

四川盆地寒武系龙王庙组岩相古地理特征及储层成因与分布

陈娅娜^{1,2,3}, 张建勇^{1,2,3}, 李文正^{1,2,3}, 潘立银^{1,3}, 余敏^{1,3}

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油勘探开发研究院四川盆地研究中心;

3 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室

摘要 基于露头地质调查、岩心和薄片观察、储层地球化学分析及溶蚀模拟实验的结果,剖析了四川盆地寒武系龙王庙组岩相古地理及白云岩储层特征、成因和分布规律。指出四川盆地龙王庙组为远端变陡的碳酸盐缓坡沉积,纵向上可划分为上、下2段,从下而上记录了气候从潮湿到干旱的变化序列;颗粒滩主要分布于龙王庙组上段的浅水内缓坡,是龙王庙组白云岩储层发育的基础;准同生溶蚀作用受暴露面控制,是龙王庙组颗粒滩储层孔隙发育的关键;埋藏期溶蚀孔洞主要沿准同生期形成的孔隙带继承性发育,对龙王庙组储集空间具有重要贡献;盐亭—安岳—威远一带滩体多期叠置,处于古地貌高部位且埋藏溶蚀发育,是勘探有利区,全盆地广泛分布的颗粒滩均为潜在的勘探对象。

关键词 碳酸盐缓坡; 颗粒滩; 白云岩; 储层成因; 储层分布; 龙王庙组; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

0 前言

寒武系龙王庙组白云岩是四川盆地天然气勘探的重要领域。2005年,在威远构造钻探威寒1井首次发现了龙王庙组孔隙型白云岩气藏,测试产气 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2012年,在高石梯—磨溪构造钻探磨溪8井获气 $190.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,发现了我国迄今为止单体规模最大的海相碳酸盐岩气田——安岳气田,揭开了寒武系深层大气田勘探的序幕^[1-4]。

龙王庙组已发现的天然气主要富集于川中地区颗粒滩中,因此岩相古地理恢复和颗粒滩分布预测是提高该领域勘探成功率的关键。关于龙王庙组的岩相古地理特征和储层成因,前人开展了大量的研究工作,取得了一些重要的成果和认识^[3,5-21]。但对龙王庙组古地理格局的认识和观点仍存在分歧,前人提出的沉积模式主要有如下5种:①传统碳酸盐镶边台地模式^[5-7];②传统碳酸盐缓坡模式^[3,8-9];③碳酸盐缓坡“双滩”沉积模式^[10-12];④碳酸盐镶边台地“三滩”沉积模式^[1];⑤碳酸盐缓坡向镶边台地演化模式^[13]。已钻探并揭示龙王庙组颗粒滩储层非

均质性较强,滩相储层的发育与演化主要受沉积、成岩和构造作用的联合控制。不同学者均强调了白云石化作用、岩溶作用等对优势颗粒滩相带的叠加改造,但是在成岩改造的先后序列、岩溶作用类型及主控因素等方面仍存在争议^[14-21]。

本文基于露头地质调查、岩心和薄片观察、储层地球化学特征分析及模拟实验的结果,结合钻井及地震资料,对四川盆地龙王庙组岩相古地理特征和储层成因与分布进行深化研究,以期对龙王庙组有利储层预测及接替勘探领域和区带的优选提供依据。

1 沉积相特征和古地理重建

1.1 地层概况

龙王庙组是四川盆地及周缘寒武系第一套稳定分布、以碳酸盐岩为主的地层,盆地内与龙王庙组代表同一套地层的有南江—旺苍小区的孔明洞组、川东—渝南小区的清虚洞组、恩施—咸丰小区和城口—巫溪小区的石龙洞组^[13]。早寒武世早期,随着海平面下降,四川盆地历经筇竹寺组和沧浪铺组陆棚

收稿日期: 2020-01-07; 改回日期: 2020-05-28

本文受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: 陈娅娜,博士,高级工程师,主要从事碳酸盐岩储层成因研究与地震预测工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路 920 号中国石油杭州地质研究院; E-mail: chenyn_hz@petrochina.com.cn

碎屑的填平补齐后,盆地内古地貌趋于平缓,地势总体呈西高东低,开始了清水碳酸盐沉积。

四川盆地龙王庙组以大套白云岩为主,下部石灰岩较多,中部常夹膏盐岩,上部夹少许砂泥岩,厚0~727 m。区域上在川西广元—资阳—乐山一带地层缺失,川东、黔东地层增厚,向两侧厚度减薄,具有2种特征不同的岩性组合:①单一的碳酸盐岩组合。主要分布在川中及其邻区,多为白云岩与石灰岩沉积。②含膏碳酸盐岩组合。分布在川南南部及川东地区,多为碳酸盐岩与膏岩、盐岩或膏质白云岩互层。龙王庙组纵向上可进一步细分为上、下2段,代表2次海平面升降旋回:下旋回以通江—开江—重庆—赤水为界,东侧石灰岩发育,西侧白云岩发育,膏盐岩仅见于宁2井一带;上旋回在全盆地均发育较厚,以白云岩为主,颗粒滩发育,局部可见膏盐岩层。

川中磨溪地区发育颗粒滩和滩间泥晶白云岩岩

相组合。颗粒滩普遍白云石化,孔隙发育;旋回中部多为深灰色—黑色泥质泥晶白云岩、深灰色泥岩夹层,反映水体为较深的缺氧环境。川东北地区下旋回以泥晶灰岩为主,上旋回主要为泥—粉晶白云岩夹颗粒白云岩,颗粒白云岩位于旋回的上部,孔隙发育。川东南地区下旋回以泥晶灰岩、泥质泥晶灰岩为主,含有陆源物质,向上逐渐减少;上旋回以膏盐岩发育为特征,潟湖周缘发育膏云坪白云岩,夹少量颗粒白云岩,孔隙发育。

1.2 龙王庙组双滩沉积相模式

在露头地质调查、分区单井相分析和特征对比的基础上,建立了龙王庙组远端变陡的缓坡沉积模式,自西向东(自陆向海)依次为古陆—近岸潮坪—浅水内缓坡—开阔内缓坡/局限内缓坡—中缓坡—外缓坡及盆地沉积,各相带沉积特征见表1。

表 1 四川盆地寒武系龙王庙组沉积相特征
Table 1 Sedimentary facies characteristics of Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

序号	相	亚相	微相	水动力特征	岩性特征及组合	实例
1	近岸潮坪	混合坪	白云质泥坪、粉砂质泥坪、含泥云坪	平均海平面以上,主要受潮汐作用影响	粉砂质泥—粉晶白云岩、泥灰质粉砂岩、泥质泥晶白云岩,为陆源碎屑和清水碳酸盐的混合沉积	天星1井 龙探1井
2	浅水内缓坡	颗粒滩	砂屑滩、鲕粒滩、砾屑滩	经常性、持续性的波浪作用带,水动力强,颗粒滩发育	灰色粉—细晶砂砾屑白云岩、鲕粒白云岩、晶粒白云岩等,溶蚀孔洞及针孔发育,交错层理、冲刷构造和生物扰动构造常见,GR曲线形态平直,近直线状	磨溪8井 磨溪12井 高石10井 南充1井 杨坝剖面 旺苍剖面 范店剖面
		滩间海	泥晶白云岩、粉晶白云岩		灰色—深灰色纹层状泥—粉晶白云岩,夹少量颗粒白云岩,GR曲线形态平直,略有起伏	
3	开阔内缓坡	正常潟湖	泥云质、含灰白云质、泥灰质潟湖	平均浪基面以下,低能环境,与两侧隆起呈平缓过渡,水流通畅,远离广海,不受风暴浪基面的影响	灰色—深灰色泥质泥晶白云岩、泥晶白云岩、泥晶灰岩,泥质条带发育,GR曲线齿状起伏	广探2井 利1井 宫深1井 丁山1井 城口石溪河剖面 巫溪田坝剖面 茶山剖面 抓抓崖剖面
		潮坪	灰坪、灰云坪、云坪		浅灰色—灰色泥晶白云岩、泥晶灰岩、含泥白云岩等,夹风暴成因的颗粒岩,干裂、波痕等沉积构造丰富,可见生物遗迹	
4	局限内缓坡	局限潟湖	膏盐湖、含膏白云质潟湖、含云泥质潟湖	水流总体不畅,咸化,发生盐度分层,盐跃层以上受波浪、潮汐作用影响,以下为滞留的低能静水环境	膏盐岩、白云质膏岩、膏质白云岩为主,局部发育灰色—深灰色泥质泥晶白云岩、泥晶白云岩,泥质条带发育,生物遗迹较少	东深1井 临7井 座3井 建深1井 华莹山剖面
		潮坪	膏质云坪、云坪、灰云坪		浅灰色—灰色泥晶白云岩、含泥白云岩等,夹风暴成因的颗粒白云岩和膏溶角砾岩,可见干裂、波痕等沉积构造	
5	中缓坡	颗粒滩	砂屑滩、鲕粒滩、砾屑滩	风暴浪基面以上,局部地貌高地受波浪作用强烈影响,面向广海,风暴作用频繁	灰色细晶砂屑白云岩、砂屑灰岩、鲕粒白云岩,溶蚀孔洞和针孔发育,风暴成因的颗粒岩常见,丘状层理和粒序层理,为标志性沉积	宁1井 宁2井 秀山溶溪剖面 仁怀石塔剖面 石门杨家坪剖面 长阳两河口剖面
		滩间海	(含)泥质灰岩、泥—粉晶白云岩		纹层状(含)泥质灰岩、泥—粉晶白云岩,夹风暴作用形成的薄层砂屑白云岩	
6	外缓坡及盆地	斜坡	瘤状白云岩、瘤状灰岩、滑塌颗粒滩	总体为低能静水环境,上部偶受海啸作用影响	碳酸盐岩和泥岩互层的瘤状灰岩、瘤状白云岩,上部可见碳酸盐岩角砾,可见滑塌作用堆积而成的颗粒滩	泸溪兴隆场剖面 怀化花桥剖面 平利柳坝剖面
		盆地	泥页岩		泥页岩等远洋沉积	

龙王庙组记录了从潮湿到干旱气候的完整沉积序列,由于在万州—赤水潟湖的两侧均发育颗粒滩相带,此模式亦为龙王庙组双颗粒滩缓坡沉积模式。与以往的碳酸盐缓坡模式相比,该模式最大的特点是在内缓坡靠海一侧发育膏盐潟湖,内缓坡和中缓坡均发育颗粒滩,形成双滩样式。该模式的另一个特点是内缓坡白云石化较强,中缓坡次之,外缓坡基本未见白云石化。其主要原因是:下旋回沉积时气候潮湿炎热,仅内缓坡水体较浅,在蒸发作用下,内缓坡海水盐度增高,具备准同生白云石化的条件;上旋回沉积时,气候变得干旱炎热,在中缓坡颗粒滩的障壁作用下,台内强烈的蒸发作用使海水极度浓缩,为强烈白云石化提供了充足镁源,同时在万州—赤水潟湖等低洼环境沉淀膏盐和石盐。

1.3 构造-岩相古地理

1.3.1 龙王庙组下段沉积期

四川盆地龙王庙组下段表现为气候潮湿条件下的缓坡沉积。西部台隆地貌较高,水体浅、能量大,以颗粒滩沉积为主,准同生白云石化作用较强,岩性以砂屑白云岩、粗晶白云岩为主(图1);东部浅凹区地貌较低,水体相对安静,能量较低,岩性以泥晶灰岩、白云质灰岩为主,颗粒滩相对不发育;往奉节—石柱—桐梓一带以东为中缓坡泥质灰岩沉积区,颗粒滩储层较发育。龙王庙组下旋回自西向东依次发育内缓坡—中缓坡—外缓坡—盆地相沉积,当时气候潮湿,沉积环境开阔,沉积物以泥晶灰岩为主,颗粒滩主要发育在内缓坡高地及中缓坡。

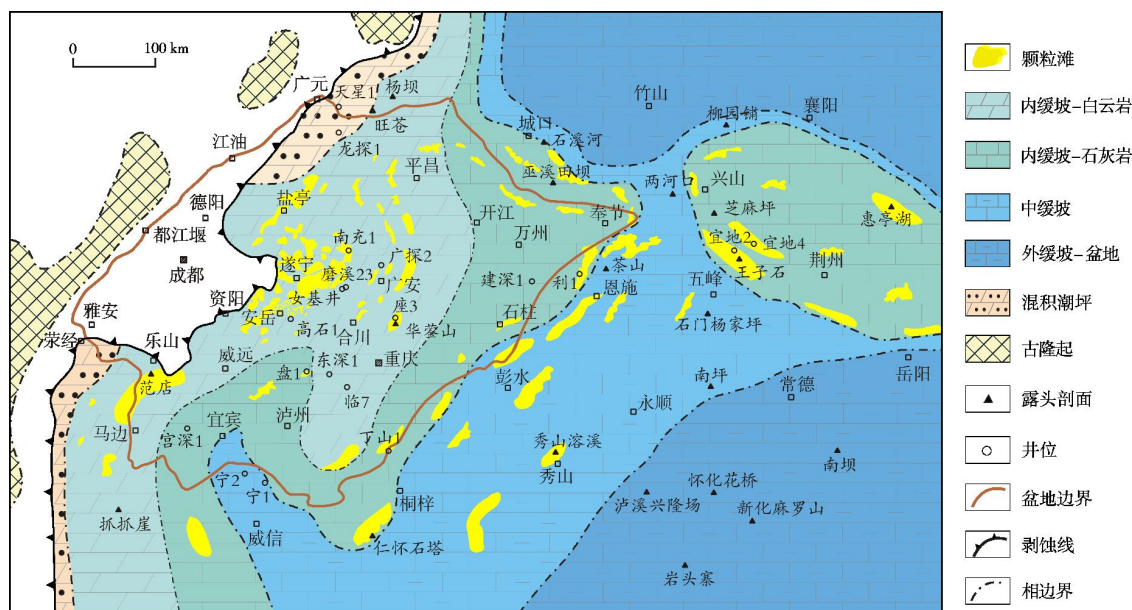


图1 四川盆地及周缘寒武系龙王庙组下段沉积期构造-岩相古地理图

Fig. 1 Tectonic-lithofacies paleogeographic map of the Lower Section of the Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin and its surrounding area

1.3.2 龙王庙组上段沉积期

四川盆地龙王庙组上段是滩体发育的鼎盛时期,台内沉积分异也较明显,西部台隆主要发育颗粒滩,中部发育膏盐潟湖,东部内缓坡颗粒滩沉积亦较发育(图2)。再向东,为中缓坡含泥灰岩沉积区。龙王庙组上旋回自西向东依次发育浅水内缓坡—开阔内缓坡/局限内缓坡(潟湖)—中缓坡—外缓坡—盆地相沉积,潟湖内发育膏盐岩,反映气候愈加干燥,蒸发环境有利于沉积物发生早期白云石化,颗粒滩主要分布在潟

湖周缘的内缓坡和中缓坡,分布广、规模大。

颗粒滩的发育受古地貌与海平面升降的控制。西部台隆区整体水体较浅,水动力强,有利于滩体发育。进一步的研究揭示,颗粒滩的发育受台隆区次一级微地貌高的控制,如西部台隆区在次级断裂作用下由西往东可分出3个地貌断阶,磨溪最高、高石梯次之、盘龙场最低,受微地貌控制,沿上述断阶发育3条滩带,依次是磨溪—女基井滩带、威远—高石梯滩带、盘龙场—合川滩带。据地震资料解释,这些滩带

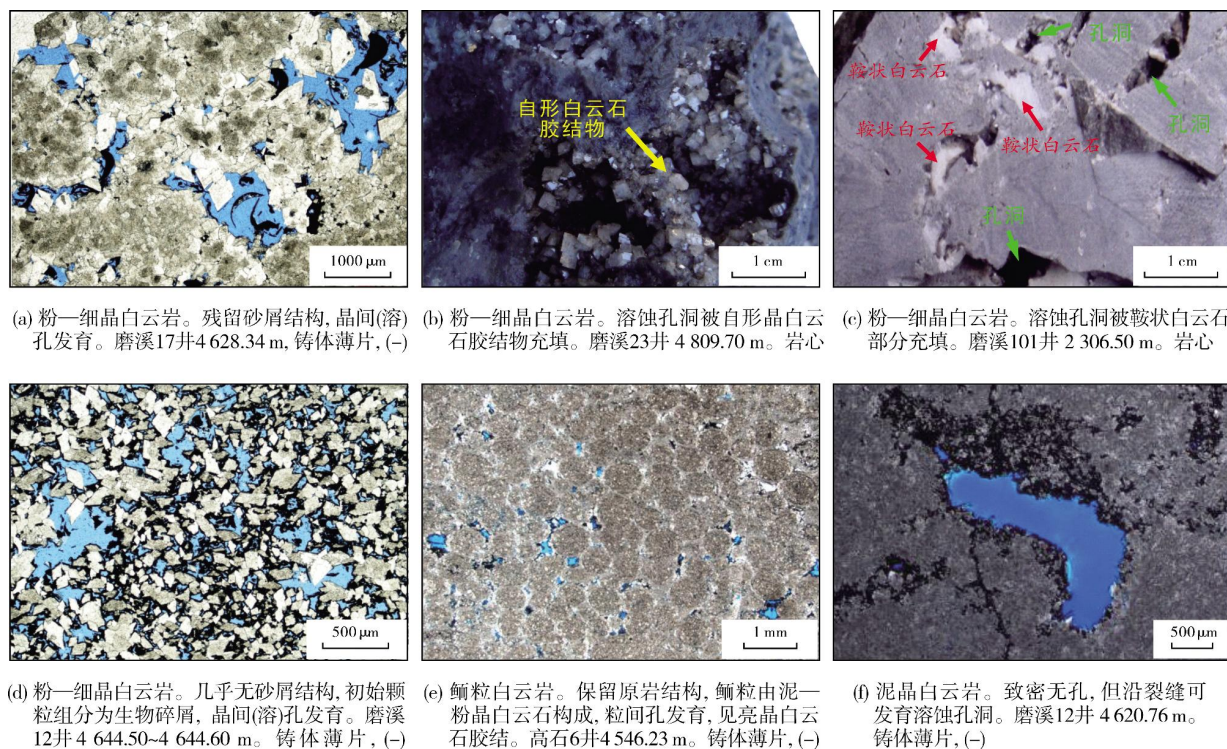


图3 四川盆地龙王庙组白云岩岩石类型和孔隙类型

Fig. 3 Rock type and pore type of dolomite of Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

2.1.2 白云岩地球化学特征

选取龙王庙组交代成因白云石(包括泥晶白云石、鲕粒白云石、粉—细晶白云石)、砂屑白云岩中自形晶白云石胶结物及鞍状白云石样品,开展碳氧稳定同位素、锶同位素、微量元素、稀土元素等测试,结果显示不同组白云石的地球化学特征存在明显差异。

碳氧同位素和锶同位素具有明显的三分性(图4a—4b),从交代成因白云石—自形晶白云石胶结物—鞍状白云石碳氧同位素组成逐渐变轻,体现了形成环境随埋深加大的温度效应^[31-32]。交代成因白云石形成于温度较低的近地表环境,自形晶白云石胶结物形成于温度较高的浅—中埋藏成岩环境,鞍状白云石的形成温度最高,与深层热液活动有关。锶同位素具有逐渐变轻并趋于与寒武纪海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值一致的现象,交代成因白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显高于同期海水的异常现象可能与淡水加入或陆源物质加入有关。

龙王庙组白云岩Fe、Mn含量及发光特征较复杂,可分为4个区(图4c)。I区(Mn含量 $<100\text{ }\mu\text{g/g}$):均不发光,指示氧化环境^[33],主要见于泥晶白云石、粉晶白云石中;II区(Mn含量 $>100\text{ }\mu\text{g/g}$, Mn/Fe >1):明亮发光,指示强还原环境^[33],主要见于鞍状白云石

及部分自形晶白云石胶结物中;III区(Mn含量 $>100\text{ }\mu\text{g/g}$, Mn/Fe <1 , Fe含量 $>3\text{ }000\text{ }\mu\text{g/g}$):不发光,指示氧化环境,见于部分泥晶白云石、鲕粒白云石、细晶白云石中;IV区(Mn含量 $>100\text{ }\mu\text{g/g}$, Mn/Fe <1 , Fe含量 $<3\text{ }000\text{ }\mu\text{g/g}$):有的发光,有的不发光,主要见于部分粉—细晶白云石、泥晶白云石、自形晶白云石胶结物中。Fe和Mn的绝对含量与相对含量对矿物的发光有独立的控制作用。交代成因白云石主要形成于准同生期与蒸发海水相关的氧化环境,部分粉—细晶白云石的发光与埋藏成岩叠加改造有关,自形晶白云石胶结物及鞍状白云石主要形成于埋藏期的还原环境,部分不发光的自形晶白云石胶结物可能代表埋藏晚期的最后一期胶结物。

将龙王庙组稀土元素数据用澳大利亚晚太古宙页岩进行标准化处理,其配分模式显示交代成因白云石具有Ce和Eu负异常,而自形晶白云石胶结物具有明显的Eu正异常特征(图4d)。负异常指示准同生期 Ce^{3+} 被氧化成易溶的 Ce^{4+} 、 Eu^{3+} 被还原为易溶的 Eu^{2+} 而迁移贫化的结果;Ce和Eu正异常,指示埋藏期 Ce^{3+} 被还原为难溶的 Ce^{2+} 、 Eu^{3+} 被氧化为难溶的 Eu^{4+} 的结果^[34-35]。

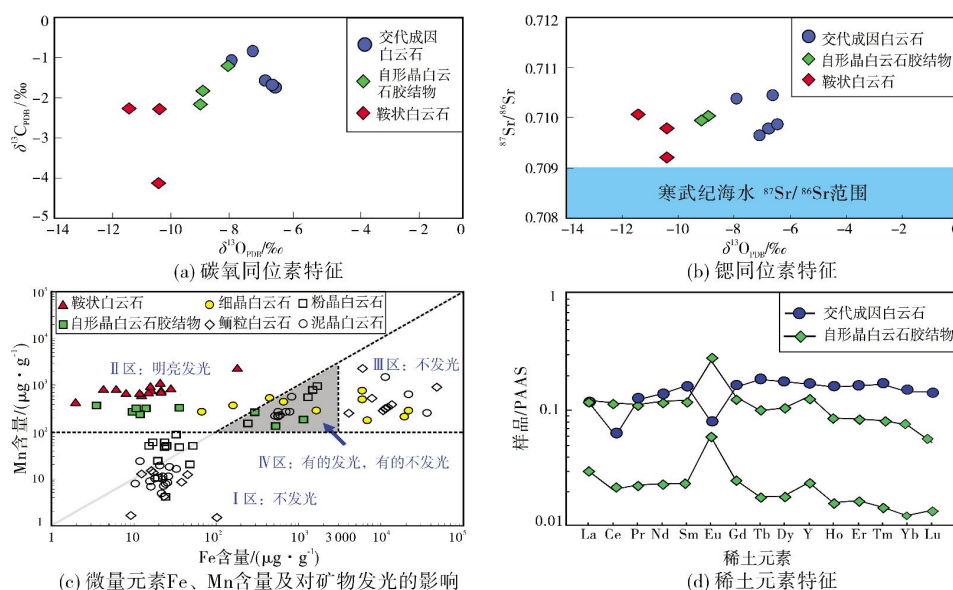


图 4 四川盆地龙王庙组白云岩地球化学特征

Fig. 4 Geochemical characteristics of dolomite of Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

2.1.3 白云石晶体结构特征

白云石晶体生长速度与白云石有序度、晶胞参数、晶格缺陷、晶面条纹和晶面间距等晶体结构特征

密切相关^[36],能够间接反映白云石的成因。本文选取龙王庙组不同类型的白云石样品,开展晶体结构特征研究,为白云石成因分析提供了新的证据(表2)。

表2 四川盆地龙王庙组不同类型白云石晶体结构特征参数表

Table 2 Crystal structural parameters of different types of dolomite of Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

白云石类型	有序度	晶胞参数(C)	晶格缺陷	晶面条纹	晶面间距/nm	成因解释
泥晶白云石	0.40~0.54	偏小	少	紧密镶嵌	—	准同生期交代白云石化
鲕粒白云石	0.50~0.65	偏小	少	紧密镶嵌	—	
粉—细晶白云石 (砂屑白云岩)	0.60~0.80	略小	少	紧密镶嵌	0.356 0	
砂屑白云岩中自形晶 白云石胶结物	0.86~0.97	偏大	少	规则整齐	0.374 6	埋藏期白云石化
鞍状白云石	0.42~0.68	最大	枝状、带状缺陷众多	明显弯曲	0.388 7	热液白云石化

龙王庙组准同生期交代成因的白云石是快速交代作用的产物,埋藏期鞍状白云石是快速生长的产物,因此这两类白云石的有序度低,而白云石胶结物具有缓慢生长的特征,故白云石有序度高。白云石晶体沿C轴方向生长快,晶胞参数则大;准同生期交代成因白云石晶体生长速度极慢,晶胞参数偏小;埋藏期自形晶白云石胶结物生长速度较交代成因白云石快,晶胞参数偏大;鞍状白云石的晶体生长速度最快,晶胞参数最大。鞍状白云石的快速生长还会导致晶格缺陷概率和晶面间距明显高于自形晶白云石胶结物,而且由于晶格缺陷过多导致晶面弯曲,自形晶白云石胶结物的晶面要比鞍状白云石规则整齐得多。

2.2 白云岩储层发育主控因素

前文讨论了龙王庙组白云岩的成因,但白云石化在孔隙建造中的作用长期以来一直是争论的焦点^[37-39]。本文开展储层特征、储层非均质性和有效储层分布研究,结合溶蚀模拟实验结果,认为龙王庙组白云岩储层发育的主控因素是溶蚀作用,而非白云石化作用,这对有效储层预测具有重要的指导意义。

2.2.1 颗粒滩是白云岩储层发育的物质基础

砂屑白云岩为龙王庙组储层的主体,发育粒间孔、晶间孔、晶间溶孔、溶蚀孔洞及裂缝(图3a—3d)。鲕粒白云岩粒间孔发育,粒间几乎无胶结物或仅有少

量自形晶白云石胶结物(图3e);泥晶白云岩除沿裂缝发育少量溶蚀孔洞外,几乎不发育孔隙(图3f)。高石梯—磨溪地区龙王庙组物性数据揭示:砂屑白云岩和少量鲕粒白云岩为有效储层,多数孔隙度为2%~6%,渗透率为 $(0.01\sim1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,少量孔隙度大于6%,渗透率大于 $1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$;泥晶白云岩为非储层,孔隙度多小于2%,渗透率多小于 $0.01\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。此外,勘探实践证明,磨溪构造龙王庙组白云岩储层钻遇率和厚度比高石梯构造高,这与磨溪构造龙王庙组颗粒滩沉积比高石梯构造发育有关;磨溪构造钻遇龙王庙组颗粒滩的地层厚度平均为70 m左右,高石梯构造钻遇龙王庙组颗粒滩的地层厚度平均为40 m左右。

2.2.2 准同生溶蚀作用是颗粒滩储层孔隙发育的关键

虽然颗粒滩相白云岩构成龙王庙组储层的主体,但并非所有的颗粒滩相白云岩都是储层,有些颗粒(砂屑、鲕粒)白云岩很致密。在垂向上,多孔的颗粒白云岩、致密的颗粒白云岩与致密泥晶白云岩形成多期次旋回并相互叠置。基于测井数据,结合取心段岩性及物性的标定,应用碳酸盐岩结构组分测井定量识别技术对龙王庙组进行了岩性识别,通过统计发现,有效储层普遍位于沉积旋回的顶部。例如,磨溪21井龙王庙组厚度为120 m,其中砂屑白云岩

厚度为70 m,在垂向上发育3期由下部泥晶白云岩、中部致密砂屑白云岩、上部孔隙型砂屑白云岩构成的向上变浅旋回。有效储层(孔隙度>2%)位于旋回的上部,3期的储层厚度分别为2 m、6 m和5 m,占砂屑白云岩总厚度的18.6%,储层发育显然与滩体在沉积期的暴露和溶蚀有关。

矿物成分对溶蚀强度影响的模拟实验进一步证实,准同生期大气淡水溶蚀作用对孔隙的发育具有重要贡献,其发生在白云石化之后^[12];未白云石化的灰质、石膏等残留易溶组分在大气淡水溶蚀作用下形成组构选择性溶孔,当残留易溶组分达到一定的含量时,可形成蜂窝状溶孔;而不易溶的白云石构成坚固的格架,有利于溶孔的保存。此后,在埋藏环境下,白云岩和石灰岩均可发生溶蚀作用形成孔隙。

2.2.3 埋藏溶蚀孔洞对储集空间具有重要贡献

岩心和薄片观察揭示:溶蚀孔洞也是龙王庙组白云岩非常重要的储集空间,而且主要见于颗粒滩相白云岩中,是对准同生期形成的组构选择性溶孔的重要补充(图5a—5b),少量见于泥晶白云岩中,沿裂缝发育(图5c—5d)。储层模拟实验证实这些非组构选择性溶蚀孔洞为埋藏溶蚀作用的产物,对储集空间的贡献率很大(图5e—5f),而且主要沿准同生期形成孔隙的发育带及裂缝分布,具有继承性。

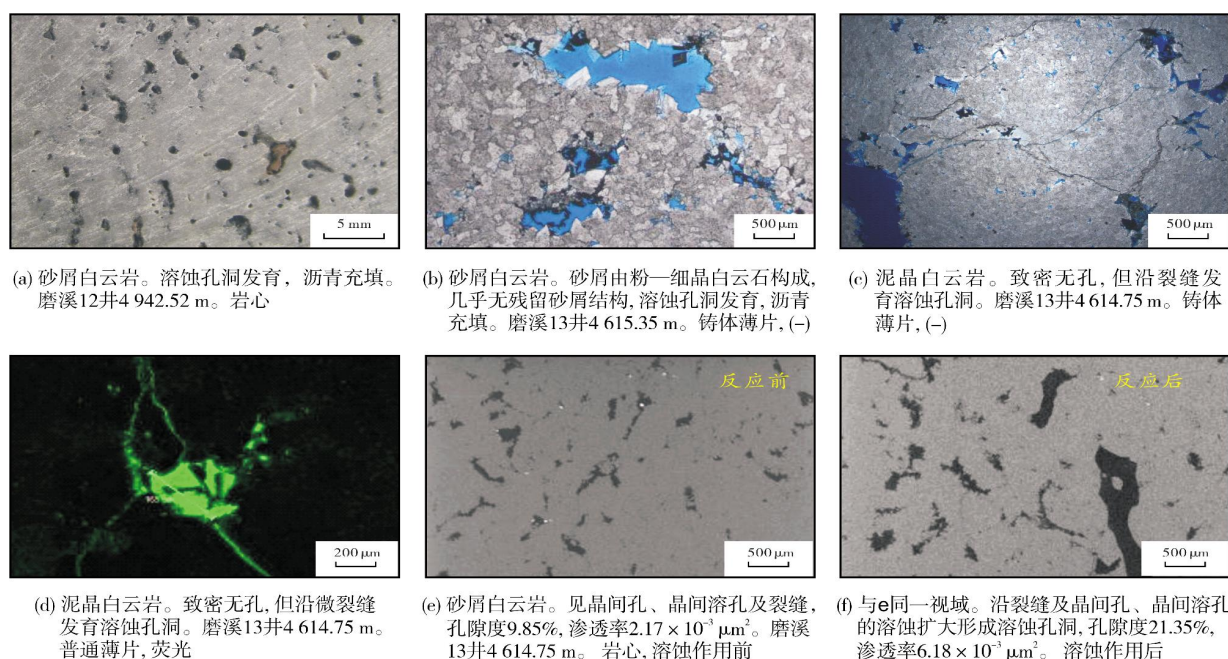


图5 四川盆地龙王庙组白云岩埋藏溶蚀孔洞

Fig. 5 Buried-dissolution vugs of dolomite of Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

埋藏溶蚀孔洞的分布规律是深层优质规模储层预测的关键。本文选取砂屑灰岩和砂屑白云岩样品,开展不同温压条件下物性对溶蚀强度影响的实验。模拟实验结果揭示:埋藏环境下岩石的孔隙大小和连通性控制溶蚀强度,甚至比矿物成分的控制作用更强。这很好地解释了龙王庙组白云岩埋藏及热液溶蚀作用形成的溶蚀孔洞也主要受层序界面控制的原因;先存的粒间孔、晶间孔和裂缝为有机酸、TSR和热液等作用的埋藏溶蚀介质提供了通道,好的孔隙度和连通性增大了白云岩的溶蚀强度,导致大量溶蚀孔洞沿先存的孔隙发育带、裂缝带叠加发育,具有继承性。

基于储层成因认识进展, 通过有利颗粒滩相带刻画、暴露面识别、埋藏史-温压史-流体史的恢复, 预测和评价四川盆地龙王庙组储层分布。

地是埋藏前先存孔隙最有利的发育区。据此,对四川盆地龙王庙组埋藏前先存孔隙发育区进行评价:Ⅰ类区颗粒滩最发育,而且处于沉积古地貌最高部位;Ⅱ类区颗粒滩较发育,处于沉积古地貌较高部位;Ⅲ类区颗粒滩不发育,处于古地貌较低部位。

四川盆地龙王庙组埋藏溶蚀孔洞对储集空间的贡献较大,而且主要沿准同生期形成的孔隙发育带及裂缝带分布,因此埋藏溶蚀孔的分布预测和评价成为储层分布预测和评价非常重要的因素。由于龙王庙组碳酸盐岩溶蚀量在地层温度 $60\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (相当于地层埋深 $1\,370\sim 3\,590\text{ m}$) 时有一个溶蚀有利窗口,此成孔高峰期恰好也是烃源岩成熟和释放大量有机酸的窗口^[40],因此综合考虑埋藏史(龙王庙组经历 $1\,370\sim 3\,590\text{ m}$ 埋深的时间越长,埋藏溶孔越发育)、与烃源岩的距离(与烃源岩越近,有机酸丰度越高)、所处的构造位置(构造高部位是油气和有机酸的运移指向区,有利于孔隙的生成和保存)及断裂分布,编制了四川盆地龙王庙组埋藏溶蚀孔洞发育区评价图(图 6)。同时,叠合埋藏前先存孔隙发育带,编制了四川盆地龙王庙组颗粒滩白云岩储层分布和评价图(图 7):Ⅰ类区,埋藏前先存孔隙和埋藏溶蚀孔洞均发育;Ⅱ类区,埋藏前先存孔隙和埋藏溶蚀孔洞较发育;Ⅲ类区,埋藏前先存孔隙和埋藏溶蚀孔洞不发育。如图 7 所示,盐亭—安岳—威远一带滩体多期叠置、处于古地貌高部位且埋藏溶蚀发育,是最理想的勘探区带。

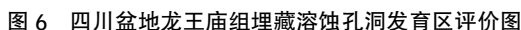


Fig. 6 Evaluation of the development area of buried-dissolution vugs of Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

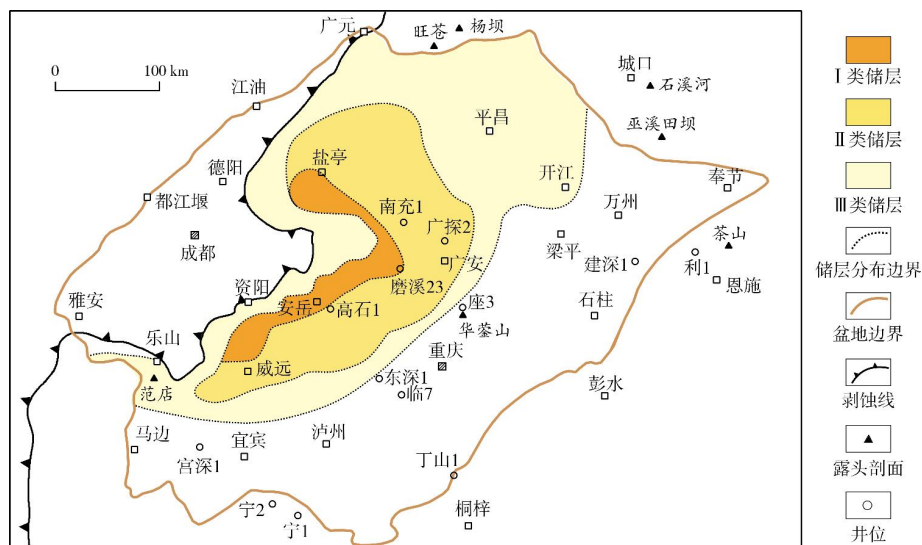


图7 四川盆地龙王庙组颗粒滩白云岩储层分布和评价图

Fig. 7 Distribution and evaluation map of granule-shoal dolomite reservoir of Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

4 结 论

(1)四川盆地寒武纪龙王庙组古地理呈远端变陡的碳酸盐缓坡格局,发育近岸潮坪、浅水内缓坡、开阔内缓坡、局限内缓坡、中缓坡、外缓坡及盆地等沉积相。

(2)白云岩储层主要分布于浅水内缓坡颗粒滩,膏盐湖的发育为颗粒滩发生准同生期与蒸发环境相关的白云石化提供了场所。储层发育于颗粒滩白云岩地层序列中,但并不是所有的颗粒滩白云岩都是储层。表生环境是龙王庙组颗粒滩白云岩储层孔隙发育的重要场所,储层的发育受颗粒滩的分布和层序界面(暴露面)控制。埋藏溶蚀孔洞对储集空间有重要的贡献,主要沿准同生期形成的孔隙带继承性发育,分布有规律可循。

(3)龙王庙组白云岩储层成因与主控因素的地质认识揭示 I 类储层发育于盐亭—安岳—威远一带,此外,全盆地广布的颗粒滩均为潜在的勘探对象。

参考文献

- [1] 杨威,魏国齐,谢武仁,等.四川盆地寒武统龙王庙组沉积模式新认识[J].天然气工业,2018,38(7): 8-15.
- [2] 冉隆辉,谢姚祥,戴弹申.四川盆地东南部寒武系含气前景新认识[J].天然气工业,2008,28(5): 5-9,135-136.
- [3] 邹才能,杜金虎,徐春春,等.四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J].石油勘探与开发,2014,41(3): 278-293.
- [4] 杜金虎,邹才能,徐春春,等.川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J].石油勘探与开发,2014,41(3): 268-277.
- [5] 张满郎,谢增业,李熙喆,等.四川盆地寒武纪岩相古地理特征[J].沉积学报,2010,28(1):128-139.
- [6] 杨威,谢武仁,魏国齐,等.四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储集层展布与勘探区带[J].石油学报,2012,33(增刊2): 21-34.
- [7] 冯伟明,谢渊,刘建清,等.上扬子下寒武统龙王庙组沉积模式与油气勘探方向[J].地质科技情报,2014,33(3): 106-111.
- [8] 刘宝珺,许效松.中国南方岩相古地理图集:震旦纪—三叠纪[M].北京:科学出版社,1994.
- [9] 周进高,房超,季汉成,等.四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩发育规律[J].天然气工业,2014,34(8): 27-36.
- [10] 杜金虎,张宝民,汪泽成,等.四川盆地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.
- [11] 王龙,沈安江,陈宇航,等.四川盆地寒武统龙王庙组岩相古地理特征和沉积模式[J].海相油气地质,2016,21(3): 13-21.
- [12] 沈安江,陈娅娜,潘立银,等.四川盆地寒武统龙王庙组沉积相与储层分布预测研究[J].天然气地球科学,2017,28(8): 1176-1190.
- [13] 张玺华,罗文军,文龙,等.四川盆地寒武纪龙王庙组沉积相演化及石油地质意义[J].断块油气田,2018,25(4): 419-425.
- [14] 田艳红,刘树根,赵异华,等.四川盆地中部龙王庙组储层成岩作用[J].成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(6): 671-683.
- [15] 周进高,徐春春,姚根顺,等.四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J].石油勘探与开发,2015,42(2): 158-166.
- [16] 张建勇,罗文军,周进高,等.四川盆地安岳特大型气田下寒武统龙王庙组优质储层形成的主控因素[J].天然气地球科学,2015,26(11): 2063-2074.
- [17] 杨雪飞,王兴志,唐浩,等.四川盆地中部磨溪地区龙王庙组沉积微相研究[J].沉积学报,2015,33(5): 972-982.
- [18] 代林呈,王兴志,杜双宇,等.四川盆地中部龙王庙组滩相储层特征及形成机制[J].海相油气地质,2016,21(1): 19-28.

- [19] 周慧,张宝民,李伟,等. 川中地区龙王庙组洞穴充填物特征及油气地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016,43(2): 188-198.
- [20] 谢武仁,杨威,李熙喆,等. 四川盆地川中地区寒武系龙王庙组颗粒滩储层成因及其影响[J]. 天然气地球科学,2018,29(12): 1715-1726.
- [21] 韩波,何治亮,任娜娜,等. 四川盆地东缘龙王庙组碳酸盐岩储层特征及主控因素[J]. 岩性油气藏,2018,30(1): 75-85.
- [22] 赵文智,沈安江,胡素云,等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发,2012,39(1): 1-12.
- [23] 赵文智,沈安江,周进高,等. 礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义:以塔里木和四川盆地为例[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3): 257-267.
- [24] 郑剑锋,沈安江,乔占峰,等. 塔里木盆地下奥陶统蓬莱坝组白云岩成因及储集层主控因素分析:以巴楚大班塔格剖面为例[J]. 岩石学报,2013,19(9): 3223-3232.
- [25] 沈安江,郑剑锋,潘文庆,等. 塔里木盆地地下古生界白云岩储集层类型及特征[J]. 海相油气地质,2009,14(4): 1-9.
- [26] 郑剑锋,沈安江,莫妮亚,等. 塔里木盆地寒武系一下奥陶统白云岩成因及识别特征[J]. 海相油气地质,2010,15(1): 6-14.
- [27] 苏中堂. 鄂尔多斯盆地古隆起周缘马家沟组白云岩成因及成岩系统研究[D]. 成都:成都理工大学,2011.
- [28] 沈安江,周进高,辛勇光,等. 四川盆地雷口坡组白云岩储集层类型及成因[J]. 海相油气地质,2008,13(4): 19-28.
- [29] ADAMS J E, RHODES M L. Dolomitization by seepage refluxion[J]. AAPG bulletin, 1960, 44(12): 1912-1920.
- [30] MCKENZIE J A, HSU K J, SCHNEIDER J E. Movement of subsurface waters under the sabkha, Abu Dhabi, UAE, and its relation to evaporative dolostone genesis[J]. SEPM special publication, 1980, 28: 11-30.
- [31] ARTHUR M A, ANDERSON T F, APLAN I R, et al. Stable isotopes in sedimentary geology[M]. Tulsa: SEPM short course, 1983: 10.
- [32] HOEFS J. Isotopic properties of selected elements[M]// Stable isotope geochemistry. Berlin Heidelberg: Springer, 1987.
- [33] BUDD D A, HAMMES U, WARD W B. Cathodoluminescence in calcite cements: new insights on Pb and Zn sensitizing, Mn activation, and Fe quenching at low trace-element concentrations[J]. Journal of sedimentary research, 2000, 70(1), 217-226.
- [34] OLIVAREZ A M, OWEN R M. The europium anomaly of seawater: implications for fluvial versus hydrothermal REE inputs to the oceans[J]. Chemical geology, 1991, 92(4): 317-328.
- [35] 胡忠贵,郑荣才,周刚,等. 川东邻水—渝北地区石炭系古岩溶储集层稀土元素地球化学特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(1): 37-44.
- [36] MISER D E, SWINNEA J S, STEINFINK H. TEM observations and X-ray crystal-structure refinement of a twinned dolomite with a modulated microstructure[J]. American Mineralogist, 1987, 72(1/2):188-193.
- [37] FAIRBRIDGE R W. The dolomite question[C]//LEBLANC R J, BREEDING J G. Regional aspects of carbonate deposition: a symposium sponsored by the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Wisconsin: George Banta Company, 1957, 5: 125-178.
- [38] MOORE C H. Carbonate reservoirs: porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. New York: Elsevier, 2001.
- [39] LUCIA F J. Carbonate reservoir characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 226.
- [40] 余敏,蒋义敏,胡安平,等. 碳酸盐岩溶蚀模拟实验技术进展及应用[J]. 海相油气地质, 2020, 25(1): 12-21.

编辑:张润合

Lithofacies paleogeography, reservoir origin and distribution of the Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin

CHEN Ya'na, ZHANG Jianyong, LI Wenzheng, PAN Liyin, SHE Min

Abstract: Based on the results of outcrop geological survey, core and slice observation, geochemical analysis, and reservoir simulation experiment, the lithofacies paleogeography, and the characteristics, origin, distribution of dolomite reservoir of the Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin are analyzed. As a result, five conclusions are drawn: (1) The Cambrian Longwangmiao Formation could be divided into upper and lower sections in the Sichuan Basin, recording the climate change from humid to arid. In addition, the carbonate distally steepened ramp sedimentary models were established. (2) The granular shoals, the developing basis of the dolomite reservoir, are mainly distributed in the shallow ramp of the upper section of the Longwangmiao Formation. (3) Moreover, the contemporaneous dissolution, controlled by the exposure surface, is a critical factor for the development of granular shoal reservoir in the Longwangmiao Formation. (4) The dissolution vugs are not only extensively distributed, but also successively developed along the contemporaneous pore zones. (5) The granular shoals are superimposed in many stages in Yanting-Anyue-Weiyuan area, which are located in the high part of paleogeomorphology and developed buried dissolution, so it is a favorable area for exploration. Moreover, the granular shoals widely distributed in the whole basin are the potential exploration targets.

Key words: carbonate ramp; granular shoal; dolomite; reservoir origin; reservoir distribution; Longwangmiao Formation; Sichuan Basin

CHEN Ya'na, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in the research and seismic prediction of carbonate reservoir. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China