特征

四川盆地中三叠统沉积期,在地势缓、水体浅、盐度高的沉积背景下,宏体生物欠发育,给微生物繁盛和与微生物活动相关的微生物岩的发育创造了有利条件,微生物岩具规模发育和规模成储的态势,且以川西地区雷四³亚段和天井山组最为显著。

川西地区雷四³亚段—天井山组既发育微生物灰岩也发育微生物白云岩,微生物灰岩主要发育于天井山组,微生物白云岩主要发育于雷四³亚段。微生物岩类型主要有叠层石、凝块石、层纹石,其次是核形石、枝状石、泡沫绵层石^[15],其他与微生物活动相关的还有藻砂屑、藻球粒等颗粒碳酸盐岩(图5),其中微生物白云岩构成主要储集岩类。

雷四²亚段沉积时,气候干旱、水体较浅,长时间处于蒸发台地环境,由于海水过咸,宏体生物和

开阔台地相在四川盆地中三叠统雷口坡组中发育较少,受海平面升降和古地貌环境控制,多发育在海进域,纵向上主要发育于雷三段和天井山组,岩性主要为深灰色—灰色石灰岩、灰质白云岩等,以潮下沉积为主,其次是台内滩。鉴于前人对四川盆地中三叠统的沉积特征已做了大量的研究工作,并取得了众多共识,本次研究针对前期研究被忽视的微生物岩的沉积特征、有关台缘带认识的分歧等进行探讨。

微生物均难以生存,微生物岩总体不发育;雷四²亚段沉积末期,海水快速水进,水体加深;至雷四³亚段沉积时转变为较稳定的局限台地,但海水仍然偏咸,宏体生物恢复较慢,而适应能力强的微生物则快速繁衍,致使雷四³亚段微生物白云岩规模发育;至天井山组沉积时期,海水持续水进,海水盐度虽接近正常,但宏体生物仍未大量恢复,微生物更加繁盛,促成天井山组微生物灰岩或灰质白云岩的规模发育;至上三叠统马鞍塘组沉积时期,大量宏体生物繁盛,微生物岩基本不发育。雷四³亚段—天井山组微生物岩在平面上主要发育于川西坳陷东部的平缓斜坡区,沉积相带以局限台地潮坪亚相为主,微生物岩储层发育;梓潼—中江—眉山近北向地带及以东则转变为蒸发台地的潮坪亚相与蒸发潟湖亚相,微生物岩储层不发育。根据单井和平面上微生物岩的发育特征及储层性能,建立微生物岩的纵向发育模式(图6)。



(a) 柱状叠层石灰岩。天井山组7小层。安县雎水镇金华村露头



(b) 纹层状藻灰岩。天井山组16小层。安县雎水镇金华村露头



(c) 丘状叠层石白云岩, 针孔发育。雷四¹亚段9小层。安县雎水镇太平桥露头



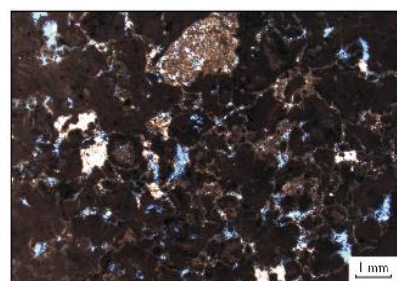
(d) 叠层状藻白云岩, 窗格孔洞发育。鸭深1井5 781.22 m, 雷四¹亚段。岩心



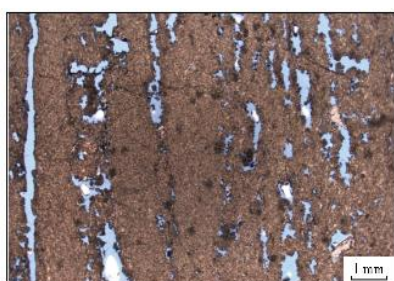
(e) 凝块状—叠层状白云岩。鸭深1井5 781.01 m, 雷四¹亚段。岩心



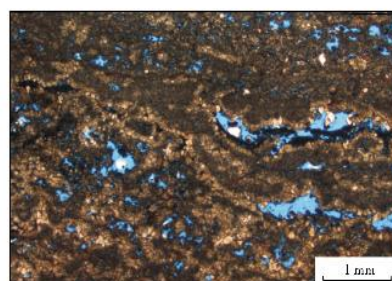
(f) 纹层状藻白云岩, 孔洞发育。羊深1井6 219.41 m, 雷四¹亚段。岩心



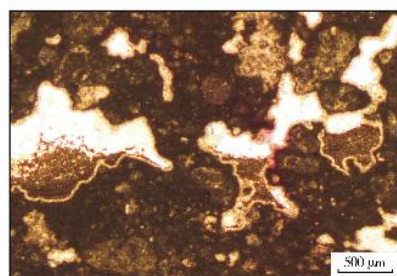
(g) 薄砂屑、藻球粒白云岩, 粒间孔发育。羊深1井6 230.16 m, 雷四¹亚段。铸体薄片, (-)



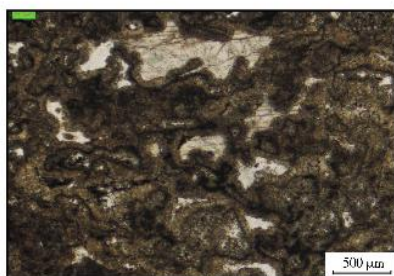
(h) 纹层状藻白云岩, 窗格孔发育。羊深1井6 219.31 m, 雷四¹亚段。铸体薄片, (-)



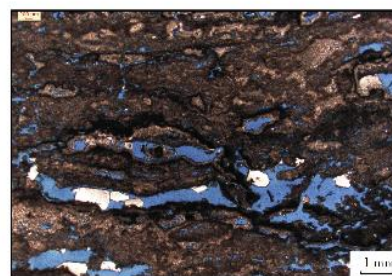
(i) 叠层状藻白云岩, 鸟眼状、窗格状孔发育。鸭深1井5 793.95 m, 雷四¹亚段。铸体薄片, (-)



(j) 凝块状藻白云岩, 粒间孔及充填的渗流沙、晚期白云石和石英。中46井3 151.42 m, 雷三¹亚段。普通薄片, (-)



(k) 藻格架白云岩, 格架孔部分被方解石充填。中80井3 177.91 m, 雷三¹亚段。普通薄片, (-)



(l) 藻格架白云岩, 格架孔洞发育。羊深1井6 200.08 m, 雷四¹亚段。铸体薄片, (-)

图5 四川盆地雷口坡组微生物岩典型岩石类型

Fig. 5 Typical rock types of microbial carbonate of Leikoupo Formation in Sichuan Basin

地层	岩石序列	岩性段	典型微生物岩	沉积旋回	结构、构造	晶粒	孔隙度	储层评价
天井山组		石灰岩、含白云灰岩	藻砂屑、叠层石、凝块石、层纹石		颗粒—凝块, 波状、丘状纹层	泥晶		差—非
雷四 ³ 亚段		含灰白云岩			颗粒—凝块, 波状、纹层状	泥晶、泥粉晶		差—中
		白云岩			凝块—颗粒, 波状、丘状纹层	泥粉晶、粉晶		好—中
		含膏白云岩、膏质白云岩	层纹石		条带状、纹层状	泥晶、泥粉晶		差—非
雷四 ² 亚段		膏盐岩	层纹石		块状、条带状、纹层状			非

藻灰岩 含白云灰岩 含灰藻凝块 藻砂屑白云岩 藻凝块 藻砂屑白云岩 石膏岩 盐岩

图6 四川盆地雷四²亚段—天井山组微生物岩发育序列

Fig. 6 Development sequence of microbial carbonate rocks of Submember 2 of the Leikoupo Member 4-Tianjingshan Formation in Sichuan Basin

3.3 台缘带与台缘礁滩的发育特征

关于雷口坡组沉积时期台缘带的发育位置与盆地内是否发育台地边缘礁滩,目前存在较大争议。中三叠世,四川盆地周围发育岛链、古陆(隆)^[11],它们起到障壁作用,与外围的海洋、海槽相邻;盆地基底逐步抬升,盆地内水浅而封闭,整体处于蒸发—局限的沉积环境。因此,四川盆地可能缺少真正意义的台缘带,相应典型、规模性的台缘礁滩也不发育,可能只在原岛链或古隆间及周缘水体较畅通、水体能量较强的区域发育台内浅滩。其中,较典型的是天井山古隆西缘江油中坝地区雷三³亚段的微生物丘、滩相沉积(图4),其次是在川西龙门山前缘带附近的露头或钻井中所见的少量颗粒滩。四川盆地中三叠统目前未见生物礁相发育,但在龙门山前缘带附近的安县睢水剖面、绵竹汉旺剖面等见到上三叠统马鞍塘组生物礁。

3.4 台内颗粒滩的分布

四川盆地内雷口坡组发育砂屑滩、藻屑滩、鲕粒滩等台内颗粒浅滩,主要发育于雷四³、雷三³和雷一¹亚段(图4),平面上主要分布于面向外海且与外海沟通、水体能量相对较强的台地内古地貌相对高的一侧。龙岗地区雷四³亚段沉积期位于台洼面向北部海域的斜坡带,海水从川西北的大巴山古隆与龙门山古隆间的空隙侵入,水体能量较高,鲕滩、砂

屑滩发育;江油中坝地区雷三³亚段沉积期位于天井山古低凸起面向西部海域的斜坡带,海水通过西部的龙门山岛链间的空隙与外海沟通,水体能量较强,沉积了较厚的颗粒滩(图4);磨溪地区雷一段白云质砂屑、鲕粒滩则沿泸州古凸起周缘分布。

3.5 中三叠世岩相古地理

中三叠世,由于江南古陆西移抬高,四川盆地海盆环境由早三叠世的东深西浅逐渐转变为西深东浅,川东演变为海陆过渡相,川中到川西广大地区基本保持较封闭的局限—蒸发台地环境,在川西龙门山前缘与西侧海槽连通的局部地区形成富藻的浅滩沉积,储层段主要发育于三级层序或四级层序的高水位体系域。中三叠统顶部可发育风化壳型储层。

雷一¹亚段(图7)沉积时,盆地略具东倾底形,水体整体较浅,地形较缓,整体为缓坡型局限台地沉积,在泸州地区发育古凸起。泸州古凸起北部周缘的川中地区发育大范围的台内浅滩,川东发育混积的泥质云坪,古凸起南部发育含膏云坪相;盆地北部梓潼—仪陇—通江、大竹地区的封闭台洼地带发育含膏云坪或膏质潟湖;川西除龙门山前缘局部发育台缘浅滩外以云坪相沉积为主。雷一²亚段沉积时,基本沿袭雷一¹期的古地理格局,只是水体加深,泥质含量增加,以含膏泥质云坪、含膏泥质灰质潟湖相占主导为特征。

雷二段为层序 SQ₁ 的高水位体系域,盆地内以蒸

发台地和局限台地为主,以发育泥质白云岩和白云岩、膏岩交互为特征。在川东地区,发育泥云质潟湖。

雷三¹亚段沉积期大规模海进,气候干旱程度有所缓解,川中—川西以广泛发育的局限—开阔台地潮下灰坪与灰质潟湖为特征(图8),川东以混积泥质灰坪为特征,川西龙门山前缘局部发育台缘浅滩。雷三²亚段沉积期,气候再次变干旱,同时受盆地周缘地块挤压变形明显增强的影响,形成成都、仪陇—南充两大坳陷与周缘隆起并存的隆拗格局:坳陷区发育含膏云坪与含膏潟湖;川东以混积泥质云坪为主;川西以含膏云坪为主,局部发育台内浅滩。雷三³亚段沉积期为层序SQ₃的高水位体系域发育期,由于雷三²时期的填平作用,此时地势整体较平坦,台坪范围扩大(图9),同时气候干旱明显缓解;川西以局限台地的云坪为主,川西北天井山低凸起西缘与川西南地

区台内浅滩发育,川中以局限—开阔台地的灰坪、灰质潟湖为主,川东以混积泥质灰坪为主。

雷四¹亚段沉积期,盆地整体有抬升之势,水体较封闭,气候再次变干旱,川中、川西地区整体为蒸发台地含膏云坪与膏质潟湖沉积。雷四²沉积时期,气候异常干旱,川中、川西地区整体以蒸发台地膏质潟湖沉积为主,其次是含膏云坪。雷四³亚段—天井山组沉积时期为层序SQ₃的高水位体系域,此时气候快速转为半干旱直至近正常气候,地势整体较平坦,台坪范围较广,以广泛的富藻云坪、灰坪沉积为特征,并形成规模微生物岩储集岩类。在盐亭—西充膏质潟湖与龙岗台洼过渡区发育台内浅滩(图10);在川西龙门山古岛链东缘局部发育台缘浅滩,但大部分地区可能已卷入龙门山的褶皱逆冲断裂带中,盆地内现今仅在雾1井区、汉旺以东等局部区带存在台缘浅滩。

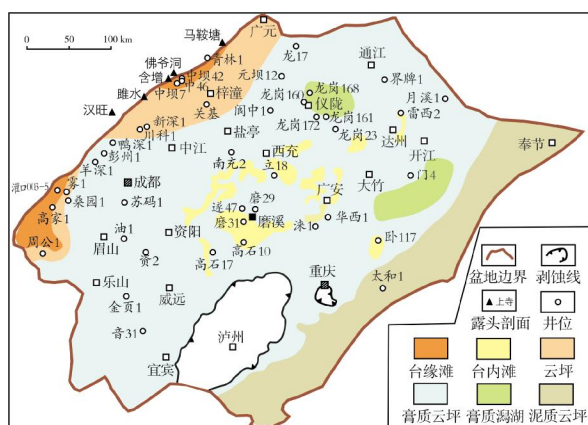


图7 四川盆地雷三¹亚段沉积相图

Fig. 7 Sedimentary facies map of Submember 1 of the Leikoupo Member 1 in Sichuan Basin

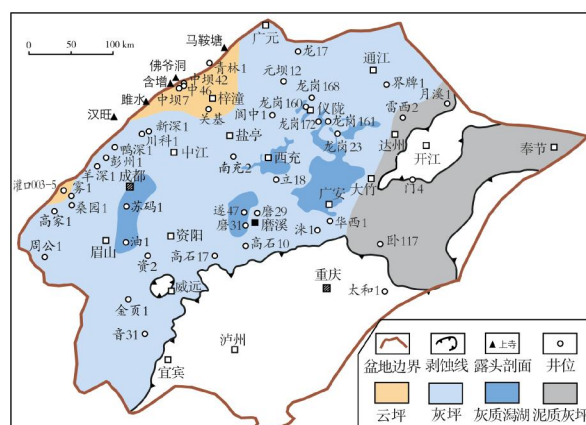


图8 四川盆地雷三¹亚段沉积相图

Fig. 8 Sedimentary facies map of Submember 1 of the Leikoupo Member 3 in Sichuan Basin

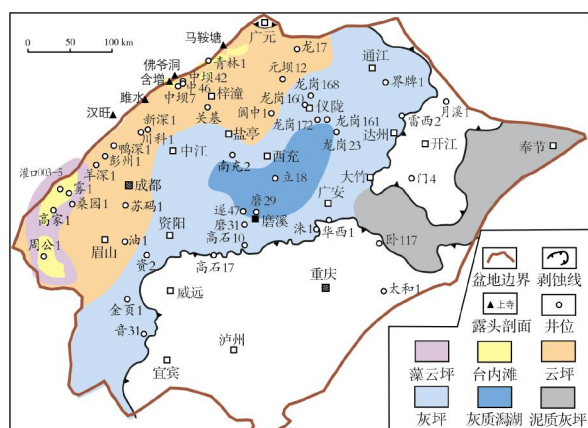


图9 四川盆地雷三³亚段沉积相图

Fig. 9 Sedimentary facies map of Submember 3 of the Leikoupo Member 3 in Sichuan Basin

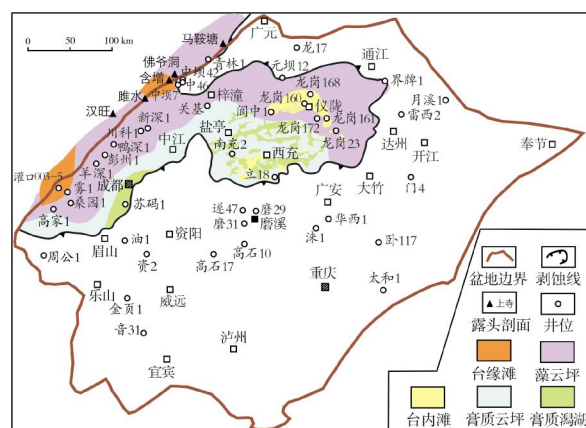


图10 四川盆地雷四³亚段—天井山组沉积相图

Fig. 10 Sedimentary facies map of Submember 3 of the Leikoupo Member 4-Tianjingshan Formation in Sichuan Basin

4 中三叠统储层特征与主控因素

中三叠统发育微生物岩储层、颗粒滩储层(包括台内滩和台缘滩2类)、晶粒白云岩储层、裂缝或岩溶改造型储层等4大类储层类型。

4.1 储层特征

4.1.1 微生物岩储层发育特征

微生物岩主要有叠层石、凝块石,其次是层纹石,有少量核形石、枝状石、泡沫绵层石等,以白云岩为主。微生物岩在同生期、准同生期有利于形成粒间(溶)孔或溶洞(图5g,5j)、藻格架间孔洞(图5k,5l)、粒内溶孔、藻纹层间窗格孔或鸟眼孔(图5h,5i)、膏溶孔、生物碎屑铸模孔等,从而形成微生物岩储层。微生物岩储层主要发育于含膏层段之上的雷四³亚段—天井山组;平面上主要分布于川西坳陷平缓的斜坡区,其次是龙岗台洼斜坡区。储层发育相带以局限台地潮坪亚相为主,而蒸发台地由于盐度过高而不发育。

川西地区雷四³亚段微生物岩储层单层厚度主要在0.5~8 m之间,累计厚度为7~45 m;孔隙度为2.5%~13%,平均为3.9%;渗透率为 $(0.01\sim 710)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $14.38\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ^[16]。其中,叠层石白云岩储层的孔隙度和渗透率最高,凝块石白云岩储层的孔隙度和渗透率相对较低,凝块叠层石白云岩储层的孔隙度和渗透率介于前两者之间。

4.1.2 颗粒滩储层发育特征

盆地内颗粒滩储层主要为台内浅滩,以砂屑滩、藻屑滩为主,有少量砾屑滩和鲕粒滩,主要发育于雷一¹亚段、雷三³亚段和雷四³亚段—天井山组,平面上

主要分布于川中和川西坳陷斜坡区。据典型井颗粒滩储层物性统计(表2),孔隙度平均值在3.11%~11.56%之间。孔隙类型有晶间孔(图11a)、粒间与粒内溶孔(图11b,11c)、生物碎屑铸模孔与鲕模孔、膏溶孔被充填后再溶蚀的粒间溶孔(图11d—11g)等。

雷一¹亚段颗粒滩在川中普遍发育,岩性为白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩,厚度一般在5~25 m之间,主要沿沉积期古地貌高及周缘分布,特别是在磨溪一带累计厚度最大(可达35 m);储层物性较好,颗粒滩主要发育段的孔隙度平均在10%左右(表2);孔隙类型以粒内溶孔、粒间孔、膏溶孔为主,其次是晶间孔。雷三³亚段颗粒滩主要发育于川西地区,并以川西北江油中坝地区最为发育,厚度可达百米左右;岩性为微生物白云岩与颗粒白云岩复合体;储层物性相对较好,平均孔隙度一般在4%左右(表2)。雷四³亚段颗粒滩主要发育于川西与川中龙岗地区,但川西以微生物白云岩为主,龙岗为微生物白云岩与颗粒白云岩复合体;储层物性平均也在4%左右(表2);孔隙类型以粒内溶孔、粒间孔、裂缝为主,其次是晶间孔。

4.1.3 晶粒白云岩储层发育特征

晶粒白云岩主要为无明显颗粒和生物结构的粉晶、细晶白云岩,以粉晶白云岩为主,其成因主要与回流渗透白云石化或混合白云石化作用有关。部分晶粒较粗的白云岩可能与埋藏热液白云石化有关,但这类白云岩一般较致密,孔隙不发育。孔隙类型以晶间孔、晶间溶孔(图11h)为主,其分布特征与颗粒滩储层类似。

4.1.4 裂缝型或岩溶改造型储层发育特征

岩溶改造型储层主要指中三叠统顶部早印支

表2 四川盆地雷口坡组典型井颗粒滩物性统计表
Table 2 Statistical table of physical properties of granular shoal of Leikoupo Formation in typical wells of Sichuan Basin

井名	层位	井深/m	孔隙度/%		样品数
			范围值	平均值	
龙岗173	雷四 ³ 亚段	3 279.4~3 297.0	0.67~9.21	3.11	64
龙岗172	雷四 ³ 亚段	3 706.0~3 727.0	1.14~9.96	3.82	105
龙岗161	雷四 ³ 亚段	3 692.0~3 705.0	2.52~9.49	4.90	68
中46	雷三 ³ 亚段	3 047.1~3 149.8	0.25~11.95	3.91	180
中坝7	雷三 ³ 亚段	3 436.2~3 517.7	0.50~9.11	4.29	28
磨29	雷一 ¹ 亚段	2 787.0~2 792.8	0.32~16.29	9.23	29
华西1	雷一 ¹ 亚段	2 693.3~2 697.3	0.77~16.15	6.80	16
涑1	雷一 ¹ 亚段	2 533.9~2 539.6	0.74~20.37	11.56	29

期不整合面下的风化壳储层。目前发现的川西地区新深 1 井、川科 1 井、灌口 003-5 井、羊深 1 井的天井山组气层可能为此类储层,川西江油的中坝地区雷三³亚段气层、川中龙岗—元坝地区雷四³亚段气层的储层也均受到风化淋滤作用的改造。裂缝型储层以元坝雷四³亚段气层为典型,其岩性以泥晶白云岩为主,基质孔不发育,但裂缝发育,同时表生期沿裂缝发生不同程度的溶蚀作用,从而形成溶蚀裂缝型储层(图 11i)。

表生淋滤作用的强度与岩性、古地貌和裂缝有密切关系。基质孔隙或裂缝发育时,岩溶改造作用相对较强;而基质孔隙和裂缝不发育时,淡水流体渗流不畅,淋滤作用不明显。另外,在岩溶高地由于水体快速流失而淋滤效果较差,岩溶洼地由于水体汇集易形成胶结,淋滤效果好的地带主要为岩溶斜坡带,如川科 1 井岩溶斜坡。从岩溶作用发育深度来看,一般在距雷口坡组顶面 0~50 m 之间出现,最深在距雷口坡组顶面 110 m 内可见。

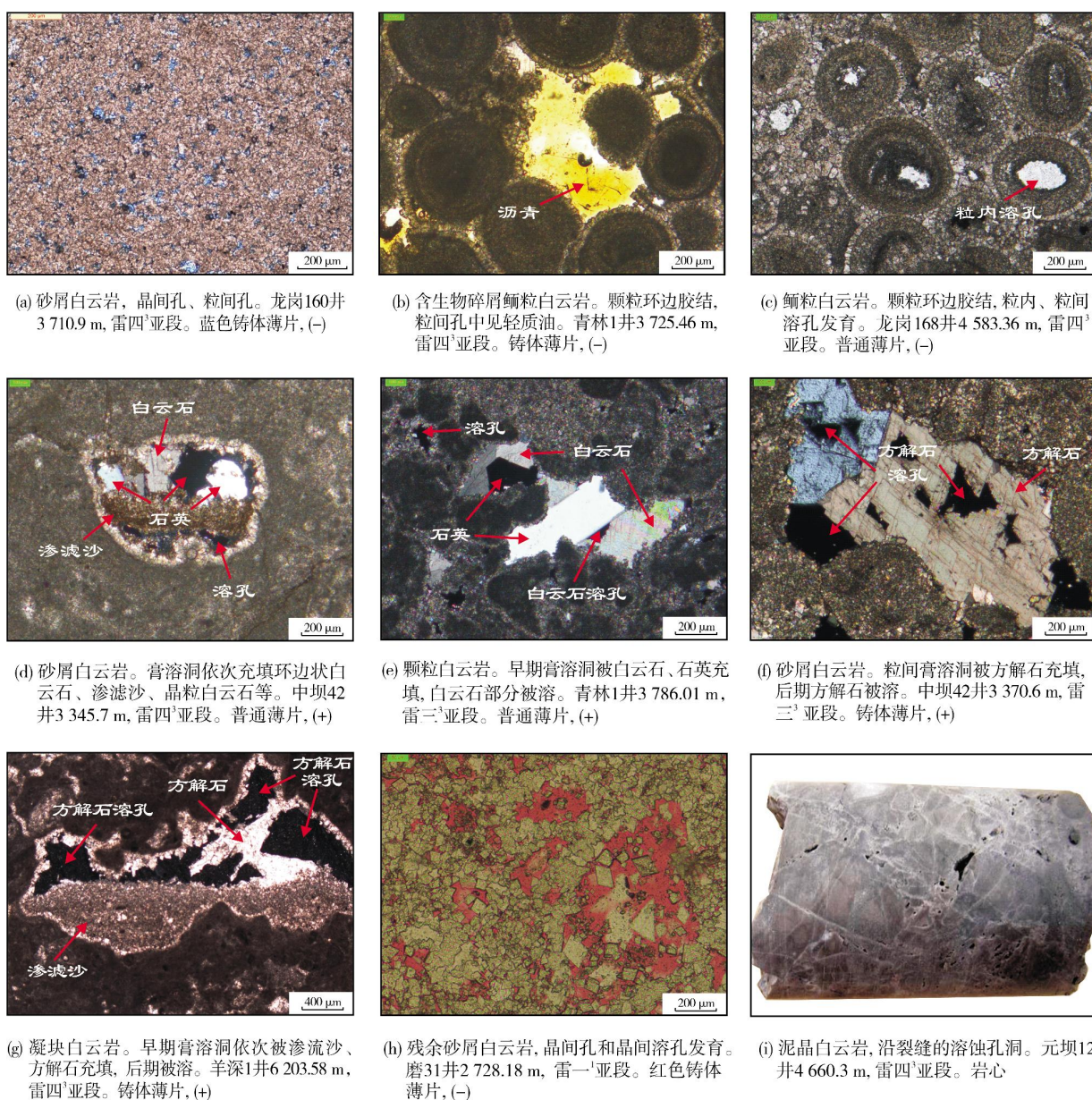


图 11 四川盆地中三叠统储层孔隙成因类型与充填特征典型照片

Fig. 11 Typical photos showing pore genetic types and filling characteristics of the Middle Triassic reservoirs in Sichuan Basin

4.2 储层主控因素

根据储层岩石学特征、储层孔隙发育与物性分布特征,结合中三叠统沉积埋藏与构造演化史,对四川盆地中三叠统相对优质储层的关键控制因素进行了总结。

(1)颗粒滩与微生物岩是有利储层形成的关键岩相基础

根据中三叠统储层物性与岩性关系分析,储层物性相对较好的主要为颗粒碳酸盐岩及藻粘结的藻粒、藻纹层、叠层石、凝块石等微生物岩,其次是粉晶、少量的细晶碳酸盐岩,而泥晶、含膏质的碳酸盐岩物性均较差。

(2)准同生白云石化与岩溶作用是原生孔隙保持和次生孔隙形成的关键

白云石化作用会使岩石总孔隙度增加,同时使晶体增大和趋于自形,提高岩石的抗压性能。准同生期白云岩的碳酸盐岩原始结构保存相对完整,见窗格构造,表明其形成环境与蒸发潮坪有关。据微量元素分析结果,白云石有序度较低,在0.38~0.68之间,平均为0.57,表明白云石具有同生期—准同生期形成的特征。薄片经常见到孔洞中充填渗滤沙,渗滤沙充填前的孔洞有溶蚀改造痕迹,且渗滤沙具示底构造特征(图11d,11g),之后进一步被方解石、白云石、石英等充填。这一期渗滤沙应该为准同生期早表生淋滤作用所形成,之后的胶结物为早—晚埋藏期形成。另外,川西北、龙岗地区雷四段、雷三段鲕粒白云岩常见鲕粒内溶孔和鲕粒间溶孔(图11c),含生物碎屑碳酸盐岩中发育生物碎屑铸模孔,这些可能与早表生作用有关。

(3)中三叠世末期的表生岩溶作用起关键的加强和巩固作用

早印支运动使中三叠统抬升出露,普遍遭受剥蚀、淋滤。据薄片观察,川西北地区雷三段常见孔洞中方解石胶结物的溶蚀,且溶蚀边界见铁泥质环边,部分还可见渗滤沙的存在,而晚期的构造缝中充填的方解石未见溶蚀。在龙门山前缘带的高家1井、龙深1井、川科1井的天井山组取心段见石灰岩的溶蚀孔洞、孔洞中的渗滤沙等,表明此时期表生淋滤作用较明显,并形成龙门山前带天井山组溶蚀孔洞型储层。另外,川中北的元坝地区雷四³亚段溶蚀裂缝发育,沿裂缝常见溶蚀孔洞,并形成良好的溶蚀裂缝型储层(图

11i)。因后期没有再出现地层暴露,因此推断这些溶蚀缝洞为中三叠世末期的表生淋滤作用所致。

(4)埋藏期有机酸的溶蚀作用及油气的浸位起到积极保护作用

中三叠统富微生物,有机碳含量普遍在0.2%左右,有机质类型好,本身具有有机酸的生成能力,而且在成岩早期即可形成,而此时期成岩流体最活跃,成岩矿物丰富,这时有机酸的产生使地层形成弱酸介质环境,有效抑制了方解石的胶结。这可能就是大多准同生期形成的颗粒滩、微生物岩储层的孔隙在早成岩期不被胶结而保存的主要原因,同时可形成埋藏溶蚀孔隙(图11f,11g)。

同理,较早的油气浸位在保持酸性成岩环境的同时占据了孔隙空间,同样抑制了胶结物的形成。而没有油气浸位或有机酸消耗殆尽之后,成岩环境又转为弱碱性,孔隙空间被方解石、白云石或热液矿物(如硅质)胶结。如青林1井雷三上段储层孔洞发育,孔洞中残余轻质油较多,表明有油浸位过;而下部无油质残余的层段储层物性差,主要原因则是其大部分孔洞被晚期方解石、白云石或热液矿物(如硅质)胶结充填(图11d,11e)。

(5)埋藏期间多期构造运动造缝有力改善了储层的渗流能力

中三叠统成岩埋藏期间遭受多次构造运动,特别是印支晚期、燕山期与早喜马拉雅期构造运动较强,可产生多期构造缝,成为油气的运移通道和储集空间,大大改善储层性能。裂缝发育时可形成孔洞—裂缝复合型或裂缝型有效储层,如龙岗、元坝地区雷四³亚段气藏储层。

4.3 有利储层发育区带

根据中三叠统储层控制因素分析,认为古隆周缘的风化壳岩溶分布带,准同生、早表生或叠加晚表生岩溶改造的微生物岩与台内滩分布带为有利储层发育区带,提出“三带、两隆”的有利储层发育区带:“三带”即川西坳陷西缘龙门山台缘逆冲断褶带、川西坳陷东部斜坡低缓(断)褶带、仪陇凹陷南缘断褶带;“两隆”即川西北天井山—九龙山继承性古隆起周缘、川中泸州—开江继承性古隆起周缘。

5 结论和意义

(1)依据岩性、电性、生物特征及风化土壤、溶蚀

现象等特征,重新厘定了中三叠统天井山组的地层及其分布范围,明确天井山组为重要的有利勘探层系之一,拓展了中三叠统勘探层系。

(2)指出微生物岩是雷口坡组重要的碳酸盐岩类型,具有规模发育和形成规模有效储层的潜力,为目前雷口坡组除颗粒滩碳酸盐岩之外又一类新的、比较现实的勘探对象,拓展了雷口坡组的勘探领域。

(3)对四川盆地中三叠统相对优质储层的关键控制因素进行了分析总结,明确有利储层孔隙形成和保存机制,提出古隆周缘的风化壳岩溶分布带、准同生叠加表生岩溶改造的微生物岩与颗粒滩分布带为有利储层发育区带,明确了雷口坡组的勘探方向。

致谢:川西南油气田公司研究院、中国石油勘探开发研究院四川盆地中心等专家为本文的编写提供了大量的帮助,评审专家对本文提出宝贵的修改意见,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 辛勇光,周进高,倪超,等.四川盆地中三叠世雷口坡期障壁型碳酸盐岩台地沉积特征及有利储集相带分布[J].海相油气地质,2013,18(2): 1-7.
- [2] 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.
- [3] 李凌,谭秀成,周彦彦,等.四川盆地雷口坡组层序岩相古地理[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(4): 13-22.
- [4] 谭秀成,李凌,刘宏,等.四川盆地中三叠统雷口坡组碳酸盐台地巨型浅滩化研究[J].中国科学: D 辑 地球科学,2014,44(3): 457-471.
- [5] 孙春燕,胡明毅,胡忠贵,等.四川盆地中三叠统雷口坡组沉积特征及有利储集相带[J].石油与天然气地质,2018,39(3): 498-512.
- [6] 刘树根,孙玮,宋金民,等.四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探的关键地质问题[J].天然气地球科学,2019,30(2): 151-167.
- [7] 宋晓波,王琼仙,隆轲,等.川西地区中三叠统雷口坡组古岩溶储层特征及发育主控因素[J].海相油气地质,2013,18(2): 8-14.
- [8] 李蓉,许国明,宋晓波,等.川西坳陷雷四亚段储层控制因素及孔隙演化特征[J].东北石油大学学报,2016,40(5): 63-74.
- [9] 李宏涛,胡向阳,史云清,等.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[J].石油与天然气地质,2017,38(4): 753-763.
- [10] 沈安江,周进高,辛勇光,等.四川盆地雷口坡组白云岩储层类型及成因[J].海相油气地质,2008,13(4): 19-28.
- [11] 四川油气区石油地质志编写组.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: 11-516.
- [12] 童崇光.四川盆地构造演化与油气聚集[M].北京:地质出版社,1992.
- [13] 辜学达,刘啸虎.四川省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [14] 秦川.川西坳陷中北部三叠系雷口坡组—马鞍塘组储层特征及油气勘探前景[D].成都:成都理工大学,2012.
- [15] 刘树根,宋金民,王浩,等.四川盆地西部深层中三叠统雷口坡组微生物碳酸盐岩储层特征及其构造控制作用探讨[C]//孟宪来.中国地质学会 2015 学术年会论文摘要汇编(中册).北京:中国地质学会出版社,2015: 394-396.
- [16] 刘树根,宋金民,罗平,等.四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J].成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(2): 129-152.

编辑:黄革萍

Research progress on sedimentation and reservoir of Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin

WANG Xin, XIN Yongguang, TIAN Han, ZHU Mao, ZHANG Hao, LI Wenzheng

Abstract: Up to now, no large-scale oil or gas field group has been found in Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin. The key problem is that the formation mechanism and distribution law of reservoirs are not well understood. Starting from the division and correlation of sequence stratigraphy, the stratigraphic distribution, sedimentation and reservoir characteristics of the Middle Triassic are systematically sorted out and analyzed by using the latest oil and gas exploration results and abundant basic data. The results show that: (1) the Middle Triassic Tianjingshan Formation (also known as "the Leikoupo Formation Member 5") exists in the basin, which is one of the important favorable exploration strata in the Middle Triassic; (2) microbial carbonate rock is an important type of carbonate rock of Leikoupo Formation, which has the potential acting as large-scale effective reservoir; (3) dolomitization and karstification in paracontemporaneous period and karstification in supergene stage are the main controlling factors of reservoir pore forming in Leikoupo Formation, and the acid diagenetic environment in early burial period, dissolution and structural fractures in burial period are the key factors for pore maintenance, improvement and transformation; (4) the distribution zone of weathering crust karst around the paleouplift, and the distribution zone of the microbial rock and granular shoal reformed by paracontemporaneous and supergene karstification are favorable reservoir development zones.

Key words: reservoir genesis; microbial rock; karstification; Leikoupo Formation; Middle Triassic; Sichuan Basin

WANG Xin, First author: Senior Engineer, engaged in reservoir geology and petroleum geology. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China