

川西北中二叠统超深层白云岩储层孔隙结构及控制因素

杨天博^{1,2,3}, 何治亮^{3,4}, 金振奎⁵, 张军涛^{2,3}, 李双建^{2,3}

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 中国石化 石油勘探开发研究院 构造与沉积储层实验室, 北京 100083; 4. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728; 5. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249]

摘要:四川盆地西北部龙门山山前中二叠统白云岩储层埋藏深度大,经历了漫长的埋藏期成岩演化,现今仍有丰富的储集空间保存,并发现了孔隙式白云岩气藏,但白云岩储层质量的非均质性较强,不同类型的白云岩储层中储集空间的形成和保持机理还有待更深入的研究。结合物性测试、压汞实验和CT扫描,白云岩储层中可识别出3种孔喉结构类型,其中Ⅰ类孔喉配位数高、连通性较好,大孔粗喉型的孔喉组合占主导,Ⅱ类包括了大孔中喉型和中孔中喉型两套孔喉组合,孔喉非均质性强,Ⅲ类受压溶作用影响较强主要发育小孔细喉型孔喉组合。白云岩储层孔喉结构的差异性主要取决于先驱灰岩的岩石组构和后期多种成岩作用的叠加耦合。Ⅰ、Ⅱ类储层一般由多孔颗粒灰岩经白云化形成,白云化作用进行得较彻底,主要发育在平直自形-半自形白云岩中,但Ⅰ类储层比Ⅱ类储层受中晚期溶蚀作用的改造更强且过度白云化作用影响较弱;而残余结构白云岩和非平直他形白云岩由于抗压溶能力更弱和后期过度白云化作用更强因而仅能形成Ⅲ类储层。

关键词:孔隙结构;白云化作用;溶蚀作用;超深层储层;中二叠统;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pore structure and controlling factors of the ultra-deep Middle Permian dolomite reservoirs, northwestern Sichuan Basin

Yang Tianbo^{1,2,3}, He Zhiliang^{3,4}, Jin Zhenkui⁵, Zhang Juntao^{2,3}, Li Shuangjian^{2,3}

[1. College of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 5. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: The Middle Permian dolomite reservoirs in the piedmont of Longmen Mountain, northwestern Sichuan Basin, were deeply buried and experienced long-term diagenetic evolution during burial, but abundant reservoir space is still well preserved at present, and even porous dolomite gas reservoirs have been discovered in such ultra-deep reservoirs. However, these reservoirs feature high heterogeneity, and the formation and preservation mechanism of reservoir space still need further study. Three types of pore structures are recognized via physical property analysis, mercury injection porosimetry and CT scanning. Type I is dominated by large pore and coarse throat with large pore-throat coordination number and high connectivity. Type II has two sets of pore-throat combinations (larger pore-medium throat and medium pore-medium throat), and shows higher pore throat heterogeneity. Type III is characterized by small pore-fine throat combination resulting from strong pressure solution. The difference in pore-throat structures is mainly controlled by rock fabric of precursor limestone and the overprint of various kinds of diagenesis. Type I and II reservoirs, usually originating from porous grainstones, went through thorough dolomitization, and were well developed in planar, automorphic-hypautomorphic dolomites. Nevertheless, in comparison with Type II reservoirs, Type I reservoirs are stronger in modifi-

收稿日期:2019-07-29;修订日期:2019-10-28。

第一作者简介:杨天博(1993—),男,博士研究生,碳酸盐岩储层。E-mail:3006180012@cugb.edu.com。

通讯作者简介:何治亮(1963—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail:hezl.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05005);国家自然科学基金重点资助项目(U1663209);中国科学院A类战略性先导项目(XDA14010201)。

cation by burial dissolution at middle-late stages but weaker in over-dolomitization. Furthermore, relict dolomite and non-planar, xenomorphic dolomite are most likely to form Type III reservoirs due to their weaker anti-pressure-solution capacity and stronger late over-dolomitization.

Key words: pore structure, dolomitization, dissolution, ultra-deep reservoir, Middle Permian, Sichuan Basin

深层-超深层油气资源的勘探是未来研究的重点领域和发展趋势^[1-4],尤其是深层-超深层白云岩,具备形成规模性优质储层的条件^[5-9],是实现油气商业新发现的重要方向。

四川盆地西部龙门山山前带的古生界碳酸盐岩系埋藏深度大(一般>6 500 m),近年来针对该地区中二叠统的天然气勘探取得了重要进展,发现了厚层孔隙型白云岩气藏^[10-11]。但是,在气藏开发建产过程中,白云岩储层横向变化快、非均质性强等问题进一步凸显,并非所有类型的白云岩都能形成优质储层。前人的研究主要集中在沉积微相和白云化作用、溶蚀作用对储层物性影响的定性讨论上^[12-13],对不同类型白云岩储层孔隙结构差异性的成因缺乏更深入的研究。因此,为了深入认识超深层白云岩储层孔隙的形成条件和保存机制,本文对川西北不同类型的白云岩储层进行了岩石学、物性和储集特征等方面研究,开展了精细的储层描述和评价,特别是对孔隙结构进行了细致刻画,并分析讨论不同孔隙结构类型差异性的主控因素,为深层-超深层海相油气藏的下一步的勘探开发提供依据。

1 区域地质背景

研究区位于川北古中拗陷低缓带西北部(图1),构造上处于龙门山前缘褶皱冲断带与川西前陆盆地的过渡区域。晚三叠世以来,受青藏高原的隆升和龙门山逆冲推覆的影响^[14-16],区内冲断变形强烈,发育一系列北东-南西向展布的逆冲推覆体,古生界-三叠系具有强烈的褶皱和冲断变形特征,盆地内中-新生界变形较弱^[17-18]。

中二叠统沉积前,受加里东运动和云南运动的影响,四川盆地长期处于暴露剥蚀状态,形成了具有准平原化的沉积基底^[19],中二叠世初,四川盆地经历了一次广泛的海侵,开始沉积了一套浅水碳酸盐岩建造^[20-23]。根据钻井和生物地层等资料显示,川西北地区中二叠统自下而上可包括梁山组、栖霞组和茅口组(图1),梁山组与下伏的石炭系为不整合接触。其中白云岩主要发育在栖霞二段,见中-厚层状白云岩,向上过渡为斑状白云岩;在茅二段中也见有少量的斑状白

云岩分布。

2 白云岩储层的岩石学特征

宏观尺度上,根据野外露头 and 岩心观察,白云岩可分为两类:白云化较彻底的块状白云岩和白云化不彻底的斑状灰质白云岩(图2)。块状白云岩呈灰色、浅灰色,晶粒较粗,白云化彻底,基本不含灰岩残余;斑状白云岩呈灰色、深灰色,白云化不彻底,由深色白云石斑块和浅色交代残余灰岩基质组成,白云石斑块大小不一,从几厘米到二十几厘米不等。

中观尺度上,首先可按产状将白云岩(石)划分为基质白云岩和胶结物白云石,基质白云岩主要通过交代作用或重结晶作用形成^[24-25],而胶结物白云石则是以孔洞缝中充填物的形式存在;其次,可以根据原始灰岩结构的保存情况,将基质白云岩划分为两类:原始结构基本无法识别的晶粒结构白云岩(A类)和保留了部分原始结构的残余结构白云岩(B类)。

微观尺度上,根据白云石的聚集形态、晶面弯曲度和自形程度等结构特征^[24-27],可将晶粒结构的基质白云岩细分出4种微观结构类型(图3中A₁—A₄);根据原始灰质成分的含量将残余结构的基质白云岩细分出2种微观结构类型(图3中B₁—B₂);同样地,胶结物白云石也可以根据晶面弯曲程度划分为平直晶面和非平直晶面2种胶结物(图3中C₁—C₂)。

上述的块状白云岩内部主要见晶粒结构,而斑状白云岩的云斑内则主要为晶粒结构和残余结构的白云岩。

2.1 基质白云岩

1) 晶粒结构白云岩(A类)

晶粒结构白云岩主要分布于栖霞二段中、下部,在宏观上常以中厚层状或块状白云岩产出,部分白云化程度较高的云斑内部也具有晶粒结构,在野外常见“砂糖状”特征,局部见针孔状溶孔发育。微观上,晶粒结构的白云岩可细分为4小类:A₁平直晶面自形晶、A₂平直晶面半自形晶、A₃平直晶面半自形晶-非平直晶面他形晶(过渡型)和A₄非平直晶面他形晶白云岩(图3,图4)。

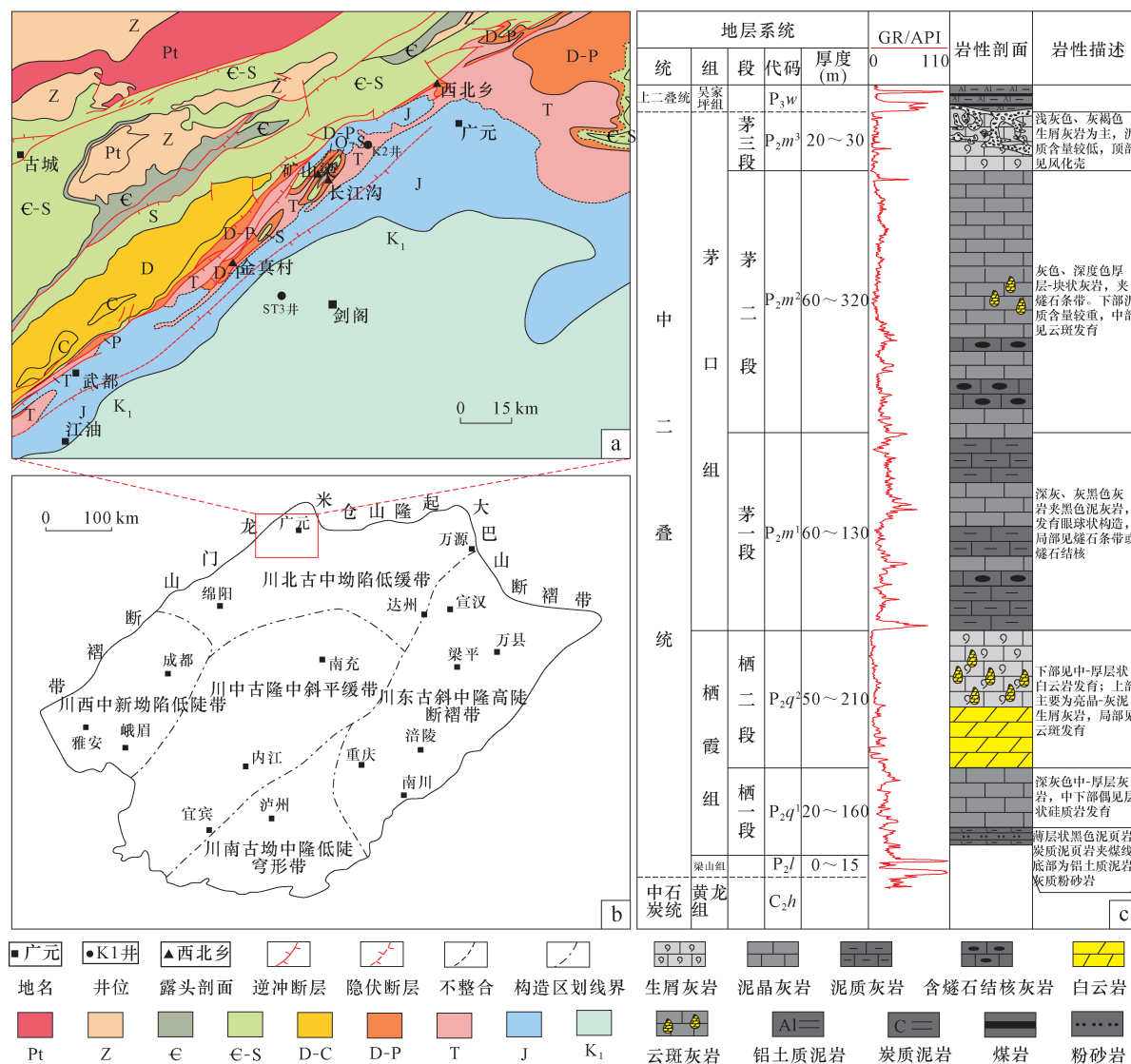


图1 川西北地区地质图及中二叠统地层综合柱状图

Fig. 1 The geological map of the northwestern Sichuan Basin, and the composite stratigraphic column of the Middle Permian
a. 川西北地区地质图 (据文献[18]修改); b. 四川盆地构造区划图及研究区位置; c. 川西北中二叠统地层综合柱状图

其中, A₁ 平直晶面自形晶和 A₂ 平直晶面半自形晶白云岩的晶粒大小一般为中-粗晶, 白云石晶粒常呈菱形并具有明显的雾心亮边结构, 靠近孔隙周缘的白云石自形程度更好, 孔隙中还常见有沥青充填 (图 4a, b); A₃ 平直晶面半自形晶-非平直晶面他形晶 (过渡型) 白云岩孔隙度通常低于前两种类型, 晶粒大小从细晶至粗晶都可见, 局部可见白云石过度生长堵塞孔隙的现象 (图 4c); A₄ 非平直晶面他形晶类型的白云岩通常较为致密, 孔隙不发育, 晶粒大小一般为细晶, 重结晶强烈, 偶见伴有缝合线发育 (图 4d), 孔隙极不发育。

2) 残余结构白云岩 (B 类)

残余结构白云岩主要分布于栖霞二段中上部, 零星见于茅口组, 主要出现在斑状灰质白云岩中, 常呈“豹斑状”产出。微观上, 残余结构白云岩可细分为两类:

B₁ 残余灰质白云岩和 B₂ 残余痕迹白云岩 (图 4e, f)。

在残余灰质白云岩内, 原生的灰岩残余结构占 10%~50%, 白云石含量在 50%~90%。白云石通常聚集成直径几厘米至二十几厘米的不规则斑状形态, 云斑内部的白云石晶粒大小常为中-细晶, 呈非平直半自形-他形; 同时常可见一定量的灰质残余, 多见腕足、苔藓虫、有孔虫等灰质生物碎屑 (图 4e), 在灰质含量较高时还可以分辨出原始石灰岩的结构类型。

在残余痕迹白云岩中, 白云石含量占绝对主导, 一般大于 90%, 灰质成分较少, 含量小于 10%。白云石晶粒大小常为中-细晶, 晶面不平直, 半自形-他形, 虽然此类白云岩中白云石含量较高, 但是在岩石中还常可辨认出一些已被白云化却仍可辨认出原始生屑的幻影结构 (图 4f)。

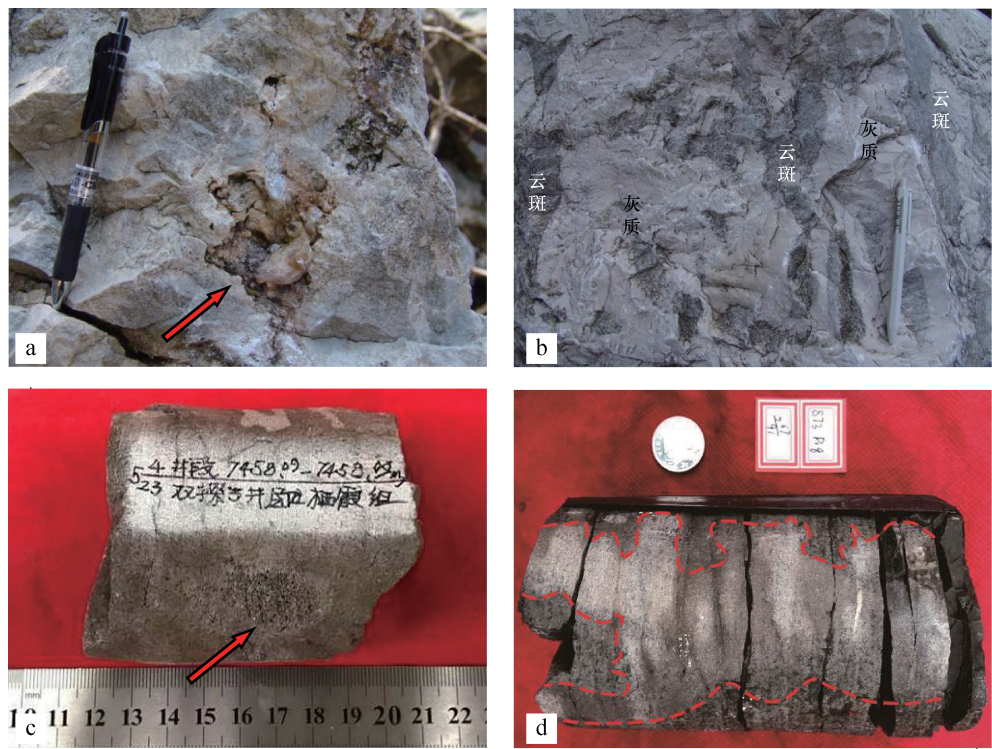


图 2 川西北中二叠统白云岩产状类型

Fig. 2 Occurrence classification of the Middle Permian dolomites, northwestern Sichuan Basin

a. 浅灰色块状白云岩,呈砂糖状,发育方解石充填的溶蚀孔洞(红色箭头所指),广元长江沟剖面,栖霞二段;b. 灰色斑状白云岩,云斑为深灰色呈不规则拉长状,广元长江沟剖面,栖霞二段;c. 灰色砂糖状白云岩,局部针孔状溶孔发育(红色箭头所指),ST3 井,栖霞二段,埋深 7 458 m;d. 灰黑色云斑灰岩,云斑呈“树枝状”展布,ST3 井,栖霞二段,埋深 7 437 m

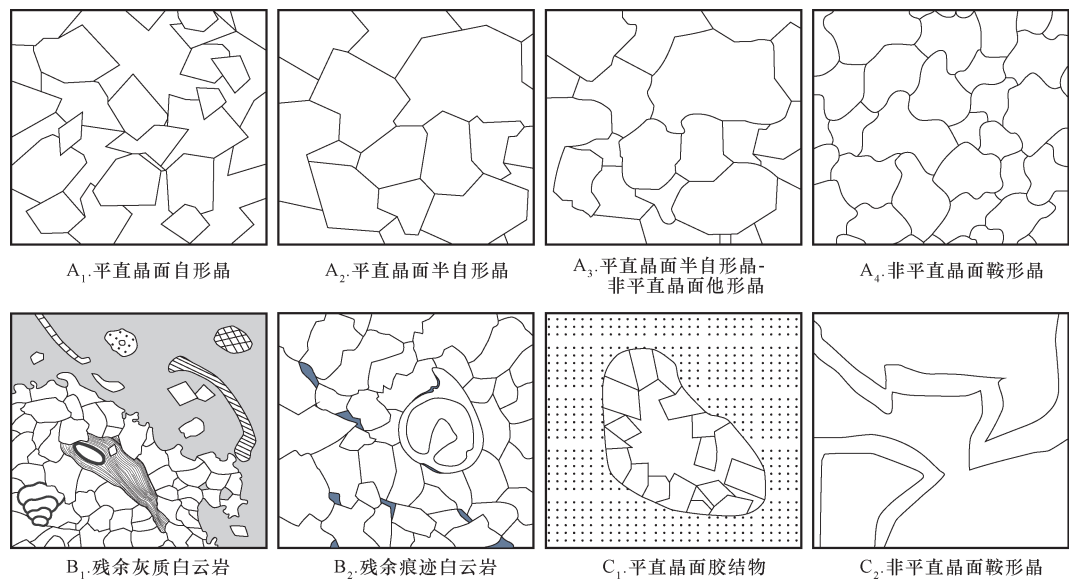


图 3 川西北中二叠统基质白云岩和胶结物白云石结构类型(据文献[24]修改)

Fig. 3 Textural classification of matrix and cement dolomites of the Middle Permian, northwestern Sichuan Basin (modified after reference[24])

2.2 胶结物白云石

孔洞充填的白云石一般以孔洞缝内的胶结物形式

出现,按照其晶体形态可分为 C₁ 平直晶面的白云石胶结物和 C₂ 非平直晶面的鞍状白云石胶结物(图 4g,i)。平直晶面的白云石胶结物在研究区并不常见,一

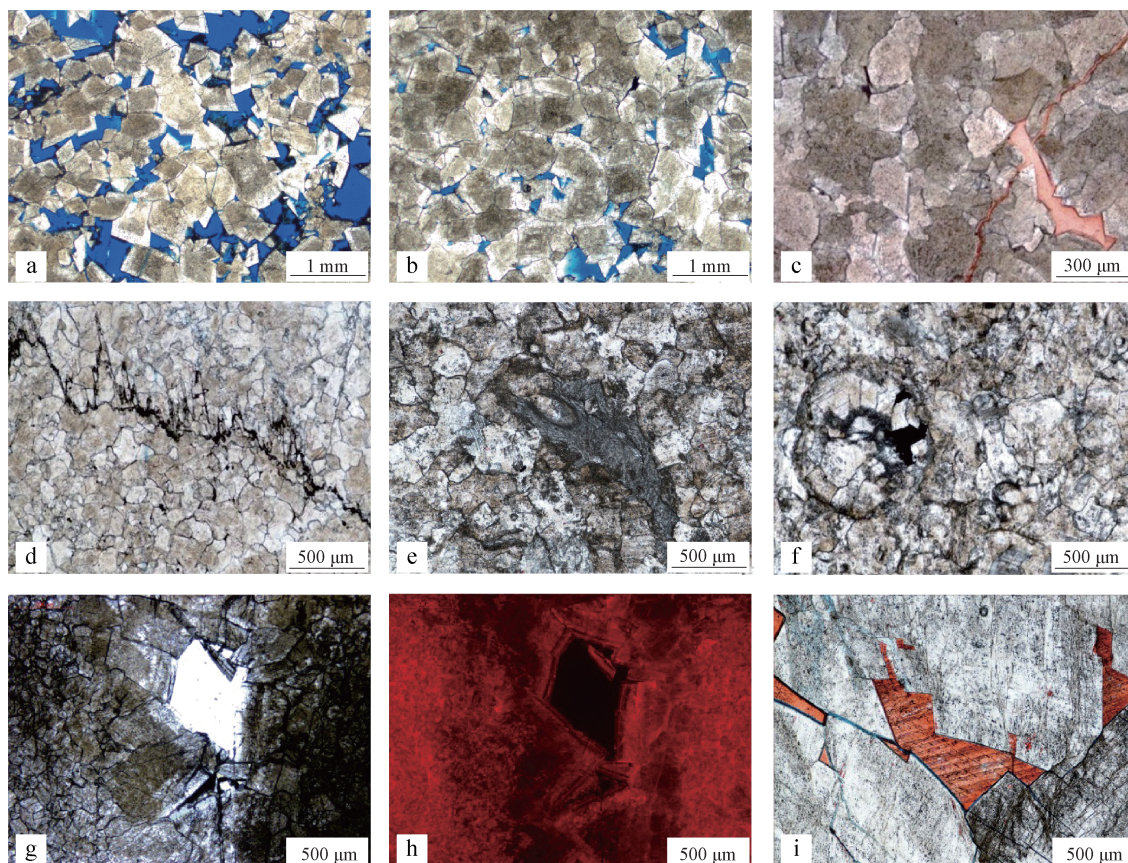


图4 川西北中二叠统不同微观结构类型白云岩镜下照片

Fig. 4 Microscopic characteristics of the Middle Permian dolomites with different textures, northwestern Sichuan Basin

a. 平直晶面自形中-粗晶白云岩,雾心亮边结构明显,孔隙中常见沥青充填,单偏光,蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.6 m;b. 平直晶面半自形中-粗晶白云岩,雾心亮边结构明显,单偏光,蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.9 m;c. 平直晶面半自形-非平直晶面他形中-细晶白云岩,单偏光,茜素红染色,栖霞二段,广元长江沟剖面;d. 非平直晶面他形细晶白云岩,伴有缝合线发育,单偏光,蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 460.1 m;e. 残余生屑白云岩,在云斑内仍可见灰质苔藓虫生屑,单偏光,栖霞二段,ST3井,埋深7 430.7 m;f. 具有腹足类生屑幻影的白云岩,单偏光,栖霞二段,ST3井,埋深7 430.9 m;g. 溶洞中充填的平直自形-半自形中-粗晶白云石胶结物,晶粒直径明显大于基质白云岩,单偏光,栖霞二段,ST3井,埋深7 449.1 m;h. 图g的阴极发光图像,白云石胶结物具有明显的环带结构,且其发光性明显暗于周围的细晶白云岩基质;i. 裂缝中充填的鞍状白云石胶结物,晶面弯曲呈镰刀状,单偏光,茜素红染色,栖霞二段,ST3井,埋深7 441.0 m

般充填在直径大于2 mm的溶洞之中,白云石晶体自形-半自形,一般具有平直晶面,内部还常可见环带生长结构(图4g,h)

非平直晶面的鞍状白云石在整个栖霞二段及茅口组部分层位都有分布,晶体通常较粗大,在岩心上呈乳白色,晶面弯曲程度较大,常可见镰刀状或阶梯状(图4i),正交偏光下具有波状消光特征,内部包裹体均一化温度较高,一般认为具有热液成因性质^[28],但也可能是压溶、热硫酸盐还原等作用的产物^[29]。

3 白云岩储层的孔喉类型及特征

3.1 孔隙类型及特征

研究区中二叠统栖霞组碳酸盐岩储层中原生孔隙

不发育,几乎全部为次生孔隙,且主要发育在晶粒结构白云岩中,残余结构白云岩中孔隙较少。储集空间主要为晶间孔和基质溶孔及溶洞,同时也发育少量晶内溶孔、微裂缝、溶蚀扩大缝等。

1) 晶间孔

白云石晶体之间的孔隙,伴随着白云化作用形成,孔隙直径一般在0.001~1 mm,孔隙形态常呈多面体状,在晶粒结构的白云岩中,尤其是具有平直自形-半自形结构的白云岩中,晶间孔较为发育(图5a,b),孔隙的形态、大小和白云石晶粒的大小、自形程度等特征密切相关。

2) 基质溶孔和溶洞

指在基质白云岩中经溶蚀作用形成的孔隙,具有非组构选择性。因后期溶蚀扩大作用的程度不同,孔径范围变化较大,溶孔孔径一般0.5~2 mm,而溶洞直

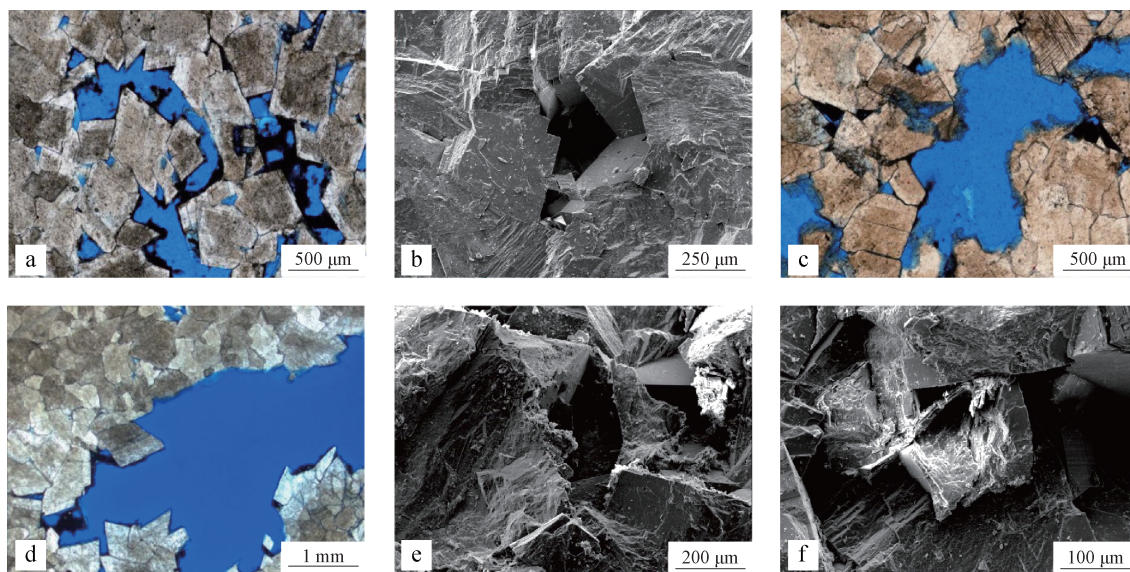


图5 川西北中二叠统白云岩储层孔隙类型

Fig. 5 Pore types of the Middle Permian dolomite reservoirs in the northwestern Sichuan Basin

a. 晶间孔,孔隙中见沥青充填,单偏光,蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.7 m;b. 晶间孔,孔隙周缘的白云石常具有平直晶面,且自形程度较好,SEM照片,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.1 m;c. 基质溶孔,孔隙周围可见溶蚀痕迹,单偏光,蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 457.7 m;d. 基质溶孔,孔隙周围可见溶蚀痕迹,单偏光,蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 449.2 m;e. 基质溶孔,孔隙周缘的白云石被溶蚀残缺不全,SEM照片,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.7 m;f. 晶内溶孔,发育在白云石晶体内部,呈内凹的中空状,SEM照片,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.1 m

径一般大于2 mm,在岩心、露头上也发现有已被充填的厘米、分米级溶洞(图2a),其显著特征就是孔隙周围可见明显的溶蚀痕迹(图5c,d),多出现于中-粗晶基质白云岩中,扫描电镜下也可见孔隙周缘的白云石被溶蚀成不规则状(图5e)。

3) 晶内溶孔

白云石晶体内部遭受溶蚀形成的孔隙,较少见,具有构造选择性溶蚀特征,扫描电镜下常呈中空状(图5f),可能与白云石晶体内部相对不稳定的核心组分的溶蚀有关。

3.2 喉道类型及特征

喉道是连通孔隙的狭窄部分,主流喉道的大小、形态及其与孔隙的配位关系是影响储层的渗流能力的重要因素^[30]。

结合前人对碳酸盐岩储层中喉道类型的划分方案^[30-32],研究区中二叠统白云岩储层中主要识别出了3种喉道类型:晶间隙型、构造裂缝型和孔隙缩小型(图6)。其中晶间隙型和孔隙缩小型喉道较为常见。

1) 晶间隙型

喉道形态受控于白云石晶体的形态,规则-短喉型喉道多出现在平直自形-半自形白云岩中,一般具有窄、短、平的特征(图6a,d);而在应力集中、压溶作用较强的非平直他形白云岩中则常见弯曲-曲折型喉

道(图6e)。

2) 构造裂缝型

相比于晶间隙型喉道,此类喉道较长、较宽且较平直,宽度一般在0.1 mm以下。此类喉道可连通各种零散而孤立分布的晶间孔隙,使其孔隙结构整体呈网格状分布(图6b)。

3) 孔隙缩小型

由于在大晶体的垮塌堵塞或白云石的竞争生长(胶结作用)导致孔隙空间堵塞形成的喉道,常出现在较大的溶孔和溶洞中(图6c,f)。

4 白云岩储层的储集特征

4.1 物性特征

川西北地区中二叠统栖霞组碳酸盐岩储层物性整体为低孔、中-低渗特征。岩心样品孔隙度平均为2.8%,最高可达7.6%,孔隙度整体分布频率主要在2%~5%。晶粒白云岩储层物性最好,尤以对于晶粒较粗的白云岩,储集空间以晶间孔和基质溶孔及溶洞为主,平均孔隙度为4.42%,最大可达7.59%(图7a),平均渗透率为 $1.46 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大渗透率可达 $53.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;斑状白云岩/灰质云岩物性通常较差,仅见少量的晶间孔和基质溶孔,平均孔隙度为2.62%,最大孔隙度为4.20%,渗透率通常也较低(图7b);纯灰

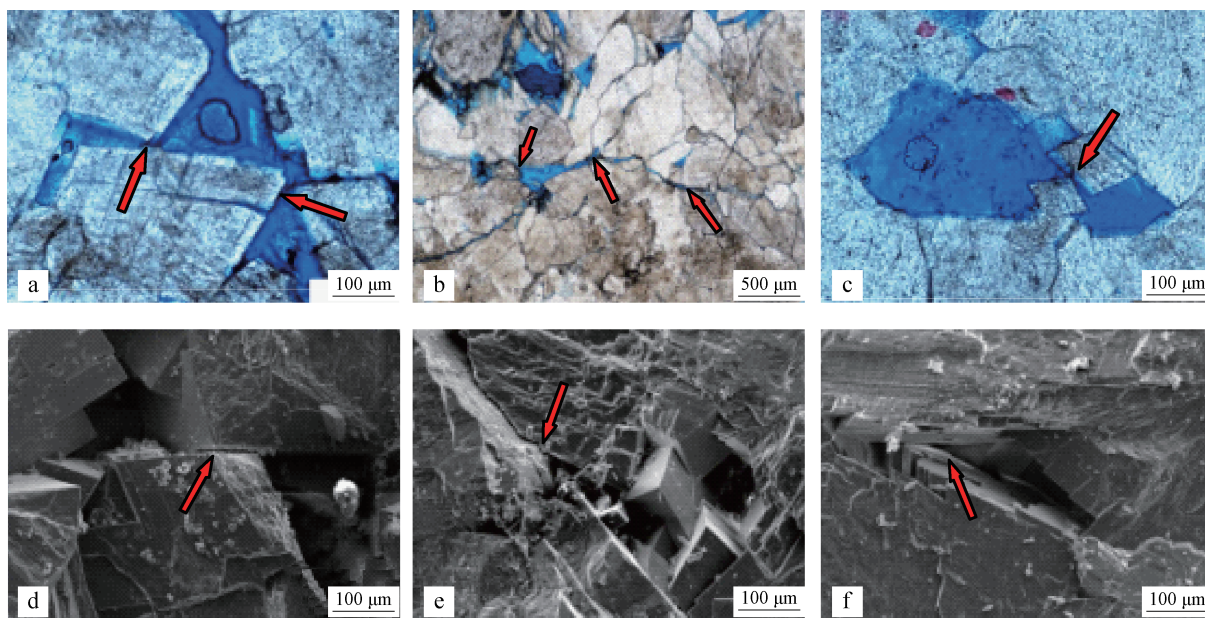


图6 川西北中二叠统白云岩储层喉道类型

Fig. 6 Throat types of the Middle Permian dolomite reservoirs, northwestern Sichuan Basin

a. 规则-短喉型喉道(红色箭头所指),蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 448.92 m; b. 构造裂缝型喉道(红色箭头所指),蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 449.10 m; c. 孔隙缩小型喉道(红色箭头所指),白云石晶体堵塞溶孔形成,蓝色铸体,栖霞二段,ST3井,埋深7 457.90 m; d. 规则-短喉型喉道(红色箭头所指),SEM照片,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.10 m; e. 弯曲-曲折型喉道(红色箭头所指),SEM照片,栖霞二段,ST3井,埋深7 458.90 m; f. 孔隙缩小型喉道(红色箭头所指),由于白云石大晶体的过度生长形成,SEM照片,栖霞二段,ST3井,埋深7 456.80 m

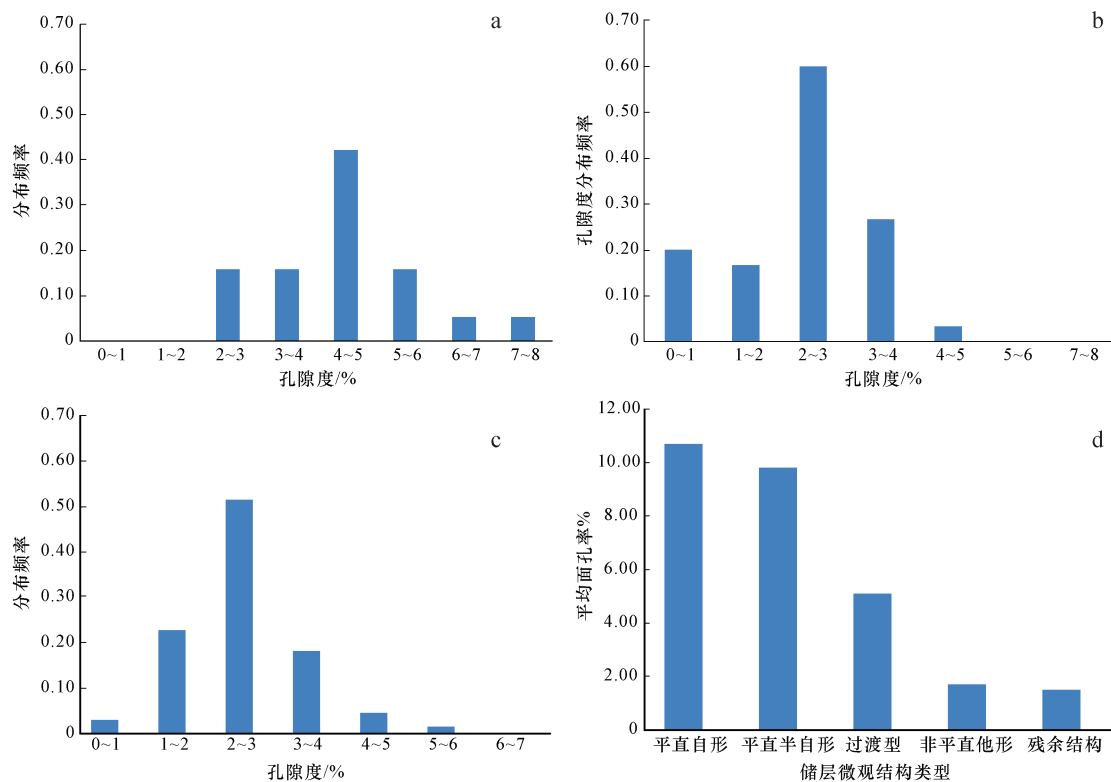


图7 川西北中二叠统栖霞组不同岩性和结构储层孔隙度/面孔率分布直方图

Fig. 7 Porosity/surface pore rate histogram of reservoirs with different lithology and textures in the Middle Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin

a. 晶粒白云岩储层孔隙度分布直方图; b. 斑状白云岩/灰质白云岩储层孔隙度分布直方图; c. 纯灰岩储层孔隙度分布直方图; e. 不同微观结构白云岩储层面孔率分布直方图

岩储层孔隙常不发育,仅见少量的粒间孔和粒间溶孔,平均孔隙度为 2.29%(图 7c),渗透率通常较低,仅在裂缝发育的储层见极高渗透率。

通过铸体薄片分析统计发现,对于不同微观结构类型的白云岩储层,其面孔率也具有显著差异。其中 A₁ 平直晶面自形晶和 A₂ 平直晶面半自形晶孔隙最为发育,平均面孔率在 7%~12%,最大面孔率可达 18%;A₃ 平直晶面半自形晶-非平直晶面他形晶(过渡型)面孔率次之,一般在 4%~8%;而 A₄ 非平直晶面他形晶白云岩相对致密孔隙较不发育,面孔率一般仅在 1%~2%;对于残余结构白云岩,不管是 B₁ 残余灰质白云岩还是 B₂ 残余痕迹白云岩,通过铸体薄片都未发现较大规模孔隙,面孔率一般低于 2%(图 7d)。

4.2 孔隙结构分类

根据川西北中二叠统白云岩储层的岩石学特征、物性分析、常规压汞和 CT 扫描测试方法,对白云岩储

层的孔隙结构特征进行综合研究,并建立了一套多参数的储层孔隙结构划分标准(表 1)。

1) I 类储层:中孔低渗大孔粗喉型

中孔低渗大孔粗喉型是物性相对最好的一类储层,常发育在具有平直晶面自形晶结构和平直晶面半自形晶结构的白云岩中,该类储层中的孔隙和喉道类型多样且组合复杂,喉道以规则-短喉型和孔隙缩小型为主,受溶蚀作用的影响,所形成的不同孔喉规模相差较大,从而造成压汞曲线上最大连通孔喉半径大、孔喉分选系数大、最大进汞饱和度高等特点(图 8a,b)。通过 CT 扫描的结果可以更直观地发现:由于溶蚀作用的影响常可见孔径较大的基质溶孔、溶洞发育,虽然这些溶孔、溶洞在总体数量上不占优势,但其所占体积较大,半径分布在 40~120 μm 的孔隙在体积频率上占绝对优势(图 8c),且其孔喉配位数高、连通性较好(图 8d,f),大孔粗喉型的孔喉组合占主导(图 8e—f);而半径较小的晶间孔虽然在孔隙数量上

表 1 川西北中二叠统白云岩储层孔隙结构类型划分

Table 1 Pore structure types of the Middle Permian dolomite reservoirs, northwestern Sichuan Basin

孔隙结构类别		I 类	II 类	III 类	IV 类
孔隙结构总体特征		中孔低渗 大孔粗喉型	中-低孔特低渗 中孔中喉型	低孔特低渗 小孔细喉型	特低孔特低渗 微孔微喉型
物性 特征	孔隙度/%	>6	4~6	2~4	<2
	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	>1.0	0.1~1.0	<0.1	<0.1
	排驱压力/MPa	<0.2	0.2~0.4	0.4~1.0	>1.0
压汞 曲线	最大连通孔喉半径/μm	>3.68	1.84~3.68	0.74~1.84	<0.74
	饱和度中值压力/MPa	<1.2	1.2~4.0	4.0~8.0	>8.0
	饱和度中值半径/μm	>0.61	0.18~0.61	0.09~0.18	<0.09
	分选系数	>2.0	1.5~2.0	<1.5	<1.5
	最大进汞饱和度/%	>75	65~75	50~65	<50
	渗透率分布峰位/μm	>1.00	0.50~1.00	0.25~0.50	<0.25
CT 扫描	CT 平均孔隙半径/μm	>80	50~80	<50	—
	CT 平均喉道半径/μm	50~80	25~50	<25	—
	平均孔喉配位数	>5	3~5	<3	—
岩性产状		块状白云岩	块状白云岩	块状白云岩、 斑状白云岩	灰岩
岩石 学特 征	微观结构类型	A1 平直晶面自形晶白云岩、A2 平直晶面半自形晶白云岩	A1 平直晶面自形晶白云岩、A2 平直晶面半自形晶白云岩、A3 过渡型白云岩	A3 过渡型白云岩、A4 非平直晶面他形晶白云岩、B 残余结构白云岩	(含)泥质灰泥生屑灰岩、(含)生屑灰泥灰岩、(含)泥质灰泥灰岩
	主要孔隙类型	晶间溶孔、 溶洞	晶间孔、 晶间溶孔	晶间孔、 晶间微孔	晶间微孔、 粒间微孔
	主要喉道类型	规则-短喉型、 孔隙缩小型	规则-短喉型、 孔隙缩小型	弯曲-曲折型、 孔隙缩小型	—
	储层分类评价	I 类储层	II 类储层	III 类储层	非储层

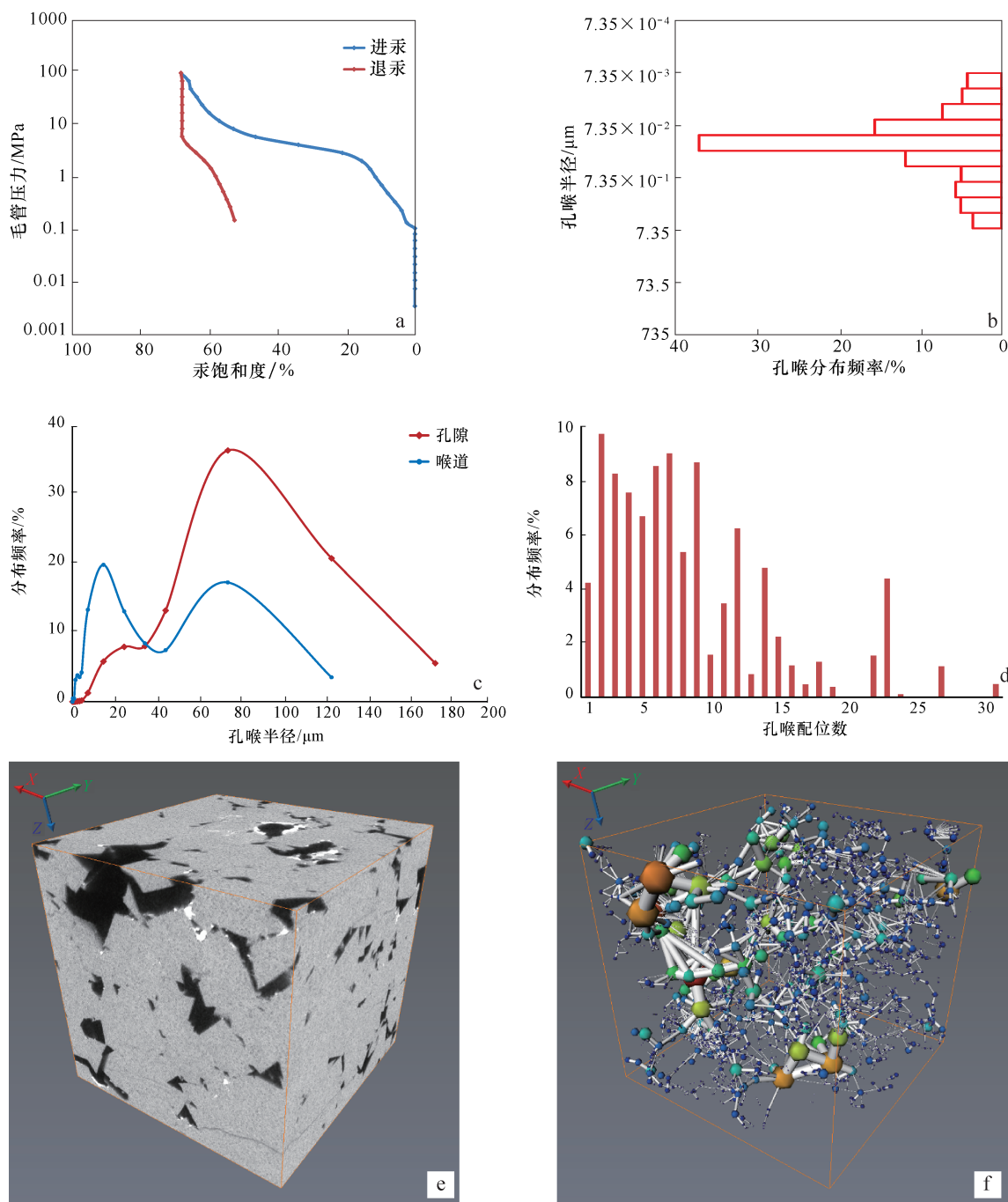


图8 川西北中二叠统 I 类储层孔隙结构特征

Fig. 8 Pore structure characteristics of Type I reservoir of the Middle Permian, northwestern Sichuan Basin

- a. I 类储层典型毛细管压力曲线; b. I 类储层孔喉半径分布频率; c. I 类储层孔喉半径分布频率(体积加权);
d. I 类储层孔喉配位数分布频率(体积加权); e. I 类储层 CT 三维灰度图; f. I 类储层 CT 三维球棍模型

占绝对优势,但其总体积不大,零散分布于大型溶孔之间,且孔喉配位数相对较低,因而对储层的储集性和渗透性都贡献不大。

2) II 类储层:中-低孔特低渗中孔中喉型

此类储层常发育在具有平直晶面自形晶结构、平直晶面半自形晶和平直晶面半自形-非平直晶面他形晶(过渡型)结构的白云岩中,所对应的储层物性一

般,相比于 I 类储层,II 类储层中溶蚀作用的影响相对较弱,总体的储集空间较 I 类储层小,孔喉组合类型同样较复杂,喉道也以规则-短喉型和孔隙缩小型为主,在压汞曲线上表现出最大连通孔喉半径稍小、最大进汞饱和度稍低、孔喉分选系数变化不大等特点(图 9a,b)。通过 CT 扫描的结果可以更直观地发现:受溶蚀作用改造形成的晶间溶孔、溶洞数量较 I 类储层明显减少

(图 9c—f), 孔隙、喉道体积分布频率出现双峰态特征(图 9c), 说明在 II 类储层中存在两套孔喉组合系统, 一套以大孔、粗喉型为主, 主要受溶蚀作用控制, 溶孔更为发育, 孔隙和喉道半径均较大, 且孔隙配位数高, 对储层的储集性和渗透性都有较大贡献, 可能在成岩历史中曾经是溶蚀性流体的主流通道(图 9c—f); 而

另一套以中孔、中喉型为主, 晶间孔更发育, 可能因为溶蚀作用的影响程度不大或是后期胶结作用更强, 微观非均质性显著。

3) III 类储层: 低孔特低渗小孔细喉型

III 类储层主要出现在致密白云岩或斑状白云岩中, 尤其是在具有非平直晶面他形晶结构或具有残余

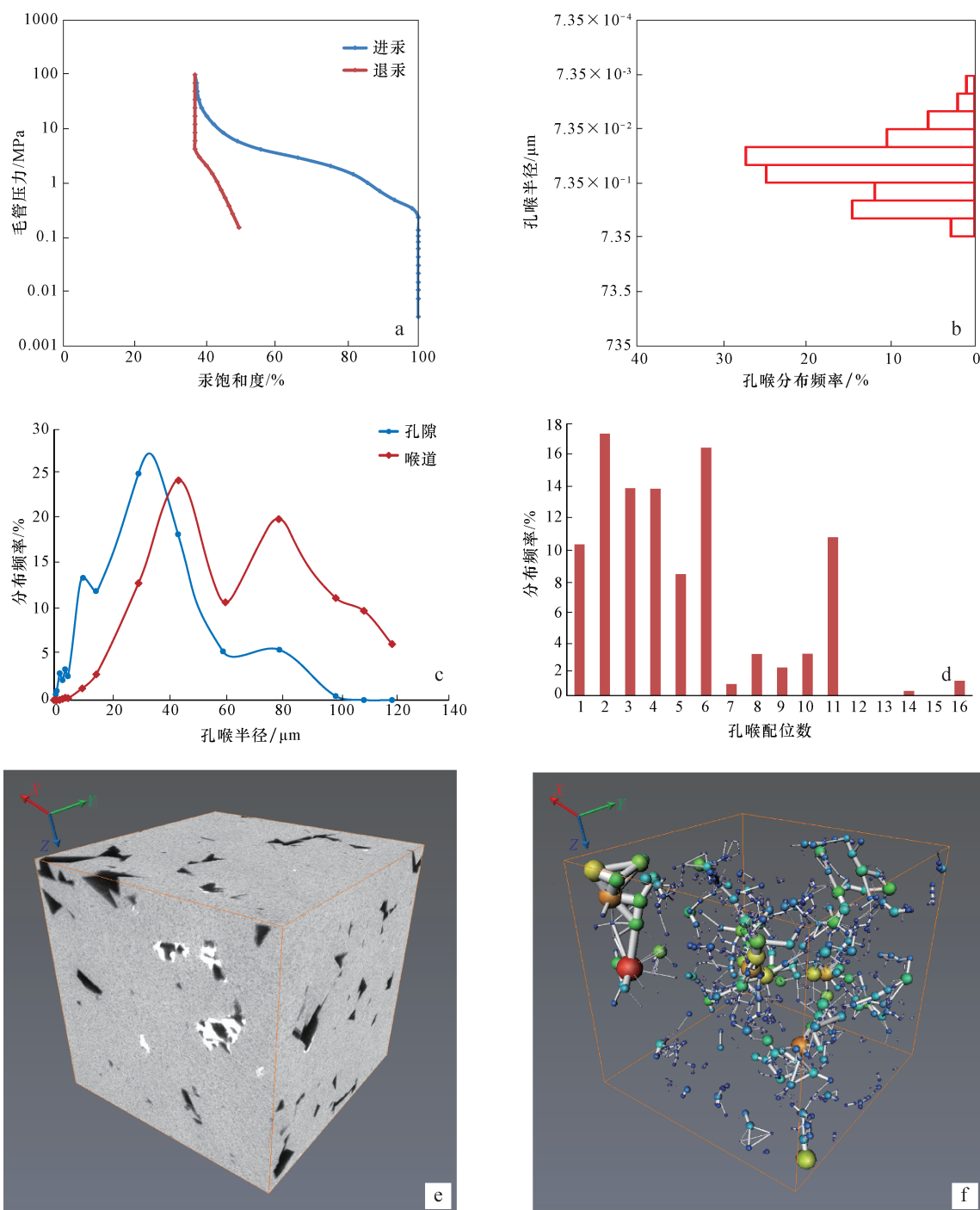


图 9 川西北中二叠统 II 类储层的孔隙结构特征

Fig. 9 Pore structure characteristics of Type II reservoir of the Middle Permian, northwestern Sichuan Basin

- a. II 类储层典型毛细管压力曲线; b. II 类储层孔喉半径分布频率; c. II 类储层孔喉半径分布频率(体积加权);
 d. II 类储层孔喉配位数分布频率(体积加权); e. II 类储层 CT 三维灰度图; f. II 类储层 CT 三维球棍模型

结构的晶粒白云岩或斑状白云岩中,储层的物性相对较差,孔隙类型主要为致密白云岩中残余的少量晶间孔和晶间微孔,或是斑状白云岩中在云斑周围与方解石基质过渡区域出现的晶间微孔,孔隙之间的喉道常为弯曲-曲折型,受压实和压溶作用的影响较大,因此该类孔隙结构储集性和渗透性均较差,其所对应的压汞曲线表现出最大连通孔喉半径小、最大进汞饱和度低、孔喉分选系数小等特点(图 10a—d)。

5 孔隙结构差异性的主控因素

如前文所述,川西北中二叠统栖霞组的优质储层主要发育在白云岩中,但不同类型的白云岩在物性特征、孔喉类型、孔隙结构等方面均表现出较大差异。造

成白云岩储层孔隙结构差异性的主控因素,一方面是先驱灰岩的岩石组构,另一方面是后期多种成岩作用的叠加耦合,特别是白云化作用和溶蚀作用方式的影响。

5.1 先驱灰岩的岩石组构

川西北栖霞组中上部主要发育相对高能的平台浅滩相沉积^[20,22],垂向上可见多套滩相颗粒灰岩和滩间泥粒灰岩的叠置组合。对于晶粒结构白云岩,前人通过对偏光显微镜下透射光的特殊处理进行原岩结构恢复,认为原岩主要为生屑灰岩和砂屑灰岩(图 11a,b)^[33];在残余结构白云岩中,常可观察到有孔虫、苔藓虫、腹足类、藻类等生物碎屑的残留或者幻影结构(图 11c),在未发生白云化的基质灰岩部分,其岩性也以颗粒灰岩和泥粒灰岩为主(图 11d),这说明颗粒滩是后期白云

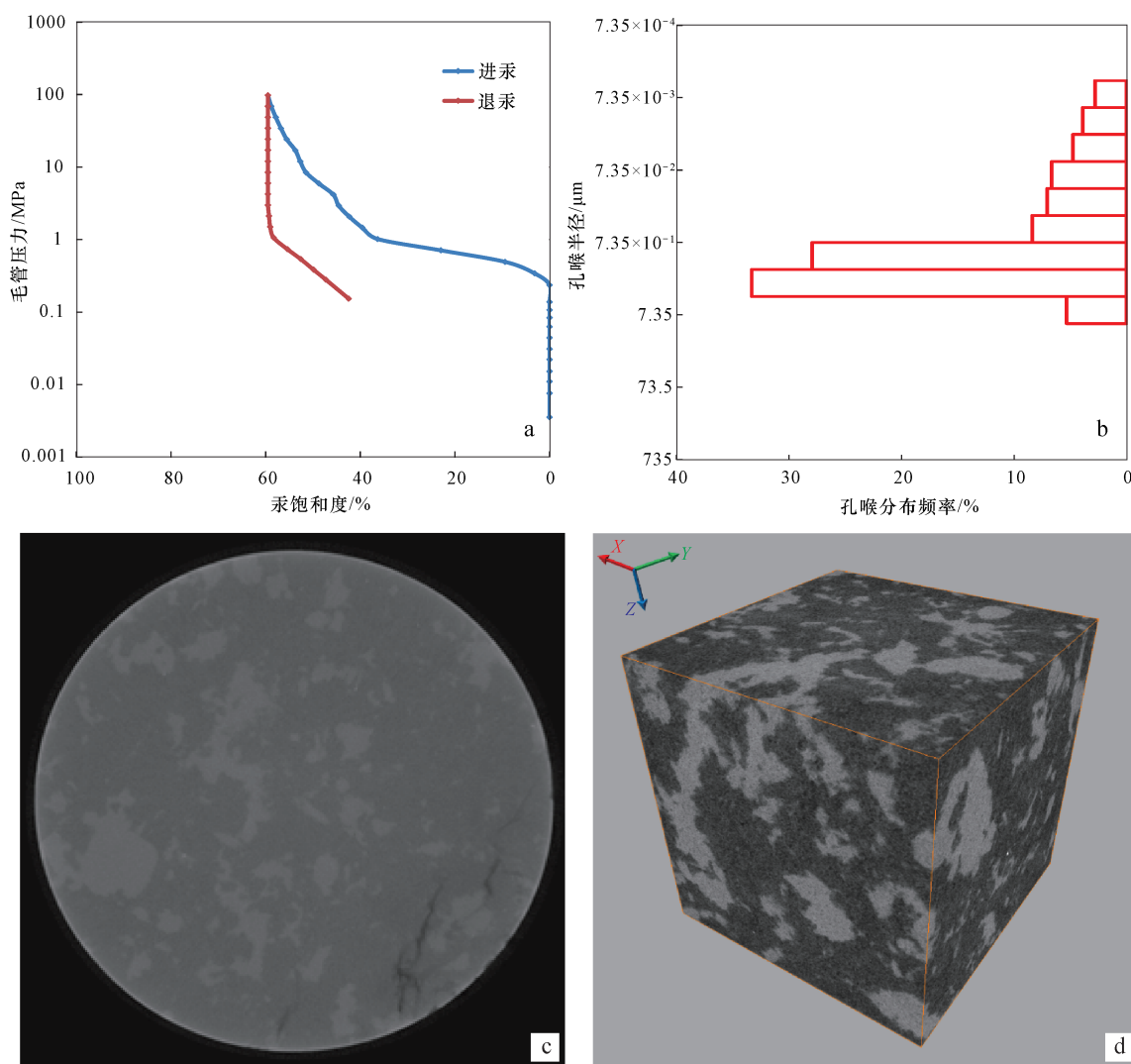


图 10 川西北中二叠统Ⅲ类储层孔隙结构特征

Fig. 10 Pore structure characteristics of Type III reservoir of the Middle Permian, northwestern Sichuan Basin

a. Ⅲ类储层典型毛细管压力曲线; b. Ⅲ类储层孔喉半径分布频率; c. Ⅲ类储层(斑状灰质白云岩)CT 二维切片;
d. Ⅲ类储层(斑状灰质白云岩)CT 三维灰度图

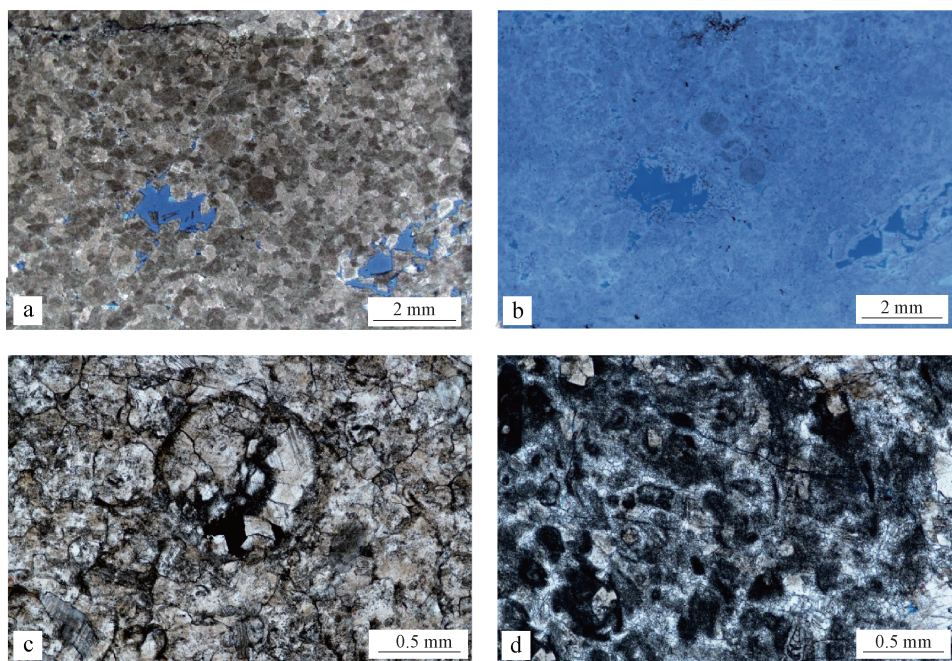


图 11 川西北中二叠统栖霞组晶粒结构、残余结构白云岩及先驱灰岩岩石组构

Fig. 11 The grain structure, remnant dolomite, and fabrics of precursor limestone in the Middle Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin

a. 细晶白云岩,晶间孔和晶间溶孔发育,栖霞组,矿2井,埋深2 423.6 m(据文献[32]);b.与图a同一视域,经原岩结构恢复技术处理,可见部分原始颗粒结构(据文献[32]);c.残余结构白云岩,可见含灰质腹足类生屑幻影,栖霞组,ST3井,埋深7 430.7 m;d.含云质颗粒灰岩,未云化部分的亮晶生屑-砂屑基质灰岩,栖霞组,ST3井,埋深7 430.7 m

化作用发生的物质基础。

但是,如前文所述,无论是晶粒结构的白云岩还是残余结构的白云岩,在储层物性、孔隙结构等方面上都表现出了较强的非均质性,先驱灰岩的岩石组构差异是造成这种非均质性的一个重要原因。

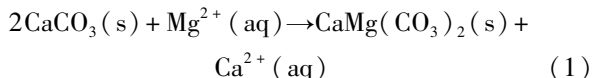
由于颗粒灰岩在早成岩阶段具有较强的抗压实能力,因而能够保存一定的原始孔隙度,为后期白云化流体的进入提供条件,原始颗粒灰岩中粒间孔、粒内孔、粒间溶孔及铸模孔在白云化作用后很可能会以晶间孔、晶间溶孔的形式在原位置继承下来。同时,颗粒灰岩中生物碎屑和内碎屑的含量及类型、早期胶结作用和准同生溶蚀作用的强弱也都是制约后期白云化作用进行、影响现今白云岩储层孔隙结构的重要因素,具有 A_1 — A_2 平直自形—半自形结构的晶粒白云岩喉连通性好、物性较优,通常是高能环境下的高孔渗颗粒灰岩经白云化作用形成的,而原始灰泥含量较高、泥晶藻类碎屑较多、泥晶套更发育的泥粒灰岩或者粒泥灰岩,包括部分早期胶结作用较强的颗粒灰岩,则更易于形成残余结构白云岩。

5.2 白云化作用的阶段性

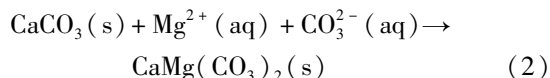
根据前人对川西中二叠统白云岩成因的研究,白

云化作用的发生和晚二叠世早期峨眉山地区幔柱隆起产生的异常热事件(距今约259 Ma)^[34-35]密不可分,当地层温度克服了白云石形成的动力学屏障后,通过海源流体的供给在浅埋藏环境下形成了大规模的白云岩^[36-37]。

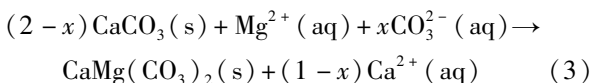
白云化作用的过程开始之后,首先在基质中形成分散的晶核,之后随着白云化流体沿着灰岩中的孔缝渗流通道源源不断的供给,晶核逐渐生长成微晶最终形成菱面体,灰岩中原始颗粒也开始被白云化流体交代,直至形成白云石菱面体的网格骨架^[38]。但是,此过程中发生的化学反应可能并非仅仅只有造成摩尔体积减小、孔隙度增加的交代反应:



在实际过程可能还存在碳酸钙同镁离子和碳酸根直接化合形成白云石同时造成孔隙度减小的反应:



所以实际的反应过程可能是介于以上两个端元的中间反应:



其中, x 的取值介于 0 ~ 1。因此, 白云化作用过程是否能产生孔隙空间主要取决于此过程中的化学反应按 (1) 和 (2) 两端元进行的程度大小^[24,39]。

对于川西北地区下二叠统的碳酸盐岩, 在不考虑后期溶蚀作用增孔的情况下, 可发现绝大部分非溶蚀性孔隙仍发育在晶粒白云岩中, 纯石灰岩和具有残余结构白云岩内很少有非溶蚀性孔隙发育。这说明了早期白云化作用的增孔效应并不明显, 甚至可能是减孔的过程^[40] (图 12a), 并且当白云化作用进行地不彻底而形成云质灰岩时, 其抗压实、压溶能力更差, 由于矿物成分、晶格结构的差异, 在云灰接触区域易形成缝合线, 反而不利于保存孔隙 (图 12b, c_2), 这便可以解释为什么斑状白云岩储层物性较差, 孔隙结构仅以Ⅲ类低孔特低渗小孔细喉型为特征, 且仅发育少量晶间孔和晶间微孔。

而对于白云化作用进行彻底的晶粒白云岩, 由于其在白云化过程中期建立起了刚性支撑的白云石菱面体网格骨架, 在开放 - 半开放成岩系统中, 菱面体间的原始石灰岩失去的支撑更易溶解垮塌, 被流体直接带出, 从而形成了多孔的白云石菱面体骨架 (图 12b, c_3), 白云石通常具有 A_1 平直自形晶结构, 由于白云石具有比方解石更强的抗压溶性和脆性, 加之白云石菱面体骨架的支撑作用, 使得在深层 - 超深层储层中白云岩的孔隙空间更够得到更好的保存且易形成裂缝, 这种

白云岩是Ⅰ类和Ⅱ类孔隙结构发育的基础。

同时, 在川西北下二叠统白云岩储层中还存在广泛的过度白云化作用, 其本质上是一种胶结作用 $[Ca^{2+}(aq) + Mg^{2+}(aq) + 2CO_3^{2-}(aq) \rightarrow CaMg(CO_3)_2(s)]$, 即当白云化作用进行得较彻底、多孔的白云石菱面体网格骨架已经建立后, 如果对白云石过饱和的白云化流体仍持续供给并沿白云岩中的孔缝流动, 便会在早期形成的 A_1 和 A_2 平直自形 - 半自形白云石晶体周缘过度生长而形成白云石胶结物, 导致原始晶间孔被堵塞、储层孔渗明显降低, 白云石的晶体形态经历了 A_1 平直自形晶 - A_2 平直半自形晶 - A_3 过渡型晶的演变过程, 晶间孔隙的形态经历了多面体孔 - 四面体孔 - 晶间缝状孔的演变过程 (图 13), 喉道也由规则 - 短喉型逐渐演变为弯曲 - 曲折型或孔隙缩小型。另外, 晚二叠世早期的局部热液活动也是造成过度白云化作用的重要原因, 热液流体一方面会沉淀鞍形白云石, 充填前期的晶间孔隙; 另一方面也会高温改造前期形成的白云岩, 使其强烈重结晶, 呈现出 A_3 过渡型、甚至 A_4 非平直他形的晶体形态。并且, 随着埋藏的加深, 在中 - 深埋藏阶段, 重结晶作用和压溶作用都会导致局部环境中白云石的溶解再沉淀, 在应力集中的区域形成缝合线, 也会使得部分前期形成的 A_1 和 A_2 类白云石晶面弯曲, 形成 A_3 和 A_4 类白云石, 造成白云岩储层质量的进一步降低。所以, 对于具有Ⅲ类孔隙结构纯白云岩储层

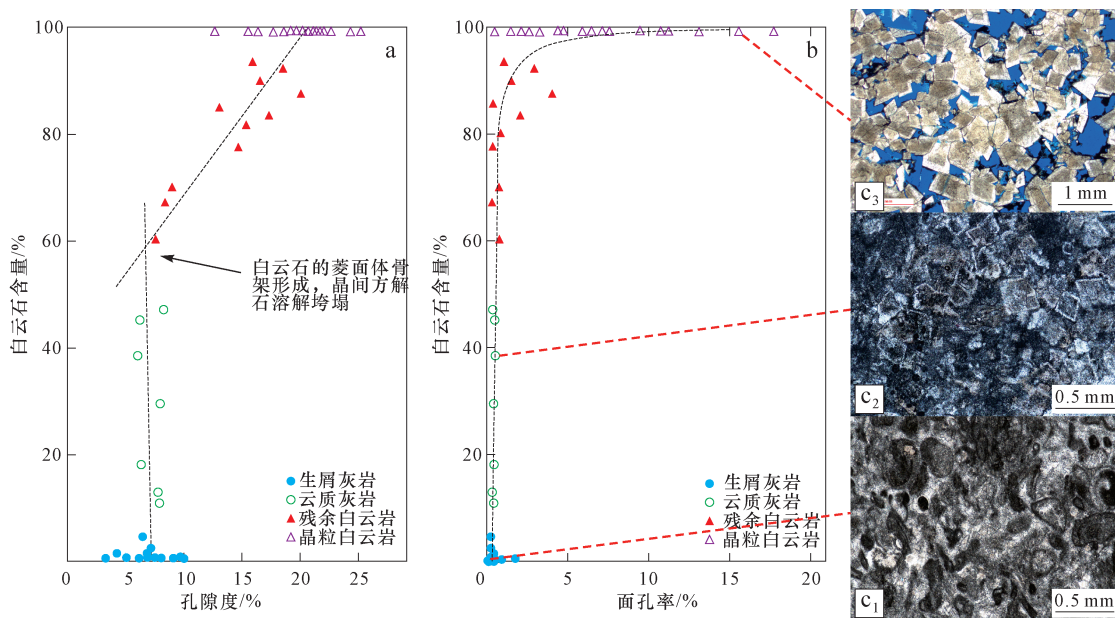


图 12 川西北地区中二叠统不同阶段白云化作用特征

Fig. 12 Dolomitization features of the Middle Permian at different stages, northwestern Sichuan Basin

a. 浅埋藏早期白云化程度与孔隙度关系 (据现今孔隙度推测); b. 现今 (深埋藏阶段) 白云化程度与面孔率关系; c_1 . 砂屑 - 生屑灰岩, 栖霞组, ST3 井, 埋深 7 458.7 m; c_2 . 云质灰岩, 菱面体骨架尚未建立, 抗压实压溶能力弱, 栖霞组, ST3 井, 埋深 7 456.8 m; c_3 . 晶粒白云岩, 菱面体骨架已建立, 抗压实压溶能力强, 栖霞组, ST3 井, 埋深 7 456.3 m

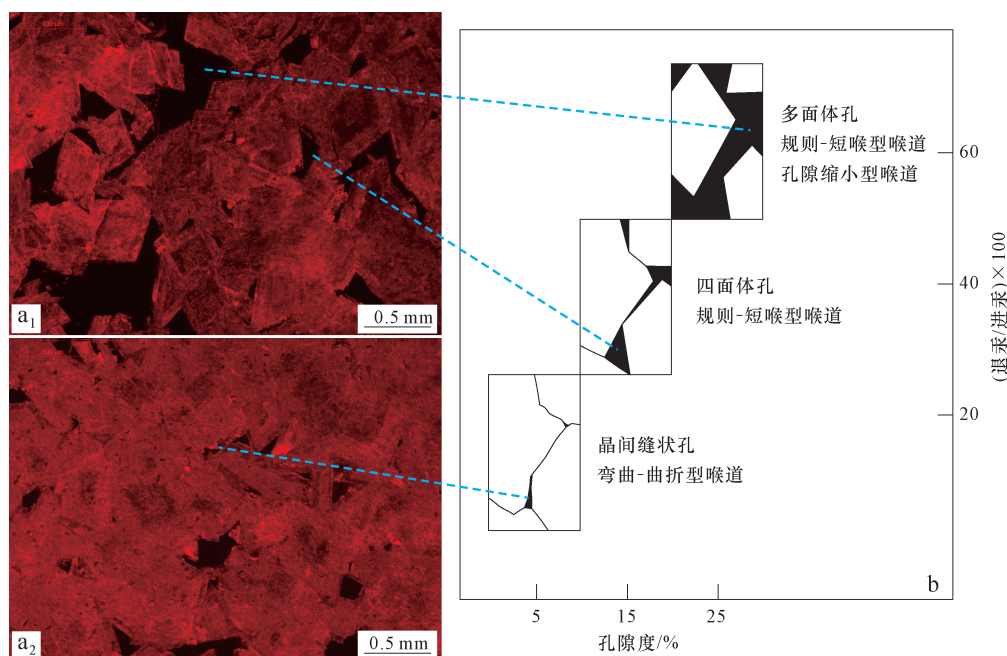


图13 川西北地区中二叠统过度白云化作用对孔隙结构的影响

Fig. 13 The impact of over-dolomitization during the Middle Permian on pore structure, northwestern Sichuan Basin

a₁. 平直晶面自形-半自形结构白云岩, 阴极发光图像; a₂. 平直晶面半自形晶-过渡型结构白云岩, 阴极发光图像;

b. 过度白云化作用对晶间孔和喉道形态的影响, 同时也造成孔隙度的持续性降低, 据文献[41]修改

的低物性和致密化, 后期的过度白云化作用是主要原因之一, 同时晚期的重结晶作用、压溶作用、热液作用以及白云石晶体形态差异等也都是导致储层质量降低的主要因素。

5.3 溶蚀作用的差异性

川西北下二叠统碳酸盐岩中可识别出准同生阶段和中-深埋藏阶段两期溶蚀作用, 这两期溶蚀作用对储层质量的影响均表现出了一定的差异性。

准同生期的溶蚀作用主要发育在近地表环境下的淡水渗流带和潜流带, 此时的溶蚀作用多具有选择性, 会对一些文石或高镁方解石质颗粒进行溶蚀。虽然现今能识别出的准同生期溶蚀孔隙、孔洞数量较少且多被后期胶结充填, 但在浅埋藏阶段白云化作用发生时推测仍有部分溶蚀孔隙(洞)尚存, 这些孔隙(洞)可为白云化流体提供通道, 有利于白云化作用的进行, 并且这些孔洞可能具有一定的继承性, 在白云化过程结束后仍有部分孔洞未被完全充填。

中-深埋藏期的溶蚀作用主要来源于有机质热演化释放的有机酸、H₂S等组分^[12-13], 而且由于埋藏较高温条件下白云岩较灰岩的易溶性^[42-43]埋藏期溶蚀主要发生在白云岩储层中。根据铸体薄片、扫描电镜和CT扫描发现, 受有机酸溶蚀作用影响的孔隙主要是一些半径较大(通常大于50 μm)的晶间孔, 溶蚀后会使得

直的白云石晶面变成不规则状、港湾状; 而当白云岩的孔喉半径小到一定范围时, 可发现这些小型的孔喉基本未受到溶蚀作用的影响或影响较弱, 因而还保留了四面体或多面体的孔隙形态, 以及平直-片状的喉道形态(规则-短喉型)。中-深埋藏期的溶蚀作用也是造成I、II类储层孔隙结构差异性的主要原因, I类储层中-大孔粗喉型的孔喉组合更为发育, 受溶蚀作用的影响更强, 同时成岩体系相对开放, 溶蚀后产物被迅速带出, 从而使白云岩的多孔骨架保留, 过度白云化作用较弱; 而II类储层发育大孔粗喉型和中孔中喉型两套孔喉组合, 说明溶蚀作用的程度有限, 同时成岩体系更封闭, 溶蚀后产物无法及时带出, 造成微区的溶蚀-沉淀过程更明显, 储层具有极强的非均质性。

6 结论

1) 川西北中二叠统宏观上主要可识别出白云化较彻底的块状白云岩和白云化不彻底的斑状白云岩两种产状类型, 中观尺度上可根据白云岩的结构-成因分类划分出晶粒结构和残余结构两种基质白云岩以及孔洞充填的胶结物白云石, 并且还可根据白云石的晶体自形程度、晶面弯曲度等特征进行更细致的微观结构类型划分。

2) 结合物性分析、压汞实验和CT扫描等测试主要可识别出3种孔隙结构类型的白云岩储层, 其中I

类中孔低渗大孔粗喉型和Ⅱ类中-低孔特低渗中孔中喉型孔隙结构主要发育在物性较好的孔隙式白云岩中,而Ⅲ类低孔特低渗小孔细喉型孔隙结构主要发育在较致密的白云岩或斑状白云岩中。

3) 栖霞组中上部台缘浅滩相沉积为后期白云岩储层的发育提供了条件,原始孔隙度较优的颗粒灰岩经白云化作用后易于形成多孔的晶粒白云岩储层,而原始灰泥含量更高、物性较差的泥粒灰岩和粒泥灰岩后期则更易于形成残余结构白云岩。

4) 白云岩储层孔隙结构的差异性还主要受控于埋藏期多种成岩作用在时空上的叠加,白云化作用不彻底形成的斑状白云岩抗压实、压溶能力弱,仅能形成Ⅲ类储层;而白云化作用彻底形成的晶粒白云岩具有菱面体骨架,抗压实、压溶能力极强,是优质储层形成的基础,但过度白云化作用会造成白云石晶体的竞争生长而堵塞孔隙,从而形成具有Ⅲ类孔隙结构的致密白云岩;Ⅰ类和Ⅱ类储层前期的白云化作用彻底,两者差别主要取决于晚期溶蚀作用的强弱。

参 考 文 献

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等. 深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式——以四川普光气田为例[J]. 地质学报, 2010, 84(08): 1087-1094.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong, et al. Formation mechanism of meep-buried carbonate reservoir and Its model of three-element controlling reservoir: A case study from the Puguang Oilfield in Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(08): 1087-1094.
- [2] 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.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 1-14.
- [3] 何治亮,金晓辉,沃玉进,等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(01): 3-14.
He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(01): 3-14.
- [4] 何治亮,张军涛,丁茜,等. 深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(04): 633-644.
He Zhiliang, Zhang Juntao, Ding Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 633-644.
- [5] Schmoker J W, Halley R B. Carbonate porosity versus depth: a predictable relation for south Florida [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(12): 2561-2570.
- [6] Sun S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186-204.
- [7] Warren J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1-3): 1-81.
- [8] Moore C H, Wade W J. Carbonate reservoirs: Porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework[M]. Newnes, 2013.
- [9] 陈代钊,钱一雄. 深层-超深层白云岩储集层: 机遇与挑战[J]. 古地理学报, 2017, 19(2): 187-196.
Chen Daizhao, Qian Yixiong. Deep or super-deep dolostone reservoirs: Opportunities and challenges[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 187-196.
- [10] 沈平,张健,宋家荣,等. 四川盆地中二叠统天然气勘探新突破的意义及有利勘探方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(07): 1-9.
Shen Ping, Zhang Jian, Song Jiarong, et al. Significance of new breakthrough in and favorable targets of gas exploration in the Middle Permian system, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(07): 1-9.
- [11] 杨光,汪华,沈浩,等. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 10-16.
Yang Guang, Wang Hua, Shen Hao, et al. Characteristics and exploration prospects of Middle Permian reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(7): 10-16.
- [12] 石新,王兴志,张帆,等. 川西北地区栖霞组白云岩储集层研究[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(2): 13-16.
Shi Xin, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. The study of dolomite reservoirs in Qixia Formation in the northwest of Sichuan Region [J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 2005, 27(2): 13-16.
- [13] 郝毅,周进高,张建勇,等. 川西北中二叠统栖霞组白云岩储层特征及控制因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2013, 33(1): 68-74.
Hao Yi, Zhou Jingao, Zhang Jianyong, et al. The dolostone reservoirs from the Middle Permian Qixia Formation in northwestern Sichuan Basin: Characteristics and controlling factors [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2013, 33(1): 68-74.
- [14] 何登发,李德生,张国伟,等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011(3): 589-606.
He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China [J]. Scientia Geologica Sinica, 2011(3): 589-606.
- [15] 贾东,陈竹新,贾承造,等. 龙门山前陆褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育[J]. 高校地质学报, 2003(03): 402-410.
Jia Dong, Chen Zhuxin, Jia Chengzao, et al. Structural features of the Longmen Shan Fold and thrust belt and development of the Western Sichuan Foreland Basin, Central China [J]. Geological Journal of China Universities, 2003(03): 402-410.
- [16] 郭正吾,邓康龄,韩永辉,等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社, 1996.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. Formation and evolution of Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Press, 1996.
- [17] 陈竹新,贾东,魏国齐,等. 龙门山北段冲断前缘构造带特征[J]. 石油学报, 2008(05): 657-662.
Chen Zhuxin, Jia Dong, Wei Guoqi, et al. Characteristics of thrust structures in the northern Longmenshan front belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008(05): 657-662.
- [18] 邓莉,刘君龙,钱玉贵,等. 川西地区龙门山前带侏罗系物源与沉积体系演化[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 380-391.
Deng Li, Liu Junlong, Qian Yugui, et al. Provenance and sedimentary system of the Jurassic successions in the front of Longmen Mountain in western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2):

- 380–391.
- [19] 李大军,陈辉,陈洪德,等. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J]. 石油与天然气地质,2016,37(05):756–763.
Li Dajun, Chen Hui, Chen Hongde, et al. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(05):756–763.
- [20] 魏国齐,杨威,朱永刚,等. 川西地区中二叠统栖霞组沉积体系[J]. 石油与天然气地质,2010,31(04):442–448.
Wei Guoqi, Yang Wei, Zhu Yonggang, et al. Depositional system of the Middle Permian Qixia Formation in the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(04):442–448.
- [21] 黎荣,胡明毅,杨威,等. 四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布[J]. 石油与天然气地质,2019,40(2):369–379.
Li Rong, Hu Mingyi, Yang Wei, et al. Sedimentary facies model and favorable reservoir distribution of the Middle Permian in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2):369–379.
- [22] 郑超,王宇峰,汤兴宇,等. 双鱼石地区栖霞组层序地层划分及沉积相分析[J]. 特种油气藏,2018,25(4):39–45.
Zheng Chao, Wang Yufeng, Tang Xingyu, et al. Sequence stratigraphic division and sedimentary facies analysis of Qixia Formation in the Shuangyushi Block[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(4):39–45.
- [23] 于海跃,尹伟,刘君龙. 龙门山山前带侏罗系近源冲积体系沉积特征与成因模式[J]. 断块油气田,2019,26(03):273–278.
Yu Haiyue, Yin Wei, Liu Junlong. Sedimentary characteristics and genetic model of Jurassic alluvial deposits in piedmont zone of Longmen Mountain[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(03):273–278.
- [24] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: a critical reappraisal[J]. Geological Society, 2004, 235(1):7–63.
- [25] 王丹,陈代钊,杨长春,等. 埋藏环境白云石结构类型[J]. 沉积学报,2010,28(01):17–25.
Wang Dan, Chen Daizhao, Yang Changchun, et al. Classification of texture in burial dolomite[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(01):17–25.
- [26] Gregg J M, Sibley D F. Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture[J]. Journal of Sedimentary Research, 1984, 54(3):908–931.
- [27] Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock textures[J]. Journal of Sedimentary Research, 1987, 57(6):967–975.
- [28] Davies G R, Smith Jr L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11):1641–1690.
- [29] Machel H G. Saddle dolomite as a by-product of chemical compaction and thermochemical sulfate reduction[J]. Geology, 1987, 15(10):1301–1306.
- [30] 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 北京:中国石油大学出版社,2009.
Ji Youliang. Oil and gas reservoir geology[M]. Beijing: China University of Petroleum Press, 2009.
- [31] 罗蛰潭. 油气储集层的孔隙结构[M]. 北京:科学出版社,1986.
Luo Zhetan. Pore structure of oil and gas reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [32] 吴元燕,徐龙,张昌明. 油气储层地质[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
Wu Yuanyan, Xu Long, Zhang Changming. Oil and gas reservoir geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [33] 胡安平,潘立银,郝毅,等. 四川盆地二叠系栖霞组、茅口组白云岩储层特征、成因和分布[J]. 海相油气地质,2018,23(02):39–52.
Hu Anping, Pan Liyin, Hao Yi, et al. Origin, characteristics and distribution of dolostone reservoir in Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin, China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(02):39–52.
- [34] 朱传庆,徐明,袁玉松,等. 峨眉山玄武岩喷发在四川盆地的地热学响应[J]. 科学通报,2010,55(6):474–482.
Zhu Chuanqing, Xu Ming, Yuan Yusong, et al. Palaeo-geothermal response and record of the effusing of Emeishan basalts in Sichuan Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(6):474–482.
- [35] Zhu C, Hu S, Qiu N, et al. Geothermal constraints on Emeishan mantle plume magmatism: paleotemperature reconstruction of the Sichuan Basin, SW China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2018, 107(1):71–88.
- [36] 黄思静,潘小强,吕杰,等. 川西栖霞组的热液白云化作用及其后的倒退溶解——不彻底的回头白云化作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(3):288–300.
Huang Sijing, Pan Xiaoqiang, Lyu Jie, et al. Hydrothermal dolomitization and subsequent retrograde dissolution in Qixia Formation, West Sichuan: A case study of incomplete and halfway-back dolomitization[J]. Journal of Chengdu University of Technology. Science & Technology Edition, 2013, 40(3):288–300.
- [37] 孟森,周进高,杨柳,等. 川西地区中二叠统栖霞组中一粗晶白云岩成因[J]. 海相油气地质,2017,22(01):75–83.
Meng Sen, Zhou Jingao, Yang Liu, et al. Genesis of medium-coarse crystalline dolomite of Middle Permian Qixia Formation, Western Sichuan[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(01):75–83.
- [38] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社,2010.
Huang Sijing. Carbonate diagenesis[M]. Beijing: Geological Press, 2010.
- [39] Machel H, Mountjoy E W. Chemistry and environments of dolomitization—A reappraisal[J]. Earth-Science Reviews, 1986, 23(3):175–222.
- [40] Murray R C. Origin of porosity in carbonate rocks[J]. Journal of Sedimentary Research, 1960, 30(1):59–84.
- [41] Wardlaw N C. Pore geometry of carbonate rocks as revealed by pore casts and capillary pressure[J]. AAPG Bulletin, 1976, 60(2):245–257.
- [42] Wierzbicki R, Dravis J J, Al-Aasm I, et al. Burial dolomitization and dissolution of Upper Jurassic Abenaki platform carbonates, Deep Panuke reservoir, Nova Scotia, Canada[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11):1843–1861.
- [43] 丁茜,何治亮,沃玉进,等. 高温高压条件下碳酸盐岩溶蚀过程控制因素[J]. 石油与天然气地质,2017,38(04):784–791.
Ding Qian, He Zhiliang, Wo Yujin, et al. Factors controlling carbonate rock dissolution under high temperature and pressure[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(04):784–791.