

川中地区震旦系灯影组储层特征及物性影响因素

周正^{1,2,3}, 王兴志^{1,3}, 谢林^{1,3}, 莫静^{1,3}, 张杰⁴

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;

2. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054;

3. 西南石油大学天然气地质四川省重点实验室, 四川 成都 610500;

4. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710054)

摘要:以钻井资料为基础,采用宏观和微观观测相结合的方法,从岩石学特征、储集空间类型及特征以及物性特征3方面,对川中地区震旦系灯影组储层特征进行研究,同时针对该区碳酸盐岩储层特点,从沉积相、成岩作用和构造作用3方面开展储层物性影响因素分析。研究表明,灯影组储层岩石类型主要为白云岩和角砾岩,储集空间主要为次生作用形成的孔、洞和缝,储层类型为低孔低渗的裂缝—孔隙型储层。储层的物性特征受沉积相、成岩作用和构造作用的影响,沉积相是储层形成的基础,物性在滩亚相中最好,并受其分布范围控制。成岩作用则决定了储层的储集性能好坏,其中压实作用、胶结作用、充填作用和硅化作用是破坏孔隙的主要成岩作用;重结晶作用是改善储层物性的重要原因;溶蚀作用储层形成的最关键成岩作用;构造作用形成的裂缝,极大地改善了储层的渗透能力。

关键词:川中地区;灯影组;储层特征;物性;影响因素

中图分类号:TE122.2

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2014)05-0701-08

引用格式:Zhou Zheng, Wang Xingzhi, Xie Ling, *et al.* Reservoir features and physical influences of the sinian Dengying Formation(sinian) in central Sichuan, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(5): 701-708. [周正, 王兴志, 谢林, 等. 川中地区震旦系灯影组储层特征及物性影响因素[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 701-708.]

0 引言

川中地区的高石梯—磨溪构造带是一个处于四川盆地乐山—龙女寺加里东古隆起轴部东部的潜伏构造(图1),在地质历史中具有明显的继承性隆起,并长期处于古隆起轴部东高点区^[1],对震旦系的油气分布有明显的控制作用,其中震旦系灯影组地层是四川盆地有利的天然气富集带^[2],具有良好的勘探前景。因此,前人^[1-3]对此做了大量研究工作,主要是集中在沉积环境上的研究,认为晋宁运动结束后,四川盆地进入台地沉积,在灯影期主要堆积了一套以白云岩为主的地层,其中蓝绿藻十分发育。所以我们可以根据

蓝绿藻的丰度和岩性结构组分特征,从上至下将灯影组地层分为4段,即灯一段(Z_2dn_1)贫藻段、灯二段(Z_2dn_2)富藻段、灯三段(Z_2dn_3)贫藻与富泥段和灯四段(Z_2dn_4)富藻段,认为储层与藻的丰度有关,主要发育在灯二段与灯四段。

但事实上,该区的灯影组地层时代古老,成岩作用和储层特征复杂^[4-5],导致对储层特征与物性影响因素的认识还不清楚,使得对川中地区灯影组地层的油气勘探和开发还处于起步阶段。因此,本文以川中钻井所取岩心和野外剖面为主要研究对象,结合相关分析化验资料,较为详细地研究了川中地区的高石梯—磨溪构造带灯影组储层特征与物性影响

因素,希望能为该区内的下一步油气勘探部署提供有益的理论支撑。

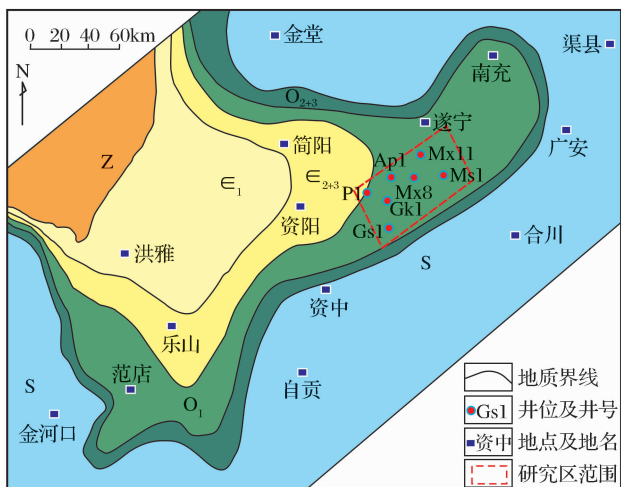


图1 石炭纪前乐山—龙女寺地区

古地质特征(据参考文献[2],修改,2004)

Fig. 1 The ancient geological map of Leshan Longnvsi area before Carboniferous (according to reference [2])

1 储层特征

1.1 岩石学特征

通过对岩心、薄片观察以及录井资料的研究,灯影组地层岩石类型主要为白云岩(砂屑白云岩、颗粒粘连白云岩、藻斑点白云岩、藻叠层白云岩、泥晶白云石、粉晶白云岩、细晶白云石)、角砾岩(风化残积角砾岩、岩溶角砾岩、岩溶假角砾岩),泥岩和硅质岩相对较少;该套地层储层的主要岩石类型为白云岩和角砾岩。

1.2 储集空间类型及特征

灯影组经历了长达6亿年左右的地质历史时期的改造和7次大的构造运动,导致其成岩环境多变,成岩作用复杂^[6-7],使得储集空间类型多样,原生孔隙大多被破坏,主要以次生形成的孔、洞和缝体系为主。各类储集空间类型特征如下:

(1)残余粒间孔与粒间溶孔:灯影组发育砂屑白云岩和由藻团块、藻屑粘连后形成的颗粒粘连白云岩。其沉积时的粒间孔和颗粒粘连格架孔极为发育,但大多被白云石胶结物或沥青充填一半充填,形成了少量残余粒间孔[图2(a)]。在准同生期的大气淡水 and 后期成岩过程中的酸性流体的作用下,颗粒间的早期胶结物或基质被溶蚀后形成粒间溶孔[图2(b)]。这2类孔隙是研究区主要储集空间类型之一。

(2)晶间孔与晶间溶孔:晶间孔主要指白云石晶

体之间的孔隙[图2(c)],在后期的成岩过程,酸性流体沿白云石晶间孔隙运移,导致部分晶间孔具有溶蚀扩大,形成晶间溶孔[图2(d)]。二者是研究区主要储集空间类型之一。

(3)洞:主要包括孔隙性溶洞、裂缝性溶洞、砾间洞和残余“葡萄花边”洞4种类型。

孔隙性溶洞[图2(e)]主要分布于晶粒较粗的白云岩中,是在晶间孔和晶间溶孔等基础上的进一步溶蚀扩大,形态多为不规则,常沿层纹方向分布,连通性较好;裂缝性溶洞[图2(f)]主要是在表生期和成岩过程中,大气淡水或地层水沿裂缝运移并发生溶解,在裂缝两侧围岩中,形成与裂缝产状近一致的拉长状、串珠状溶孔、溶洞,连通性较好;砾间洞[图2(f)]主要分布在白云质的岩溶角砾岩、风化残积角砾岩中的角砾之间,彼此之间的连通性较好;残余“葡萄花边”洞[图2(h)]在研究区内灯影组中极为发育,主要分布于白云质岩溶角砾岩和各种产状的溶沟、溶缝和溶洞中,被多圈层的“葡萄花边”纤状白云石和粒状亮晶白云石充填后的残余空间,连通性相对较差。这4种类型的洞,在研究区内灯影组中较为常见,分布较广,是研究区内储层最重要的储集空间。

(4)缝:在研究区内震旦系灯影组中较发育,可以作为一种特殊的储集空间,主要包括构造裂缝[图2(i)]和岩溶缝[图2(k)]2种类型。裂缝的存在,不仅极大改善了震旦系灯影组储层的渗透性,还具有一定的储集性能。

1.3 储层物性特征

根据研究区内768块样品分析,灯影组基质孔隙度平均为1.40%,主要分布在1%~2%之间(占53.26%),而大于5%的仅占6%(图3);渗透率也比较低,据254块样品统计,渗透率主要集中在 $(0.02 \sim 1) \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ 之间(占56.30%,图3)。反映了川中地区灯影组储层是低孔低渗型储层。但是在基质孔隙度和渗透率都很低的情况下,灯影组储层只有配合溶蚀作用和构造作用形成的孔、洞、缝,才能成为有效的储层。

通常认为,孔隙型储层的渗透率往往随着孔隙度的增大而增大,且具有良好的相关性;而裂缝型储层往往不具有相关性^[8];从研究区部分井段的岩心孔隙度与渗透率相关性分析发现(图4):大部分样品(B区)孔渗相关性不明显,其孔隙度增加而渗透率没有明显的变化,这可能是后期成岩作用产生了大量的孤立溶蚀孔洞,连通性不好,导致高孔隙低渗透。另一部分(A区)具有低孔中渗样品,可能是颗

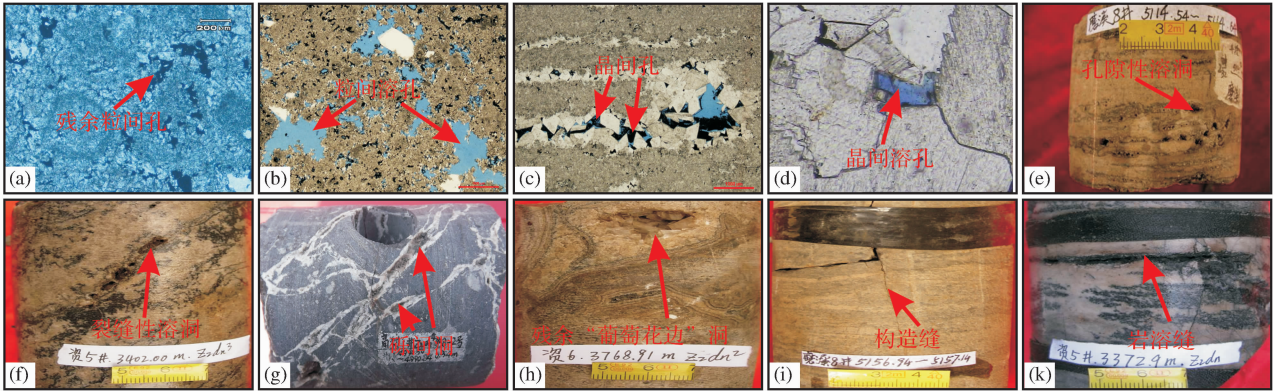


图 2 川中地区灯影组储集空间类型

Fig. 2 The reservoir space types of Dengying Formation in central Sichuan

(a)残余粒间孔,Mx8井,5 426.10m,(—);(b)粒间溶孔,Gs2井,5 395.09m,(—);(c)裂缝中充填粗晶白云石,晶体间具有晶间孔,Mx8井,5 115.18m,(—);(d)晶间溶孔,Ap1井,5 036.33m,(—),×25;(e)顺藻纹层发育孔隙性溶洞,Mx8井,5 425.72m;(f)裂缝性溶洞,Z5井,3 402.00m;(g)砾间洞,Gk1井,4 990.84m,×1;(h)残余“葡萄花边”洞,在周边出现交代作用形成的石英,Z6井,3 768.91m;(i)构造缝,Mx8井,5 156.94m;(k)岩溶缝,Z5井,3 372.90m

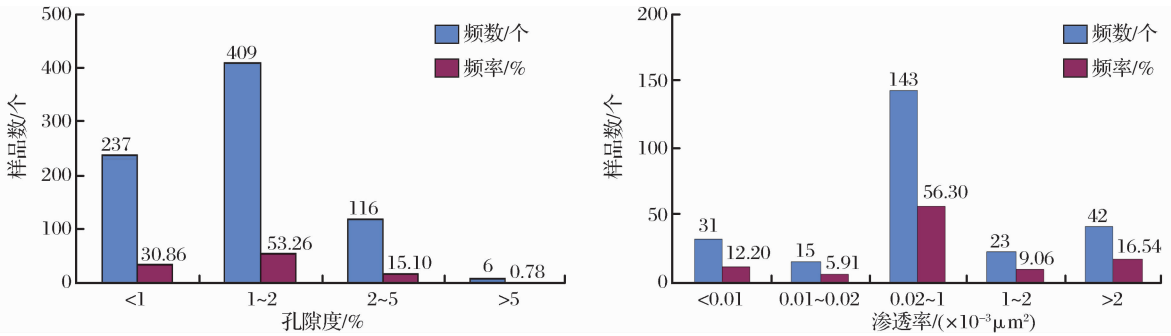


图 3 川中地区灯影组储层孔隙度与渗透率分布特征

Fig. 3 The porosity and permeability's distribution diagram of the Dengying Formation in central Sichuan

粒云岩等,裂缝很好地联通了其储集空间。孔渗间非线性的变化,表明储层发育裂缝,但具有一定的非均质性,属裂缝—孔隙储层。

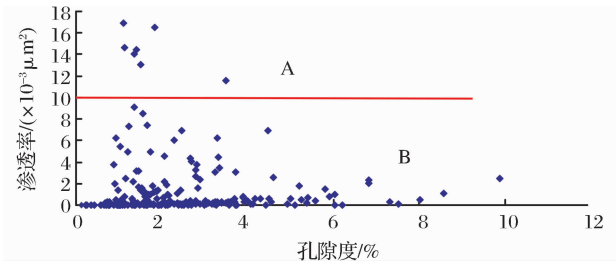


图 4 川中地区灯影组储层孔隙度与渗透率相关性分布特征

Fig. 4 Porosity permeability relationship in the Dengying Formation reservoir in central Sichuan

2 储层物性影响因素

影响灯影组储层物性的因素很多^[8-13],主要受

沉积相、成岩作用以及构造作用的影响。

2.1 沉积相影响

沉积相是储层形成的基础和先决条件,主导着岩性、岩相的分布^[13-15],是决定储层物性好坏的基础。前人^[2,4-5]的研究成果和区域地质资料研究表明,在灯影期,研究区沉积环境主要为浅水台坪,仅灯三段时处于较深水台坪环境之中。根据单井和野外沉积特征,结合台坪环境内部物理、化学条件的差异等特征,又可将研究区内灯影组储层段所处的台坪环境进一步划分为若干亚环境和微环境(表 1)。

从川中地区灯影组储层不同沉积微相中部分样品的孔隙度和渗透率分布图(图 5,表 2)中可以看出泥坪中的泥岩和硅质岩样品的平均孔隙度为0.58%,最大值为 0.79 %,最小值为 0.13%;藻坪中藻白云岩样品的平均孔隙度值为 2.19%,最大值为 5.20%,最小值为 0.87%;云坪晶粒白云岩样品平均孔隙度为 2.21%,最大值为 4.93%,最小值为 0.98 %;颗粒粘

连滩颗粒粘连白云岩样品的平均孔隙度为 6.14%，最大值为 9.89%，最小值为 2.30%；颗粒滩中的砂屑云岩与砾屑云岩样品平均孔隙度为 6.09%，最大值为 9.88%，最小值为 2.68%。因此，泥坪的孔隙度最差，滩（颗粒粘连滩、颗粒滩）中孔隙度发育最好，藻坪和云坪孔隙度发育次之，所以，川中地区灯影组储层物性主要是受滩相（颗粒粘连滩、颗粒滩）分布范围的控制。

表 1 川中地区灯影组沉积相的划分

Table 1 The division of sedimentary phase in Dengying Formation's in central Sichuan			
沉积相	亚相	微相	岩性
浅水台坪	滩	颗粒滩	砂屑云岩、砾屑云岩
		颗粒粘连滩	颗粒粘连白云岩
	坪	云坪	晶粒白云岩
		藻坪	藻白云岩
较深水台坪		泥坪	泥岩、硅质岩

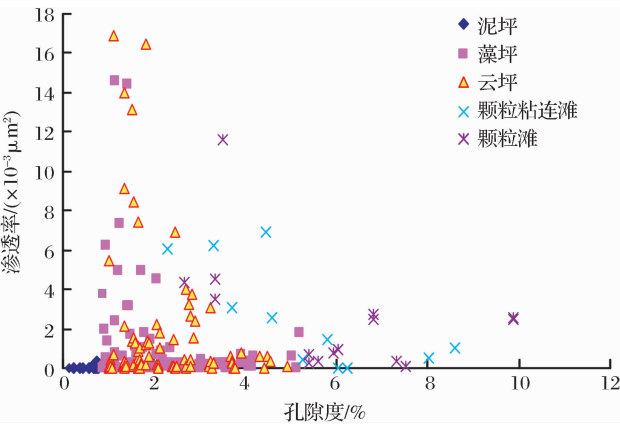


图 5 川中地区灯影组不同微相孔隙度与渗透率分布特征

Fig. 5 The porosity and permeability distribution diagram in different microfacies of Dengying Formation in central Sichuan

2.2 成岩作用影响

成岩作用起着决定储层物性好坏的关键作用，由于碳酸盐矿物具有不稳定性，导致碳酸盐沉积物对成岩作用十分敏感，在不同的成岩作用下，对震旦系灯影组储层的物性影响较大。通过对研究区白云岩成因^[16]以及薄片等资料研究表明，在灯影组白云岩储层的演化过程中，对储层物性起破坏性的成岩作用主要有压实作用、胶结作用和硅化作用等；对储层物性起建设性成岩作用为重结晶作用和溶蚀作用。

2.2.1 破坏性成岩作用

(1)压实作用是在上覆地层的负荷压力下，使沉

积物发生脱水，孔隙度降低、体积缩小、颗粒趋向紧密排列的作用，使基岩的孔隙度一般小于 2%^[8]；随着压实作用进一步加强，沉积物颗粒或晶体接触处物质溶解，即压溶作用，缝合线[图 6(a)]即是压溶作用的产物，呈锯齿状，内部多为有机质充填。压实作用是灯影组储层物性变差的主要原因。

表 2 川中地区灯影组不同微相孔隙度(单位：%)

Table 2 The porosity in different microfacies of Dengying Formation in central Sichuan(%)					
微相	泥坪	藻坪	云坪	颗粒粘连滩	颗粒滩
样品数	20	89	94	18	17
平均值	0.58	2.19	2.21	6.14	6.09
最大值	0.79	5.20	4.93	9.89	9.88
最小值	0.13	0.87	0.98	2.30	2.68

(2)胶结作用是指成岩过程中孔隙水在沉积物原始孔隙中发生物理化学和生物化学的沉淀作用，是灯影组原生孔隙基本消失的主要成岩作用之一^[8]。在灯影组储层中共有 4 期胶结作用发生^[17]，第一期是在海底成岩环境中，颗粒沉积物的粒间孔和颗粒粘连格架的“粘连格架”孔中形成纤状环边白云石[图 6(b)]和柱状环边白云石[图 6(c)]2 种类型的白云石胶结物；第二期是大气淡水成岩环境中，形成大气淡水白云石胶结物^[13]，但是由于灯影组储层原生孔隙保存极少，在研究区内很难发现这种白云石胶结物；第三期是在浅埋藏环境中，白云石胶结物主要位于早期胶结物充填后的残余原生孔隙内部，向孔隙中心依次为粉晶、细晶，局部可达中晶，成近等轴粒状镶嵌接触，具明显的充填组构特征，且晶体干净明亮，它形一半自形[图 6(d)]；第四期是在中—深埋藏环境下，形成是粗晶白云石胶结物。

(3)充填作用主要是指因温度和压力等物理化学条件的变化，导致一些组分在各种次生孔隙中发生的沉淀作用，与围岩之间没有明显化学反应和物质交换，是导致次生孔隙难于保存的主要原因。在研究区内的溶沟、溶缝和溶洞中，主要以白云石充填为主[图 2(c)]，石英充填较少。在局部，有少量的残余孔、洞和逢被油气运移过程中产生的沥青所充填[图 6(a)]。

(4)硅化作用是灯影组较为发育的交代成岩作用，经过硅化作用后的白云岩储层孔隙度远低于正常白云岩储层平均孔隙度^[13]。在研究区内常见到不同类型的石英沿着藻纹层[图 6(e)]和葡萄花边[图 2(h)]等对原始岩石成分进行交代，导致了研究

区内灯影组储层物性变差。

2.2.2 建设性成岩作用

(1)重结晶作用是改善储层物性的重要原因。在震旦世灯影期,具有原生白云石沉积而成的有利条件^[16]。同时碳、氧同位素是判断沉积环境的有力证据^[15],研究区内未经成岩改造的白云岩碳、氧同位素值为: $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-0.416\text{‰}\sim 1.503\text{‰}$,平均值为

0.329‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-8.211\text{‰}\sim -7.460\text{‰}$,平均值为 -7.747‰ (表 3,1~7 号样品)。将这些值投影于图 7 中^[16,18],正好位于海水成岩环境范围内,表明灯影组的白云石是在海水成岩环境中沉积形成的,主要形成晶粒细小的藻白云岩、微晶云岩和泥晶云岩^[16],孔隙主要为晶间微孔^[19],不是有效的储集空间。

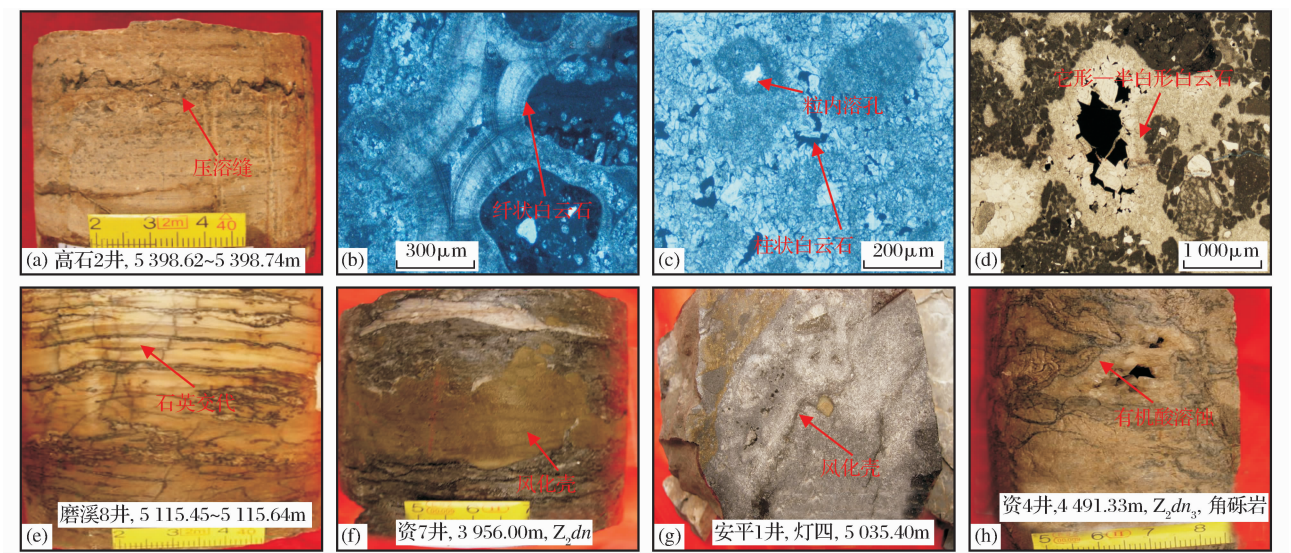


图 6 川中地区灯影组储层成岩类型

Fig. 6 The diagenetic types of Dengying Formation in central Sichuan

(a)压溶缝,充填有沥青,Gs2 井,5 398.62m;(b)纤状环边白云石,Gk1 井,5 409.33m,(—);(c)柱状环边白云石,Mx8 井,5 426.10m,(—);(d)粉晶—细晶白云石依次向孔隙中心充填,Z4 井,5 495.33m,(—);(e)沿藻纹层的硅质交代,Mx8 井,5 115.60m;(f)风化残积角砾岩,Z7 井,3 956.00m;(g)风化残积角砾岩,Ap1 井,5 035.40m;(h)有机酸沿缝溶蚀,Z4 井,4 491.33m

但是不同样品的有序度明显不同(表 3,1~7 号样品),晶粒越粗,有序度越好,这是由微晶、泥晶云岩发生重结晶作用,形成粉晶白云岩、细晶白云岩所导致的结果^[16],孔隙主要为晶间孔^[19],是有效的储集空间。重结晶作用虽未提高岩石的总孔隙度,但却改变了原岩的孔隙结构,使原来众多未连通的细小晶间微孔重新组合调整为较为粗大白云石间的晶间孔,同时,晶间孔间的喉道变得更加光滑平直,从而增加了岩石的有效孔隙度和渗透率^[19],这种提高为后期水溶液、酸性流体等的通过提供了良好的通道,为次生溶蚀孔、洞的产生奠定了基础。所以,重结晶作用提高了储层的有效孔隙度和渗透率,同时也为后期溶解作用提供了有利条件。

(2)溶蚀作用是储层形成的关键成岩作用。溶蚀作用主要是使沉积物原始沉积形态遭到破坏,形成新的溶孔、洞和缝,是灯影组储层形成最关键的成岩作用。在研究区内大致经历了同生—准同生期岩

溶作用、表生期岩溶作用和埋藏期岩溶作用 3 期溶蚀作用。

表 3 川中地区灯影组白云岩碳、氧同位素和有序度特征
Table 3 The C-O isotopes and order degree of dolomite in Dengying Formation in central Sichuan

样品编号	岩性	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	有序度
1	泥晶白云岩	-0.152	-8.211	0.502 2
2	粉晶白云岩	-0.416	-7.460	0.645 3
3	粉晶白云岩	1.503	-7.826	0.695 2
4	细粉晶白云岩	0.316	-7.560	0.705 3
5	细粉晶白云岩	0.157	-7.609	—
6	细晶白云岩	0.466	-7.885	0.868 3
7	细晶白云岩	0.447	-7.875	0.745 3
8	溶缝渗流豆(白云石)	0.090	-8.720	—
9	溶缝渗流豆(白云石)	-1.310	-9.870	—

同生—准同生期岩溶作用发生在准同生期大气水成岩环境中,以选择性溶蚀为主,受沉积相控制明

显,主要发生在滩相或藻坪相中,形成粒内孔和小型溶沟等。但是这种岩溶作用发生时间早,溶蚀规模小,沉积物处于一种塑性—半塑性状态,这些溶蚀孔、洞等大部分被后期海侵沉积物所充填,或被后期的压实作用、胶结作用等成岩作用破坏,所以同生—准同生期岩溶作用所形成的空间对于现今的储层没有直接的作用。

表生期岩溶作用发生在震旦世末,受桐湾运动的影响,灯影组地层曾两度暴露于海平面之上,受大气淡水的风化淋滤改造,发生范围广、强度较大。在研究区内,部分井灯二段顶部[图 6(f)]和灯四段顶部[图 6(g)]出现了风化残积角砾岩,由风化残积角砾岩形成的风化壳在地震反射剖面(图 8)表现十分明显,相干性差、反射杂乱、同向轴时强时弱,断续出现或存在复合波等异常特征,易于识别。

从研究区内灯影组碳、氧同位素样品分析也可以看出,在溶缝发育的 2 快样品(表 3,8 号、9 号样品), $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-0.090\text{‰} \sim -1.310\text{‰}$,平均值为 -0.61‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-8.720\text{‰} \sim -9.870\text{‰}$,平均值为 -9.295‰ ;而溶孔和溶缝不发育的基岩(表 3 中 1~7 号样品) $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-0.416\text{‰} \sim -1.503\text{‰}$,平均值为 0.329‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-8.211\text{‰} \sim -7.460\text{‰}$,平均值为 -7.747‰ ,二者相比,前者的 ^{18}O 值与 ^{13}C 值均偏负,表明灯影组孔和溶缝发育的岩性受淡水影响较大,发生了强烈的表生岩溶作用。

在表生岩溶作用过程中,形成了大量的溶孔、溶洞和溶缝,尽管在后期的成岩过程中部分被充填和改造,但被保留下来的溶孔、溶洞和溶缝是油气最有效的运移通道和储集空间,是形成储层的最主要的岩溶作用。

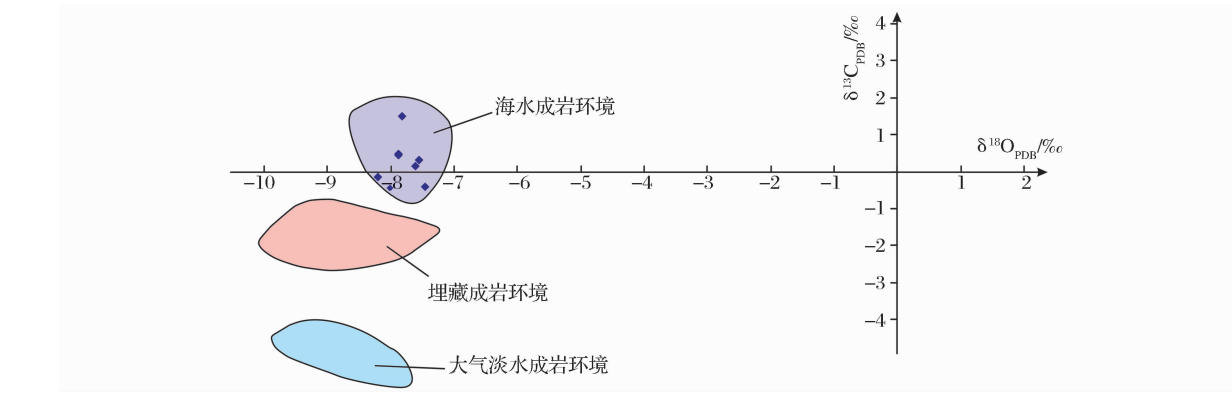


图 7 不同环境中碳酸盐岩的氧、碳同位素值(据参考文献[16,18])

Fig. 7 Oxygen and carbon isotopic values for the carbonate rocks from distinctive environments (according to reference[16,18])

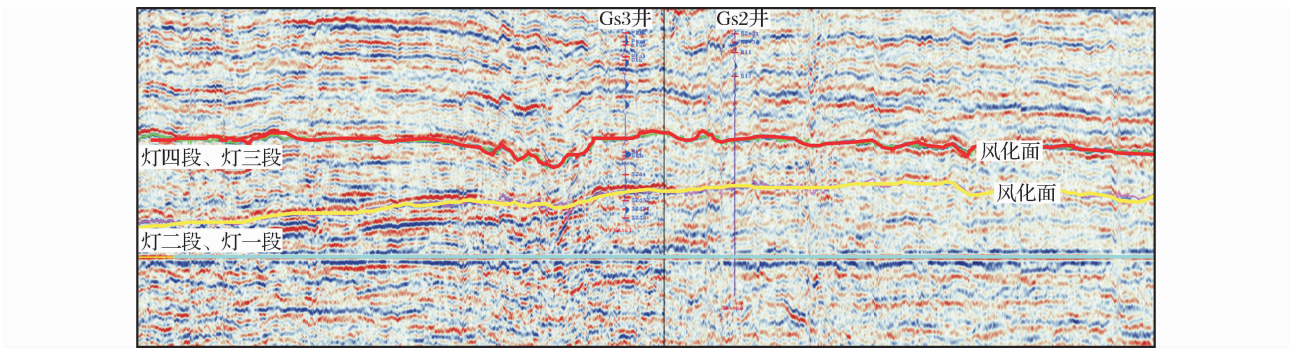


图 8 川中灯影组风化壳在地震反射剖面上的特征

Fig. 8 The weathered crust characteristic of dengying Formation on the seismic reflection profile in central Sichuan

埋藏期岩溶作用主要是在埋藏条件下,酸性流体对岩石的溶蚀作用。在研究区灯影组大致经历了 2 期埋藏期岩溶作用^[14],第一期主要发生于志留纪末至二叠纪之前,是由有机质成熟过程中产生大量

的酸性流体所产生;第二期主要发生于侏罗纪,是由油气降解过程中产生大量的酸性流体所产生。埋藏期溶蚀作用具有非构造选择性,形成的溶蚀孔洞和溶缝的规模不大,主要是对早期形成的孔、洞和缝进

行改造扩溶[图 6(h)]。通过薄片观察,研究区埋藏期溶蚀作用主要沿缝合线、裂缝和晶间孔隙等进行,形成了缝合线溶蚀孔、裂缝溶蚀孔、晶间溶孔和粒间溶孔等,能成为油气运移通道和有效储集空间,是形成储层的重要的岩溶作用。

2.3 构造作用影响

构造作用形成的裂缝是改善储层渗透性的重要因素。在研究区内,震旦系灯影组经历了多期构造运动,裂缝较为发育,类型较多。对 GS2 井、MX9 井和 GS1 井 3 口典型井约 130m 岩心的裂缝进行统计(表 4),共有 615 条,水平裂缝(与层面平行或与层面的交角<20°)有 506 条,占 82.3%;斜交裂缝(与层面的交角为 20°~70°之间)有 42 条,占 6.8%,斜交裂缝与水平裂缝大都处于半充填—全充填;垂直裂缝(与层面交角>70°)有 67 条,占 10.9%,充填程度弱。这些裂缝为后期的酸性流体、地层水和大气水的运移提供了有利通道,导致溶蚀扩大。总体来看,由构造破裂作用形成的裂缝和溶蚀扩大对储层孔隙度的贡献较小,但是裂缝之间的连通性较好,对渗透性的改善十分显著。

表 4 川中地区灯影组岩心裂缝统计(单位/条)

Table 4 The core crack's statistical table of Dengying Formation in central Sichuan(units,branches)

分段	分类			
	垂直	水平	斜交	合计
灯四段	39	10	8	57
灯三段		10	2	12
灯二段	28	486	32	546
合计	67	506	42	615
百分比/%	10.9	82.3	6.8	100

3 结论

(1)川中地区灯影组储层岩石类型主要为白云岩和角砾岩。基质孔隙度与渗透率都较低,为低孔低渗储层,储集空间主要为次生作用形成的孔、洞和缝,储集类型为裂缝—孔隙型储层。

(2)沉积作用对储层的物性起着宏观控制作用,川中地区灯影组储层物性在滩相带中最好,并受其分布范围所控制。

(3)成岩作用对灯影组物性起着决定性作用。原生孔隙在经历了压实压溶作用、胶结作用、充填作用、硅化作用等破坏性作用后,储层物性整体变差;而重结晶作用是改善储层物性的重要成岩作用,溶

蚀作用是形成储层最关键成岩作用。

(4)构造作用对储层的孔隙度贡献较小,但对渗透性的改善显著,从而改善了储层的物性特征。

参考文献(References):

[1] Hong Haitao,Bao Qiang,Zhang Guangrong. Evaluation of the favorable target areas for natural gas exploration in the Sinian and Cambrian systems in Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(14): 143-146. [洪海涛,包强,张光荣. 对四川盆地天然气资源的潜在接替层系——震旦、寒武系有利目标区块的评价[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(14): 143-146.]

[2] Zhang Lin, Wei Guoqi, Wang Zecheng, et al. Analsis of formation mechanism of sinian dengying formation in Gaoshiti-Moxi structure belt in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 584-589. [张林,魏国齐,汪泽成. 四川盆地高石梯—磨溪构造带震旦系灯影组的成藏模式[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(6): 584-589.]

[3] Zhang Shengyu, Tang Chuangmu. Regional geology conditions of Dengying Formation(Sinian) in Sichuan Basin and its gas prospects[J]. Natural Gas Industry, 1986, 6(1): 3-9. [张声瑜,唐创墓. 四川盆地灯影组区域地质条件及含气远景[J]. 天然气工业, 1986, 6(1): 3-9.]

[4] Liu Shugen, Ma Yongsheng, Huang Wenming, et al. Densification process of Upper Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 485-496. [刘树根,马永生,黄文明,等. 四川盆地上震旦统灯影组储集层致密化过程研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 485-496.]

[5] Wang Xingzhi, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. A study of the cement in primary pores in carbonate reservoirs of Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1998, 20(3): 1-3. [王兴志,方少仙,侯方浩,等. 四川盆地灯影组储层原生孔隙内胶结物研究[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(3): 1-3.]

[6] Huang Wenming, Liu Shugen, Zhang Changjun, et al. The formation mechanisms of caity and characteristics of cements and fillings of Sinian system in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009(5): 449-461. [黄文明,刘树根,张长俊,等. 四川盆地震旦系储层孔隙形成机理与胶结充填物特征研究[J]. 石油实验地质, 2009(5): 449-461.]

[7] Wang Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian, et al. Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in southwest Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000(4): 549-554. [王兴志,穆曙光,方少仙,等. 四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J]. 沉积学报, 2000(4): 549-554.]

[8] Shi Zejing, Peng Jun, Wang Yong. Reservoir features and controlling factors of Dengying Formation in southeast Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2010, 37(1): 1-8. [施泽进,彭俊,王勇,等. 川东南地区灯影组储层特征及其控制因素研究[J],

- 成都理工大学学报:自然科学版,2010,37(1):1-8.]
- [9] Ehrenberg S N, Nadeau P H. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity permeability relationships[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89 (4): 435-445.
- [10] Tanguay L H, Friedman G M. Petrophysical characteristics and facies of carbonate reservoirs: The Red River Formation (Ordovician), Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85 (3): 491-523.
- [11] Yang Xiaoping, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, *et al.* Origin of low-permeability reservoir and distribution of favorable reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 28(4): 57-64. [杨晓萍, 赵文智, 邹才能, 等. 低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布[J]. 石油学报, 2004, 28(4): 57-64.]
- [12] Jiao Weiwei, Li Jianjiao, Tian Lei. Geological conditions of marine carbonate high-quality reservoir in China[J]. Geological Science and Technology Information. 2009, 28(6): 64-68. [焦伟伟, 李建交, 田磊. 中国海相碳酸盐岩优质储层形成的地质条件[J]. 地质科技情报, 2009, 28(6): 64-68.]
- [13] Wang Mingjian, Guo Jingxing, Sheng Shifeng, *et al.* Influence factors on petrophysical property of carbonate reservoir: A case study with Es₁ of Shang 58 fault block[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2007, 14(5): 25-31. [王明健, 国景星, 盛世锋, 等. 碳酸盐岩储层物性影响因素研究——以商 58 断块区沙一段为例[J]. 特种油气藏, 2007, 14(5): 25-31.]
- [14] Yang Jiajing. Study on Formation and Evolution of Sinian Petroleum Pools in Leshan-Longnusi Paleo-uplift, Sichuan Basin [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2002: 10-20.
- [15] Qiang Zitong. Carbonate Reservoir Geology[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2007: 46-49. [强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007: 46-49.]
- [16] Wang Shifeng, Xiang Fang. The origin of the dolostones from the Sinian Dengying Formation in the Ziyang district, Sichuan [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1999, 19(3): 21-28. [王士峰, 向芳. 资阳地区震旦系灯影组白云岩成因研究[J]. 岩相古地理, 1999, 19(3): 21-28.]
- [17] Wang Xingzhi, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, *et al.* A Study of the cement in primary pores in carbonate reservoirs of Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1998, 20(3): 1-6. [王兴志, 方少仙, 侯方浩, 等. 四川盆地灯影组储层原生孔隙内胶结物研究[J]. 西南石油学院学报, 1998, 20(3): 1-6.]
- [18] Chen Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4): 11-21. [陈荣坤. 稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用[J]. 沉积学报, 1994, 12(4): 11-21.]
- [19] Wang Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian, *et al.* Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in southwest Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18 (4): 550-554. [王兴志, 穆曙光, 方少仙, 等. 四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J]. 沉积学报, 2000, 18 (4): 550-554.]

Reservoir Features and Physical Influences of the Sinian Dengying Formation(Sinian) in Central Sichuan, China

ZHOU Zheng^{1,2,3}, WANG Xing-zhi^{1,3}, XIE Ling^{1,3}, MO Jing^{1,3}, ZHANG Jie⁴

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500 China; 2. Department of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Sichuan Province Key Laboratory of Natural Gas Geology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

4. Department of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The reservoir characteristics of Dengying Formation (Sinian) in central Sichuan Basin were studied from petrology, reservoir space types and characteristics and physical property based on drilling data, macroscopic and microscopic observation. Factors affecting physical properties were also discussed from sedimentary facies, diagenesis and tectonic movement. The rock types are mainly dolomite and breccia, the reservoir spaces are secondary pores, caves and fractures, the reservoir is fracture-pore type with low porosity and low permeability and the beach subfacies have the best physical property. Compaction, cementation, filling and silicification are the destructive diagenesis. Recrystallization and dissolution are beneficial for physical properties. Fractures formed by tectonic movement greatly improve the reservoir permeability.

Key words: The central Sichuan; Dengying Formation; Reservoir characteristic; Physical property; Factors of influence