四川盆地天宫堂地区龙一 1 亚段页岩白云石特征及其对储层孔隙发育的影响

陈丽清[a,b*]，石学文[a,b]，钟可塑[a,b]，钟文雯[a,b]，徐亮[a,b]，陈俊杰[a,b]，吴喆[a,b]

中国石油西南油气田分公司 a. 页岩气研究院；b. 页岩气评价与开采四川省重点实验室，成都 610051

* 通信作者，E-mail：chenlq28@petrochina.com.cn

2024-05-31 收稿；2024-08-30 修回；2024-09-06 接受

基金项目：中国石油天然气集团有限公司科技项目“新区新层系有利区优选与勘探评价关键技术研究”(2023ZZ21YJ04)；中国石油西南油气田公司科研项目“加里东古隆起南缘、川东地区五峰组–龙马溪组沉积与储层展布规律研究”(20230304-09)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2026)01-0053-15　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240292

摘　要：以四川盆地天宫堂地区龙马溪组一段 1 亚段海相页岩为研究对象，通过薄片观察、X 射线衍射(X-Ray diffraction，简称 XRD)、扫描电镜、电子探针等实验，分析海相富有机质页岩中白云石类型、成因、分布规律及其对储层物性的影响。根据矿物学特征，龙马溪组页岩中识别出分散状、纹层状和聚集状 3 种类型白云石。白云石具有菱形晶型，由白云石核心和环带组成。白云石核心结晶程度低，具有高镁高钙、几乎不含铁的特征，环带的自形程度高，具有高镁高钙高铁的特征。天宫堂地区龙马溪组页岩中西北部无机孔发育程度整体高于东南部，西北部的白云石含量也高于东南部。1 小层无机孔发育程度优于 4 小层，1 小层的白云石含量远高于 4 小层。白云石环带可能形成于成岩作用早期浅埋藏阶段的甲烷厌氧氧化作用带中，核心的磨圆特征表明其可能属于碎屑来源。天宫堂地区北部白云石含量的增加有利于无机孔的发育，白云石颗粒的抗压实能力较强，能有效改善页岩储层的储集物性。研究成果对页岩气的勘探和开发有一定指导作用。

关键词：白云石；储层孔隙发育；龙马溪组页岩；天宫堂地区；四川盆地

页岩气作为一种重要的非常规天然气，具有巨大的资源潜力，其勘探开发倍受世界瞩目，因此关于页岩沉积和成岩的研究不仅持续成为沉积地质学界的热点课题，也是石油地质学界关注的焦点之一[1-3]。页岩原始沉积组分及其成岩过程中的变化是页岩气储层孔隙发育和保存的重要影响因素[4-5]。碳酸盐矿物在富有机质页岩中广泛分布[1, 6]，通常是微生物参与下沉积–成岩过程的产物，其含量不仅对储层物性具有控制作用，而且对水力压裂储层改造的实施效果产生影响[7]。碳酸盐胶结物的发育会显著降低砂岩储层的物理性质，其主要影响在于占据孔隙空间、减少孔隙度，从而导致储层质量下降[6]。因此，碳酸盐胶结物的形成及其溶解对储层物性具有控制作用[6]。富有机质页岩中的碳酸盐矿物显著影响储层的孔隙物性(孔隙度、孔隙结构等)[8]。受地区差异与成岩演化程度影响，页岩的碳酸盐含量与总孔隙度之间的相关性往往存在差异[6]。而碳酸盐矿物对孔隙结构的影响也具有差异性，例如在 Alberta Belle Fourche 和 Second White Specks 组页岩中，碳酸盐矿物的含量主要与微孔(粒径< 2 nm)呈正相关关系(相关系数 R^2=0.8)，而在 Haynesville 页岩中碳酸盐矿物的溶蚀可形成孔径较大且连通性好的孔隙网络，主要与大孔(粒径> 50 nm)密切相关[8]。早成岩阶段，碳酸盐矿物胶结会降低富有机质沉积物中的粒间孔隙，但是碳酸盐矿物格架可以有效抑制压实保留粒间孔隙(例如 Eagle Ford 页岩)[6]。在油气生成阶段，当

著录信息：陈丽清，石学文，钟可塑，等. 四川盆地天宫堂地区龙一 1 亚段页岩白云石特征及其对储层孔隙发育的影响 [J]. 地质科技通报，2026，45(1)：53-67.
CHEN Liqing, SHI Xuewen, ZHONG Kesu, et al. Characteristics of dolomite in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area of Sichuan Basin and its influence on reservoir pore development[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 53-67.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

温度达到 80 ~ 120 °C 时，干酪根的脱羧反应形成有机酸可导致碳酸盐颗粒的溶蚀[8]，从而形成粒内孔。

白云石作为一种重要的碳酸盐矿物类型在富有机质页岩中普遍发育，其质量分数介于 0 ~ 49%。白云石的形成机制多样，可由生物诱导的微生物作用生成，也可能与埋藏白云石化或孔隙热液交代过程有关[9]。在缺氧条件下，细菌硫酸盐还原及厌氧甲烷氧化等微生物过程可促进白云石的形成[9]，是早成岩阶段白云石形成的主要驱动力。王秀平等[10]认为五峰组–龙马溪组页岩铁白云石形成于中成岩阶段 B 期，其主要物质来源包括中成岩 A 期溶蚀释放的 Ca^{2+}、Fe^{2+}、Mg^{2+}等金属离子，以及羧酸脱羧反应产生的 CO_2。郭芪恒等[11]通过碳氧同位素分析认为五峰组–龙马溪组页岩中的白云岩主要形成于早成岩期的硫酸盐还原阶段及中成岩 A 期有机质脱羟阶段，而铁白云石则多生成于晚成岩期。黏土矿物在转化过程中释放的 Ca^{2+}、Fe^{2+}和 Mg^{2+}等离子，为白云石的沉淀提供了必要的物质来源。由此可见，关于白云石形成物质来源和机制还没有形成统一的认识，仍需要进一步深入开展研究。此外，封闭环境下的白云石化是一种建设性成岩作用，可促进孔隙形成并增强储层连通性，有利于烃类的聚集与运移。因此，页岩中薄层白云石通常具备较强的储集与渗透能力，是优良的页岩油气产层[8]。

四川盆地天宫堂地区龙马溪组底部页岩作为有利的开发层系，其白云石含量高，但是以往的研究大多没有考虑其成因机制及其对储层物性的影响。本研究选取天宫堂地区共 12 口井（Y205、Y202、Y206、Y203、NX202、Y201、Y209、Y207、Y208、Y212、Y215、Y214），每口井龙一 1 亚段 1 ~ 4 小层各选出 1 个代表样品，共 48 个样品，进行薄片观察、扫描电镜、能谱分析和电子探针等实验，探讨白云石特征及其成因机制，每口井选择 40 ~ 50 个样品进行全岩 X-射线衍射分析，根据实验结果划分岩相，研究天宫堂地区横向和纵向岩相分布规律，对各小层代表样品面孔率统计以及核磁共振实验，明确富有机质页岩中白云石对页岩储层孔隙发育的影响。

1　研究区概况

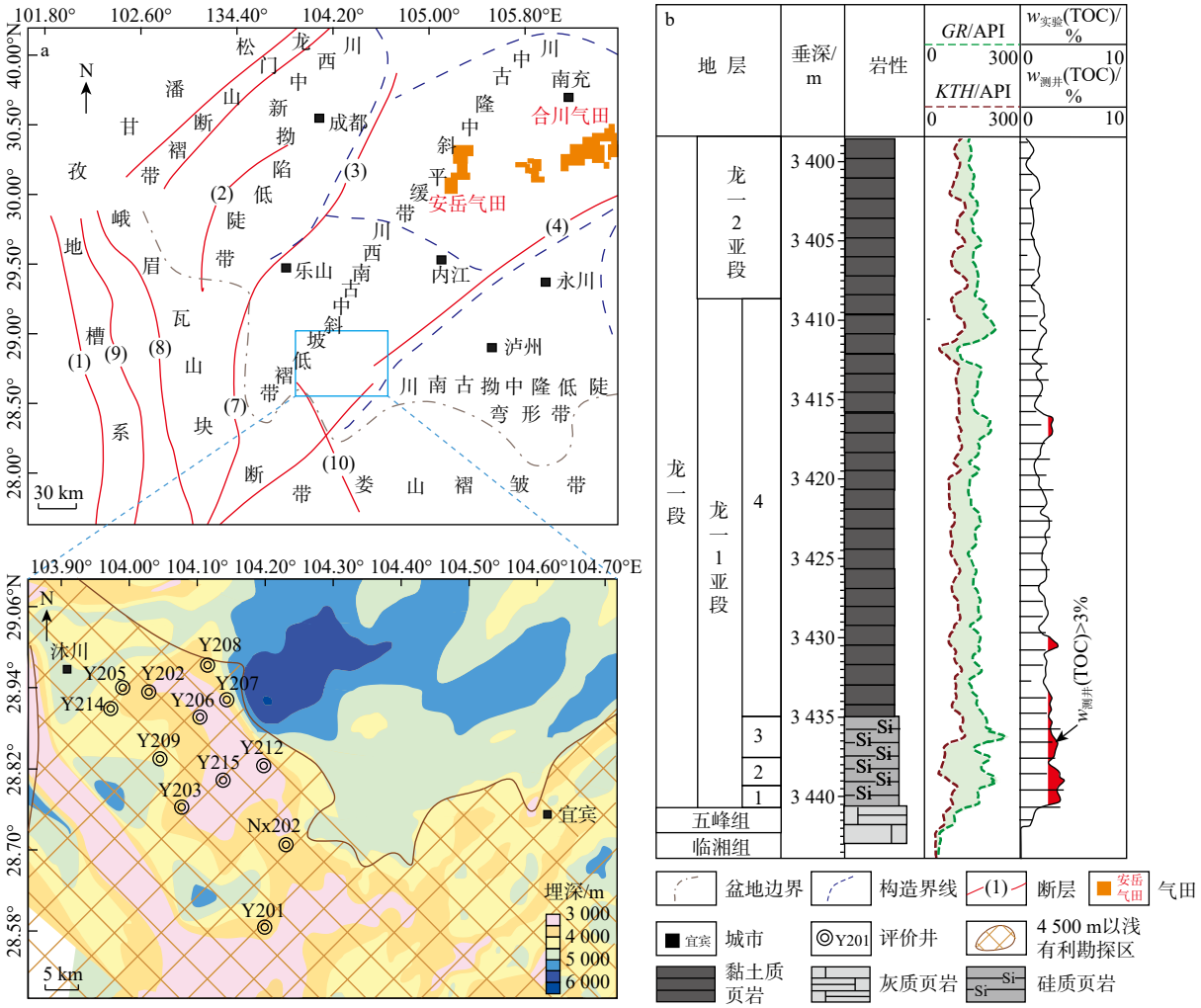
天宫堂构造地处川东南中隆高陡构造带内，其东部与泥溪、王场、大乘寺等向斜及自流井凹陷西缘的大塔场构造相邻；南侧毗邻屏山向斜；西侧与龙华寺向斜及五指山构造相对；北部与中林场–炭库场向斜相接，同麻柳场和大窝顶构造呈对应关系[12]。受多期构造抬升影响，天宫堂构造复杂，整体呈外围近菱形的箱状背斜，核部岩性以须家河组砂岩和泥岩为主，少数地区可见中三叠统雷口坡组灰岩[12]。天宫堂构造整体呈 NW 向延伸，轴部在高点以北略偏 NWW 向，西北端则趋向正西，南西翼地层倾角一般不足 10°，表现为缓坡；北东翼相对陡峭，倾角在 35° ~ 45°之间，使轴线呈反“S”形，表现为北东翼陡、南西翼缓的典型非对称背斜。北东翼被近似平行于主轴线的宫 1 号断层切割[13]。地震剖面显示，宫 1 号断层起源于寒武系，在上三叠统须家河组中逐渐尖灭，最大断距约 1 500 m。整体延伸长度约 25 ~ 27 km，倾角介于 25° ~ 60°之间，断距随埋深增加而加大，同时断裂规模自西北向东南逐渐减弱。除主断层外，构造区内还发育有 40 余条次级断层，断距均小于 100 m，主要分布于寒武系和奥陶系中，属加里东期形成的构造系统[14]（图 1）。

在奥陶系五峰组沉积时期，受广西运动的构造影响，四川盆地及其周缘地区形成了“三隆一坳”的古地貌格局[14]。在康滇古陆和周缘多个古隆起（乐山–龙女寺古隆起、黔中隆起）持续扩张的背景下，沉降中心开始逐步向中北部迁移，同时期伴随海平面显著下降，研究区沉积环境也从深水陆棚向钙质浅水陆棚过渡。到晚奥陶世末至早志留世初期，四川盆地进入了海侵作用最为强烈的阶段，形成封闭至半封闭的陆棚环境，并沉积了富含笔石的高有机质页岩[13]。综合水动力条件、岩性特征、岩石组合、颜色变化、沉积构造及古生物组合等要素，五峰组–龙马溪组的沉积体系可分为深水陆棚亚相与浅水陆棚亚相。从垂向序列看，天宫堂构造区该组沉积整体表现为深–浅水陆棚相。下部沉积环境为深水陆棚相，发育灰黑–黑色富有机质页岩，中部为浅–深水过渡陆棚相，发育灰–深灰色粉砂质页岩，上部岩性则以浅水陆棚相为主，发育一套浅灰–灰绿色页岩夹泥质粉砂岩。整体厚度约 300 ~ 450 m，与川南长宁地区建武向斜区块相比，研究区整体较厚，为页岩气富集提供了充足的物质条件[12]。根据岩石学及电性特征划分，研究区龙马溪组由下至上包括龙一段和龙二段，龙一段进一步可细分为龙一 1 亚段和龙一 2 亚段，其中龙一 1 亚段可再划分为 4 个小层（表 1）。

2　白云石矿物学特征与成因分析

2.1　白云石矿物学特征

天宫堂地区龙一 1 亚段页岩石英质量分数为



GR. 自然伽马；*KTH*. 无铀伽马；$w_{实验}$(TOC). 总有机碳质量分数实验值；$w_{测井}$(TOC). 总有机碳质量分数测井值

图 1　天宫堂地区构造位置图 (a) 和地层综合柱状图 (b)

Fig. 1　Structural location map (a) and comprehensive stratigraphic column (b) in Tiangongtang area

表 1　天宫堂地区五峰组–龙马溪组龙一 1 亚段各小层储层参数实验数据

Table 1　Test data of reservoir parameters for each small layer in the first sub-member of the First Member of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Tiangongtang area

区块	地层		地层厚度/m	*w*（TOC）/%	孔隙度/%	脆性矿物质量分数/%	含气饱和度/%
天宫堂构造	龙一2亚段		6.7 ~ 46.1 27.3	0.1 ~ 1.7 0.5	1.0 ~ 5.5 3.0	35.4 ~ 59.0 48.5	11.3 ~ 66.1 40.6
	龙一1亚段	4小层	21.3 ~ 78.9 41.6	0.1 ~ 4.6 2.3	1.0 ~ 7.4 3.9	34.0 ~ 90.0 65.7	10.6 ~ 77.9 54.0
		3小层	2.3 ~ 10.1 5.3	0.9 ~ 6.9 4.3	1.8 ~ 8.1 5.2	45.4 ~ 89.3 72.1	13.9 ~ 86.5 59.1
		2小层	2.0 ~ 13.0 5.9	1.3 ~ 6.5 4.0	1.3 ~ 7.5 4.7	38.0 ~ 99.0 84.4	7.3 ~ 90.9 65.0
		1小层	0.8 ~ 3.4 1.7	1.4 ~ 7.8 4.4	2.1 ~ 7.6 4.5	59.1 ~ 92.0 84.3	16.8 ~ 87.9 64.2
	五峰组		1.5 ~ 8.4 2.8	1.1 ~ 6.0 2.0	2.1 ~ 7.6 2.7	51.0 ~ 98.5 82.2	10.2 ~ 91.8 59.0

注：数据来源于以下井：Y205、Y202、Y206、Y203、Y201、Y209、Y207、Y208；$\frac{6.7 \sim 46.1}{27.3}$. $\frac{\text{最小值} - \text{最大值}}{\text{均值}}$

33.14% ~ 50.97%, 均值为 40.78%; 黏土矿物质量分数为 22.53% ~ 38.84%, 均值 31.41%; 方解石质量分数为 7.11% ~ 14.45%, 均值为 10.63%; 白云石质量分数为 4.47% ~ 13.29%, 均值为 8.57%(图 2)。

白云石颗粒在单偏光下无色透明, 正交光下具有高级白干涉色, 一些白云石颗粒具有雾心亮边的特征(图 3a, b)。白云石颗粒的自形程度较高, 为自形−半自形晶, 晶体形态为菱面体(图 3a, b)。扫描电镜能谱测得菱形白云石由外围的铁白云石环带和不规则形态的白云石内核组成(图 4a, c)。白云石颗粒的核心可观察到其边界的磨圆现象(图 4a, c), 扫描电镜下深色的白云石核心中还常见浅色的铁白云石

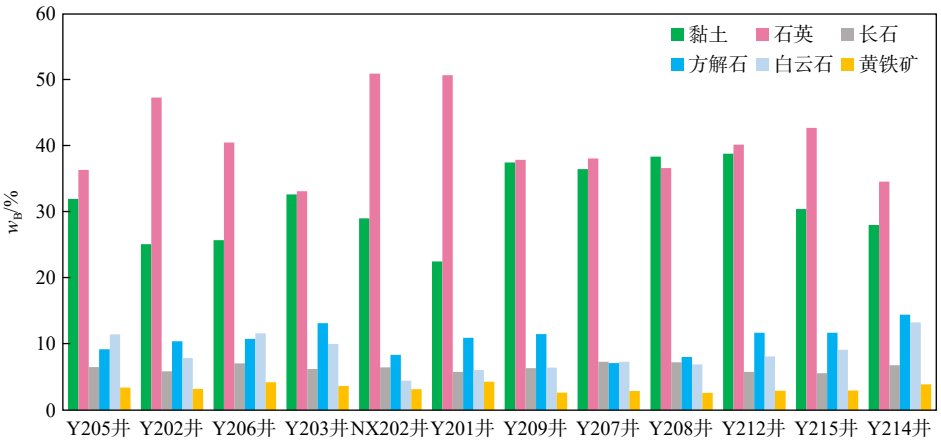
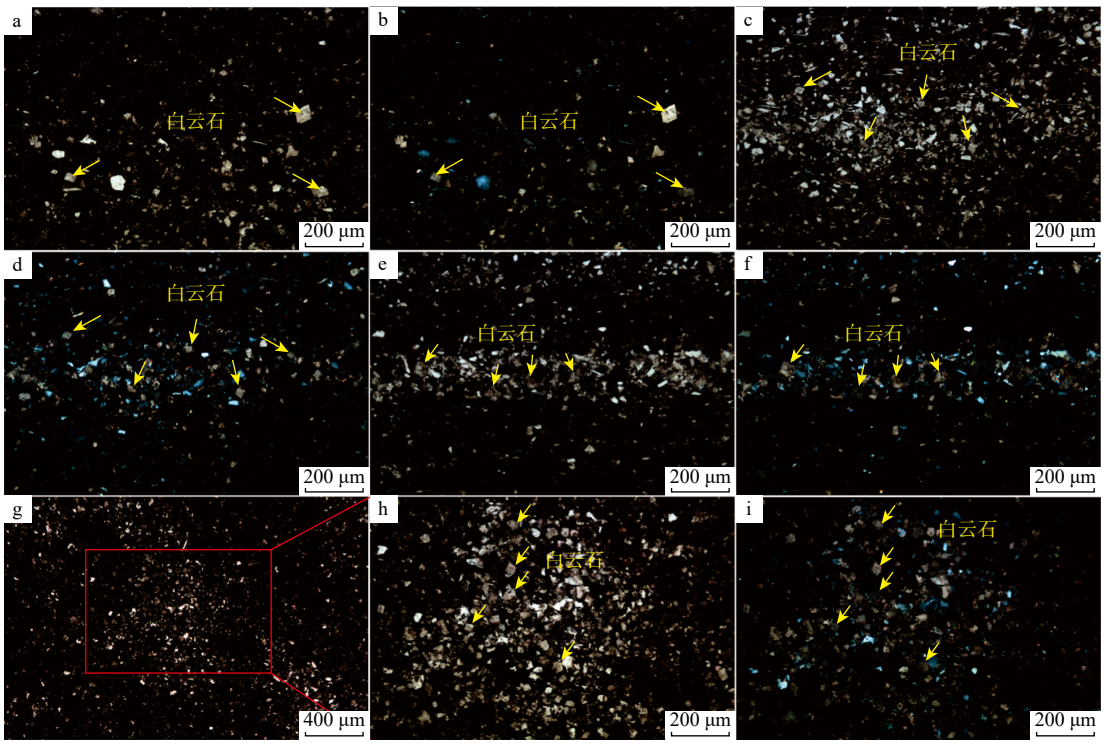


图 2　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩矿物成分特征

Fig. 2　Mineral composition characteristics in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area



a. 少量白云石分散于泥质中, Y205 井, 3 413.45 m, 4 小层, 单偏光; b. 少量白云石分散于泥质中, Y205 井, 3 413.45 m, 4 小层, 正交光; c. 大量白云石呈纹层状分布于暗色泥质中, Y205 井, 3 424.45 m, 4 小层, 单偏光; d. 大量白云石呈纹层状分布于暗色泥质中, Y205 井, 3 424.45 m, 4 小层, 正交光; e. 大量白云石呈纹层状分布于暗色泥质中, Y205 井, 3 424.45 m, 4 小层, 单偏光; f. 大量白云石呈纹层状分布于暗色泥质中, Y205 井, 3 424.45 m, 4 小层, 正交光; g, h. 大量白云石聚集分布, Y205 井, 3 420.48 m, 4 小层, 单偏光; i. 大量白云石聚集分布, Y205 井, 3 420.48 m, 4 小层, 正交光

图 3　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩光学显微镜特征

Fig. 3　Optical microscopic characteristics in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area

斑点(图 4b, c)。白云石颗粒的环带边界也能观察到磨圆现象(图 4d)。白云石颗粒与周围的矿物间常观察到明显的差异压实现象(图 4d)。白云石核心中普遍存在溶蚀孔, 而铁白云石环带中则没有观察到溶蚀孔(图 4f)。

龙一 1 亚段页岩中的白云石主要有 3 种分布形式: 分散状、纹层状和聚集状。少量且呈分散状分布的白云石在龙一 1 亚段 2, 3, 4 小层页岩中常见(图 3a, b; 图 5a, b), 纹层状分布的大量白云石则常见于 1 小层页岩中。泥晶/微晶白云石汇聚呈条带状分布, 条带宽 0.2 ~ 0.6 mm, 其中见有大量碎屑石英(图 3c, f; 图 5e, f)。纹层状分布的白云石中可见大量的白云石颗粒边缘破碎现象(图 4e)。大量且呈聚集状分布的白云石也常见于 1 小层页岩, 白云石主要与泥质、碎屑石英混合分布(图 3g, h; 图 5c, d)。

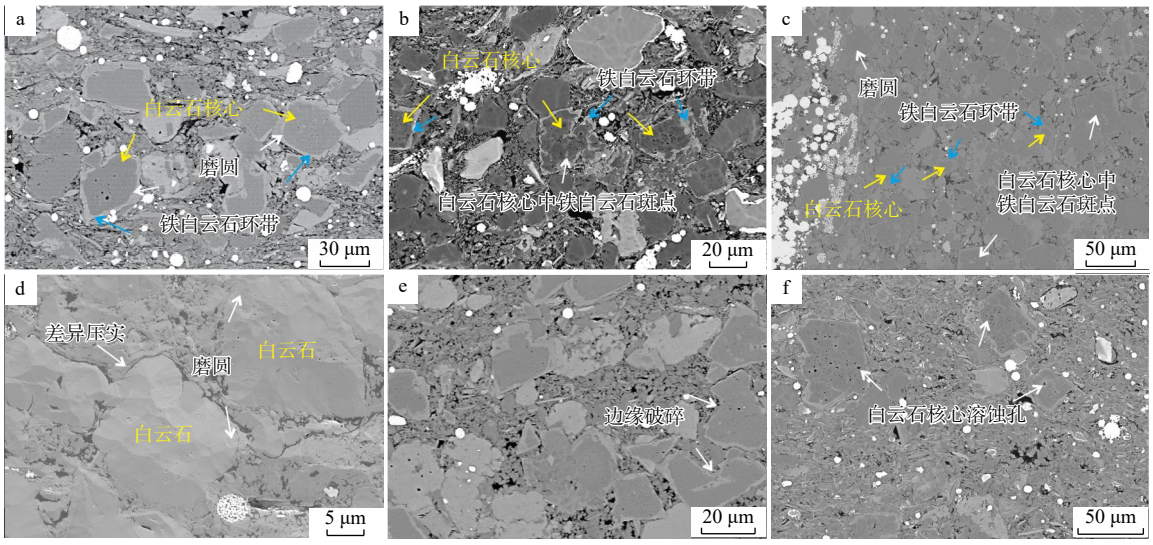
白云石内核的结晶程度低, 最大直径可达 50 μm, 元素组成上具有高镁高钙、几乎不含铁的特征。选择 60 个白云石核心, 对其元素质量分数进行测量: w(CaO)为 29.18% ~ 35.09%, 平均为 31.66%; w(MgO)为 16.01% ~ 19.63%, 平均为 17.81%; w(FeO)为 0.01% ~ 2.84%, 平均为 0.56%。根据白云石的 3 种分布形式进行整理: 8 个分散状白云石核心的 w(CaO)为 29.18% ~ 33.37%, 平均为 30.69%; w(MgO)为 16.77% ~ 18.58%, 平均为 17.86%; w(FeO)为 0.09% ~ 1.99%, 平均为 0.64%。30 个纹层状白云石核心的 w(CaO)为 29.18% ~ 35.09%, 平均为 32.13%; w(MgO)为 16.01% ~ 19.63%, 平均为 17.90%; w(FeO)为 0.01% ~ 2.84%, 平均为 0.40%。22 个聚集状白云石核心的 w(CaO)为 29.18% ~ 34.06%, 平均为 31.37%; w(MgO)为 16.01% ~ 19.26%, 平均为 17.66%; w(FeO)为 0.01% ~ 2.58%, 平均为 0.75%(表 2)。

白云石环带的结晶程度高, 最大宽度可达 10 μm, 元素组成上具有高镁高钙高铁的特征。选择 20 个白云石环带, 对其元素质量分数进行测量: w(CaO)为 25.65% ~ 29.68%, 平均为 28.10%; w(MgO)为 11.95% ~ 18.28%, 平均为 15.29%; w(FeO)为 3.74% ~ 12.02%, 平均为 7.25%。12 个纹层状白云石核心的 w(CaO)为 26.21% ~ 29.68%, 平均为 28.18%; w(MgO)为 11.95% ~ 18.28%, 平均为 15.42%; w(FeO)为 3.74% ~ 12.02%, 平均为 7.03%。8 个聚集状白云石核心的 w(CaO)为 25.65% ~ 29.47%, 平均为 27.97%; w(MgO)为 12.15% ~ 18.28%, 平均为 15.11%; w(FeO)为 4.51% ~ 9.87%, 平均为 7.59%(表 2)。由于铁含量的差异, 铁白云石晶体比白云石晶体成像相对更亮。

2.2 白云石成因分析

白云石颗粒由暗色的白云石核心和浅色的铁白云石环带组成。白云石核心的结晶程度低, 而铁白云石环带的自形程度高, 表明其具有不同的成因。

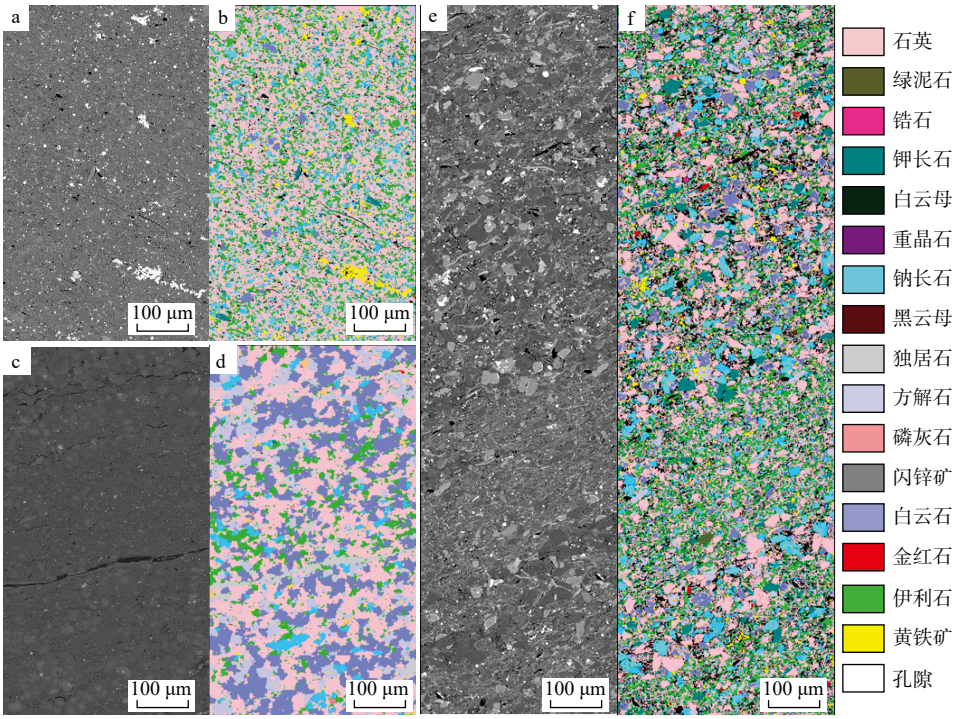
与生物相关的白云石, 一般都具有球形和哑铃状的晶体形态。然而本研究中具有雾心亮边结构的



a.白云石的环带和核心, 白云石核心的磨圆现象, Y205 井, 3 436.47 m, 3 小层; b. 白云石的环带和核心, 白云石核心中的铁白云石斑点, Y206 井, 3 875.2 m, 4 小层; c. 白云石的环带和核心, 白云石核心的磨圆现象, 白云石核心中的铁白云石斑点, Y205 井, 3 436.47 m, 3 小层; d. 白云石边缘磨圆现象, 白云石颗粒边缘的差异压实现象, L205 井, 4 033.40 m, 1 小层; e. 纹层状白云石颗粒边缘的破碎现象, Y205 井, 3 436.47 m, 3 小层; f. 白云石核心中的溶蚀孔, Y203 井, 3 750.44 m, 4 小层

图 4 天宫堂地区龙一 1 亚段页岩中白云石扫描电镜特征

Fig. 4 Scanning electron microscopic characteristics of dolomite in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area



a, b. 分散状分布白云石, Y203 井, 3 750.44 m, 4 小层; c, d. 聚集状分布白云石, Y208 井, 3 837.805 m, 1 小层; e, f. 纹层状分布白云石, Y206 井, 3 875.2 m, 4 小层. a, c, e. BSE 背散射图; b, d, f. AMICS 图

图 5　天宫堂地区 Y205 井龙一 1 亚段页岩矿物分析

Fig. 5　Mineral analysis in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Well Y205 in Tiangongtang area

菱形白云石颗粒与微生物成因的白云石具有不同的特征, 因此排除铁白云石环带的微生物成因。白云石颗粒边缘明显的差异压实边界和白云石晶体之间的原生细粒基质表明铁白云石环带形成于成岩作用早期浅埋藏阶段, 是在沉积物相对较软且未固结时形成的, 自形到半自形菱形晶体应该是缓慢生长的结果[15]。研究表明 SO_4^{2-} 能和 Mg^{2+}结合成中强离子对 $MgSO_4$, 减少可利用的 Mg^{2+}, 抑制白云石的成核作用, 因此在微生物硫酸盐还原作用带(MSR)白云石的形成受到抑制[15]。并且在 MSR 作用带, Fe^{2+}与 S^{2-}结合形成黄铁矿会造成孔隙流体的碱度增加[16], 同样不利于白云石的形成。在 MSR 作用带之下的硫酸根驱动的甲烷厌氧氧化作用带(SD-AOM)中 SO_4^{2-}浓度降低, 对白云石沉淀的抑制作用减弱, 同时孔隙流体中经过微生物硫酸盐还原作用(MSR)后碱度的增加也促使白云石发生沉淀[17]。与陆相页岩相比, 海相页岩更富有生物碎屑, 早期成岩作用期间碳酸盐岩岩屑和生物碎屑的溶解可以为碳酸盐胶结提供钙源和碳源[18]。SD-AOM 作用产生的 CO_2 也是白云石沉淀的重要 CO_3^{2-} 来源。

白云石核心中边缘的磨圆现象和大量孔隙的存在表明其可能是碎屑来源(图 4a, f)。暗色的白云石核心中常见有浅色的铁白云石斑点(图 4b, c), 可能是白云石核心中原始存在的孔隙被铁白云石胶结。天宫堂地区中靠近川中古陆的龙马溪组页岩中的白云石含量较高, 可能也反映了白云石核心的碎屑来源(图 2)。古隆起的碎屑白云石中发育有大量溶蚀孔隙, 在遭受机械破碎作用后搬运沉积到海相页岩中, 在早成岩阶段形成的铁白云石包裹白云石碎屑, 同时对白云石的核心孔隙进行胶结。Fort Worth 盆地 Barnett 页岩中的粉砂级白云石颗粒具有不同的晶体形状, 从高度自形到非自形不等, 其白云石核心被认为属于碎屑来源[19]。Appalachian(阿巴拉契亚)盆地西部 New Albany(新奥尔巴尼)组 Portwood 段的白云质黑色页岩中也含有大量粉砂级的碎屑白云石颗粒[20]。SCHIEBER 等[21] 在对龙马溪组页岩中白云石成因的研究中, 也认为白云石核心为碎屑成因, 而白云石环带形成于浅埋藏阶段中, 硫酸根驱动的甲烷厌氧氧化作用带。

纹层状分布的白云石中常见一些菱形白云石颗粒边缘的破碎和磨圆现象(图 4d, e), 表明在早成岩时期的孔隙水中, 白云石中的菱形环带形成后, 白云石颗粒可能受到了水动力作用的影响。在白云石颗粒含量高的样品中存在着白云石呈纹层状分布的现象(图 3d, f), 表明在早成岩时期白云石的菱形环带胶结形成后, 可能受到水动力作用发生搬运, 在沉积

表 2　天宫堂地区 Y205 井龙一 1 亚段页岩白云石颗粒元素质量分数

Table 2　Element content of dolomite grains in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Well Y205 in Tiangongtang area

分布形式		CaO	MgO	FeO	分布形式		CaO	MgO	FeO
		w_B/%					w_B/%		
白云石核心	分散状	30.92	18.58	0.25	白云石核心	聚集状	30.96	18.30	0.01
		30.66	18.27	0.09			32.10	16.83	0.11
		29.18	17.54	0.82			31.07	17.86	0.24
		29.20	16.77	1.99			30.66	18.27	0.09
		30.51	18.37	0.29			29.18	17.54	0.82
		33.37	16.85	0.17			32.67	17.73	0.07
		31.06	18.55	1.13			34.06	18.34	0.10
		30.59	17.94	0.37			31.72	16.62	0.10
	纹层状	35.09	19.63	0.08			31.59	19.26	1.62
		30.51	19.63	0.05			29.36	17.40	2.56
		33.66	18.16	0.05			30.24	18.49	2.58
		29.21	17.82	1.96			30.39	18.54	0.08
		33.65	19.10	0.79			31.33	17.21	1.75
		31.29	17.81	0.37			31.09	17.93	0.71
		33.15	18.44	0.10			31.21	17.00	0.86
		34.18	18.27	0.15			31.85	17.30	0.01
		33.72	18.95	0.01			33.00	18.85	0.48
		33.46	16.01	0.07			33.29	17.20	1.73
		31.92	17.90	0.08			32.43	16.97	0.04
		32.25	18.02	0.03			29.94	17.93	0.23
		31.76	17.83	0.08	白云石环带	纹层状	28.07	14.71	8.81
		33.27	19.00	0.18			28.61	15.60	8.36
		34.73	18.95	0.09			27.56	16.10	5.24
		34.68	18.28	0.07			27.39	18.28	6.49
		30.92	18.58	0.25			28.79	15.37	8.01
		31.62	17.80	0.09			29.15	15.94	4.90
		31.27	17.50	0.08			28.76	15.70	7.31
		31.99	17.01	0.07			29.28	16.20	6.32
		31.46	16.15	1.00			26.89	11.95	12.02
		30.96	18.30	0.01			26.21	15.26	3.74
		32.10	16.83	0.11			29.68	15.50	4.21
		31.07	17.86	0.24			27.77	14.38	8.95
		30.66	18.27	0.09		聚集状	29.47	14.74	4.51
		29.18	17.54	0.82			25.65	13.91	9.40
		29.20	16.77	1.99			28.20	12.15	9.87
		32.30	17.93	0.09			28.07	14.71	8.81
		32.45	16.01	2.84			28.61	15.60	8.36
		32.28	16.76	0.08			27.56	16.10	5.24
		32.00	17.01	0.06			27.39	18.28	6.49
		29.90	16.01	2.27			28.79	15.37	8.01

岩/水面交界处的海底碎屑环境可能会造成白云石的磨损边界[22]，并且以纹层状形式堆积于海底沉积物中。聚集状分布的白云石颗粒可能与生物扰动有关，沉积物游动痕迹造成了结构的破坏，使生物洞穴中充满了碎屑颗粒[21]。沉积时期白云石碎屑的堆积在经历早成岩阶段白云石环带的沉淀后会形成聚集状分布的白云石。

3　白云石分布规律与控制因素

3.1　白云石分布控制因素

龙马溪组页岩沉积时期研究区古地貌具有北高南低，北部水体变浅的特征，随着水体变浅碳酸盐矿物含量增加。元素地球化学分析显示，富有机质白云石的分布与古生物生产力指标具有良好相关关系，表明高古生产力条件可能有利于微生物白云石的形成[23-24]。此外，当石英质量分数介于 20% ~ 40% 之间，白云石与硅质矿物呈现负相关趋势，这表明产白云石微生物群落与产硅生物群落可能在生态或功能上存在差异或互补。暗色页岩的沉积环境及有机质演化可提供比其他环境更多的碳酸根离子，其增加有利于白云石沉淀[25]，暗色页岩沉积环境富含有机质及多种有机化合物，其中部分化合物能够促进白云石的生成[26]，同时，该环境多为碱性还原体系，为白云石发育提供了有利条件[27]。研究区页岩中白云石含量与总有机碳具有较好的正相关性，出现白云石含量高时 w(TOC)整体较高。在相对浅水的环境下，高古生产力和有机质分解耗氧造成的缺氧条件，使产硅生物与产白云石生物共同形成的有机质得以较好保存[28]。富有机质白云石的分布可能对应盆缘区域有利于页岩气富集的地带。

3.2　白云石分布规律

天宫堂地区龙一 1 亚段页岩垂向上矿物含量变化明显，Y208 井，Y205 井，Y202 井，Y207 井，Y206 井，Y209 井，Y203 井，NX202 井和 Y201 井中，石英含量在 2 小层和 3 小层中较高，2 小层中石英质量分数为 45.9% ~ 78.0%，3 小层中石英质量分数为 36.9% ~ 71.9%，石英含量在 1 小层和 4 小层中较低，1 小层中石英质量分数为 19.0% ~ 73.1%，4 小层中石英质量分数为 29.1% ~ 47.6%；1 小层中黏土质量分数为 7.2% ~ 28.2%，黏土含量在 2 小层中最低，从 2 小层到 4 小层逐渐增加，2 小层中黏土质量分数为 5.0% ~ 25.1%，3 小层中黏土质量分数为 13.0% ~ 35.5%，在 4 小层中最高，黏土质量分数为 21.7% ~ 38.9%；碳酸盐矿物中方解石和白云石含量在 1 小层中最高，从 1 小层到 3 小层逐渐降低，1 小层中方解石质量分数为 7.4% ~ 29.3%，白云石质量分数为

3.2% ~ 51.0%, 2 小层中方解石质量分数为 6.8% ~ 24.3%, 白云石质量分数为 4.2% ~ 21.8%, 3 小层中方解石质量分数为 3.2% ~ 16.3%, 白云石质量分数为 2.3% ~ 9.0%, 4 小层中碳酸盐矿物含量又出现增加, 方解石质量分数为 5.3% ~ 14.6%, 白云石质量分数为 3.8% ~ 14.1%(图 6)。平面上, 天宫堂地区从东南到西北岩相类型由硅质黏土质页岩逐渐向含黏土硅质页岩、灰质硅质页岩和云质硅质页岩过渡, 指示碳酸盐矿物, 特别是白云石含量逐渐增加(图 7)。天宫堂地区从位于东南方向的 Y201 井, NX202 井, 位于中部的 Y203 井, 到位于西北方向的 Y206 井, Y202 井, Y205 井, 龙马溪组页岩中碳酸盐矿物中的白云石含量也显著增加(图 7, 8)。

4　白云石对储层孔隙发育的影响

天宫堂地区龙马溪组页岩中同时存在有机孔和无机孔。有机质孔隙主要发育在充填于颗粒之间孔隙空间中的固体沥青中(图 9a, b), 无机孔主要是无机矿物颗粒之间的粒间孔, 例如白云石颗粒之间的粒间孔、白云石与长英质矿物颗粒之间形成的粒间孔(图 9c, d), 以及颗粒内部(例如白云石颗粒内部)的溶蚀孔(图 9e, f)。通过对 Y205 井和 Y206 井 1 小层和 4 小层有机孔、无机孔的面孔率统计发现(图 10a), Y205 井和 Y206 井 1 小层有机孔面孔率分别为 1.10% 和 0.98%, 平均为 1.04%, 而 4 小层有机孔面孔率分别为 0.66% 和 0.57%, 平均为 0.62%; 1 小层无机孔面孔率分别为 0.71% 和 0.13%, 平均为 0.42%, 而 4 小层无机孔面孔率分别为 0.33% 和 0.28%, 平均为 0.31%。以上数据可以看出, 天宫堂地区龙一 1 亚段页岩 1 小层无机孔发育程度优于 4 小层。3.2 节对矿物含量的分析中发现, 天宫堂地区龙马溪组页岩 1 小层的白云石含量远高于 4 小层, 因此龙马溪组页岩中无机孔隙的发育可能与白云石的含量有关。

Y205 井和 Y208 井位于天宫堂地区西北部, 统计其 1 小层无机孔面孔率分别为 1.06% 和 1.04%, 占总面孔率的 50% 和 57%; 有机孔面孔率分别为 1.01% 和 0.77%, 占总面孔率的 48% 和 42%。Y206 井和 Y209 井位于天宫堂地区西北方向靠近中部, 其 1 小层无机孔面孔率分别为 0.29% 和 0.33%, 占总面孔率的 28% 和 28%; 有机孔面孔率分别为 0.73%

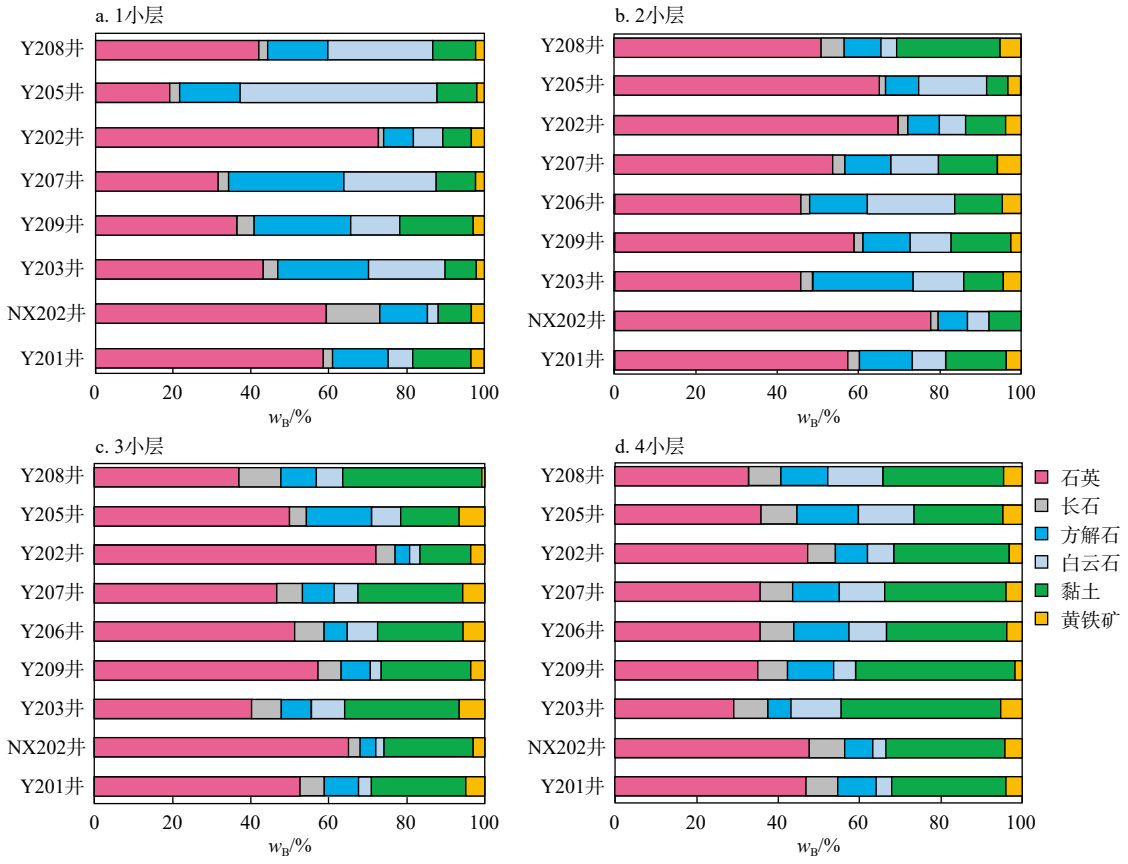


图 6　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩矿物质量分数

Fig. 6　Mineral content in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area

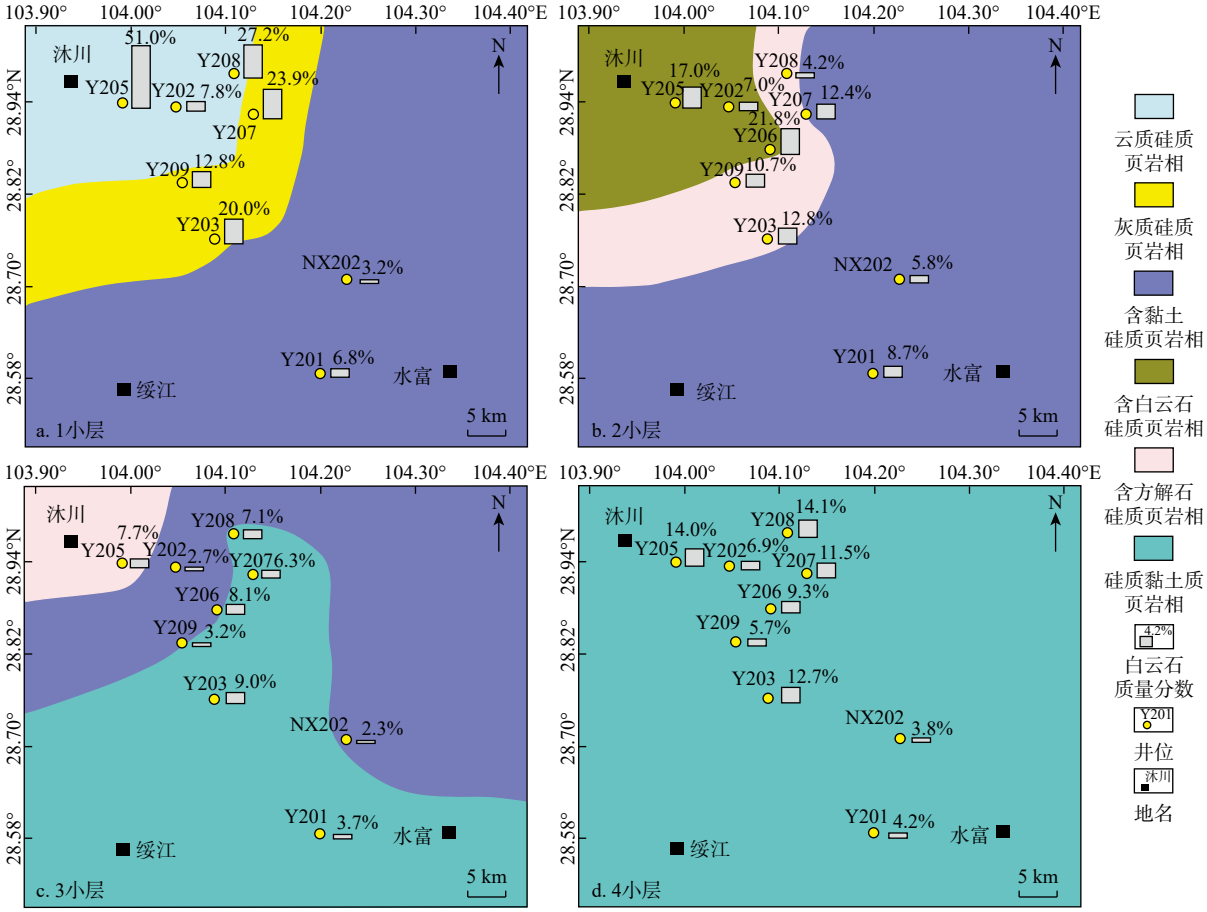


图 7　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩岩相及白云石质量分数平面分布图

Fig. 7　Plane distribution map of lithofacies and dolomite content in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area

和 0.8%，占总面孔率的 70% 和 69%。NX202 井位于天宫堂地区东南部，统计其 1 小层无机孔面孔率为 0.13%，占总面孔率的 22%；有机孔面孔率为 0.43%，占总面孔率的 73%(图 10b，c)。因此天宫堂地区龙马溪组页岩中西北部无机孔发育程度整体高于东南部。结合矿物含量分布情况(图 6)，西北部的白云石含量也高于东南部，因此推测西北部龙马溪组页岩中较高的无机孔面孔率可能与较高的白云石的含量有关，并且随着由东南方向 NX202 井向西北方向靠近中部的 Y206 井和 Y209 井，再向西北方向的 Y205 井和 Y208 井，页岩中白云石含量逐渐增加，无机孔的面孔率也逐步升高。

对 6 口井(Y201 井，Y202 井，Y203 井，Y205 井，Y206 井，NX202 井)中 1 ~ 4 小层白云石的平均含量和孔隙度进行统计，发现其孔隙度与白云石含量均呈正相关关系(图 11)。4 小层中白云石质量分数介于 3.8% ~ 12.7% 之间，孔隙度介于 3.2% ~ 6.3% 之间，相关性 R^2=0.819 4；3 小层中白云石质量分数介于 2.3% ~ 9.0% 之间，孔隙度介于 3.1% ~ 6.9% 之间，相关性 R^2=0.707 5；2 小层中白云石质量分数介于 5.8% ~ 21.8% 之间，孔隙度介于 2.4% ~ 6.5% 之间，相关性 R^2=0.283 7；1 小层中白云石质量分数介于 3.2% ~ 51% 之间，孔隙度介于 2.9% ~ 5.2% 之间，相关性 R^2=0.235 6。可以发现随着 4 小层到 1 小层白云石含量的增加，页岩孔隙度与其的相关性下降。2 ~ 4 小层中白云石质量分数低于 20%(图 11a ~ c)，而 1 小层中白云石质量分数在高于 20% 之后，页岩孔隙度没有增长(图 11d)，可能是因为白云石质量分数在达到 15% ~ 20% 时，其对孔隙发育的贡献达到最大，白云石质量分数超过 15% ~ 20% 之后，其含量的增加对储层孔隙发育的影响减小。

天宫堂地区储层孔径普遍较大。有机孔孔径曲线具有 4 个峰值，2 个主峰分别是 20 ~ 50，200 nm，2 个次峰分别是 5，7 nm(图 12a，c)。无机孔孔径曲线具有 3 个峰值，主峰为 200 nm，次峰为 40，2 000 nm(图 12b，d)。因此无机孔孔径整体上大于有机孔。西北地区的 Y205 井和 Y208 井发育大于 1 000 nm 超大无机宏孔且面孔率高于东南地区的 Y206 井和

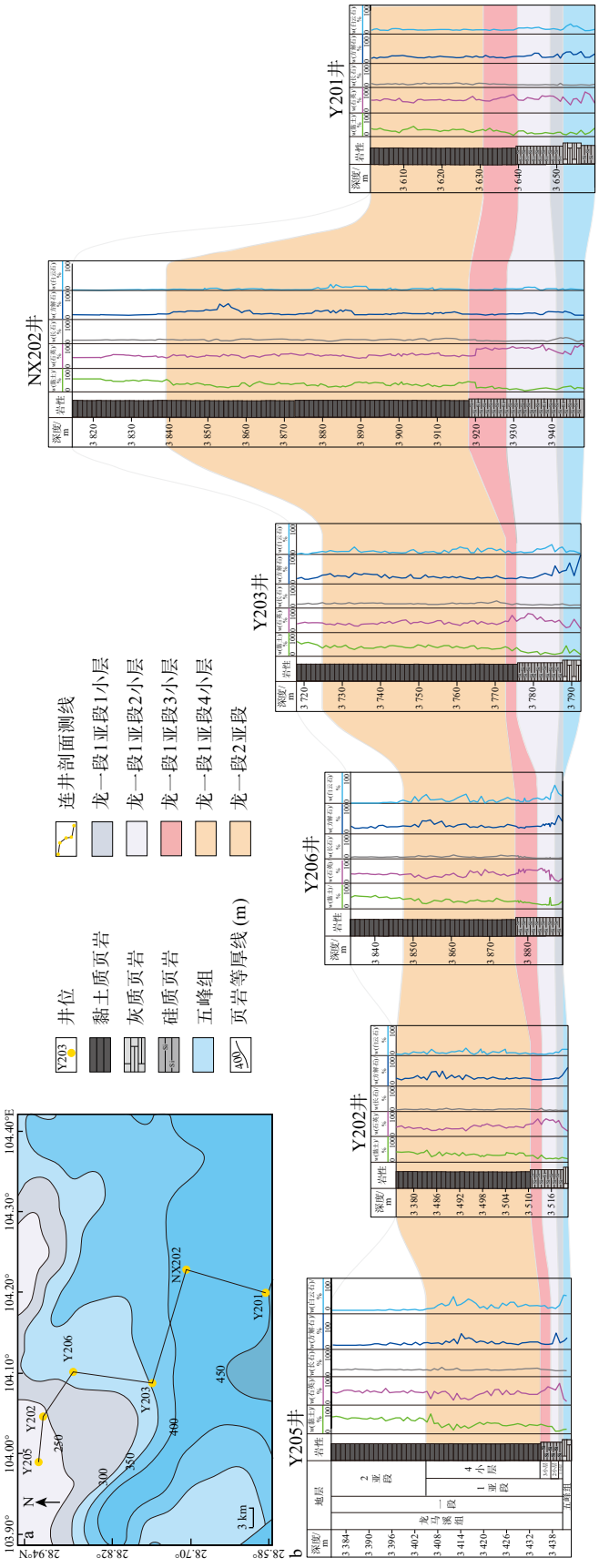
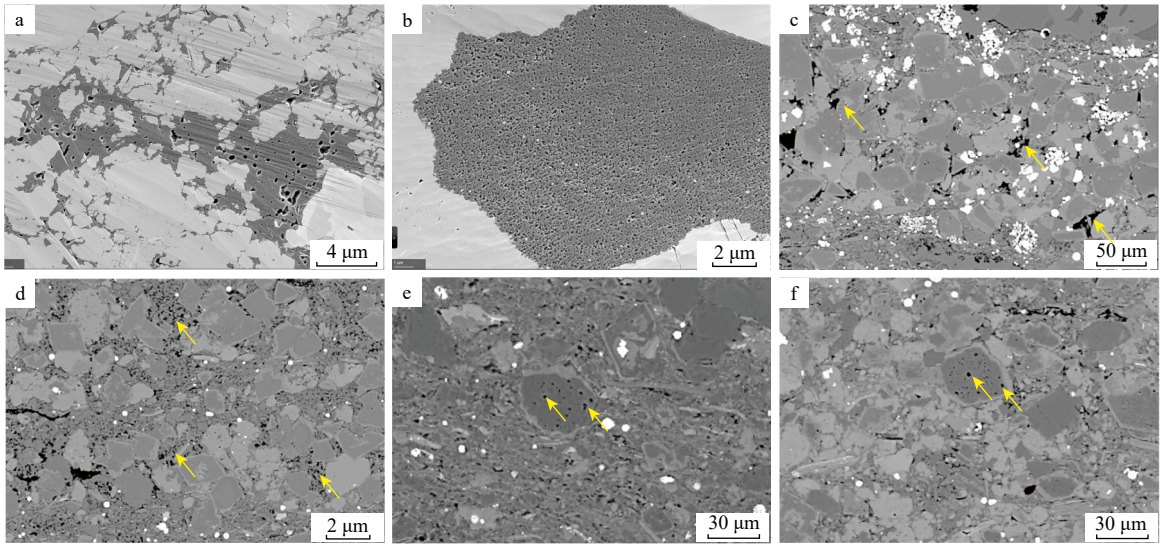


图 8　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩等厚图 (a) 及连井剖面图 (b)

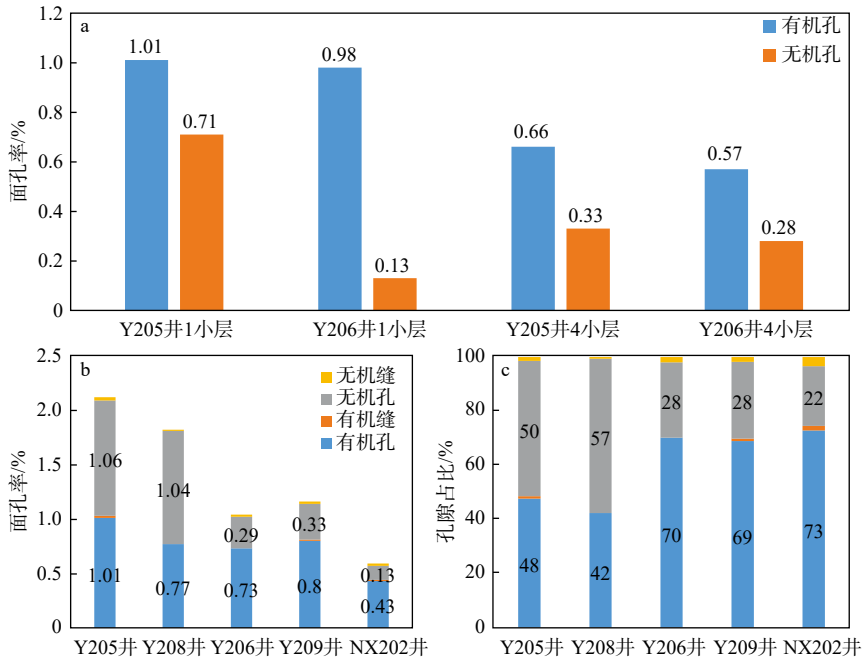
Fig. 8　Shale isopach map (a) and connecting well profile (b) in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation in Tiangongtang area



a. 有机质孔，Y206 井，3 886.5 m，1 小层；b. 有机质孔，Y209 井，4 469.62 m，1 小层；c. 粒间孔，Y205 井，3 436.47 m，3 小层；d. 粒间孔，Y205 井，3 436.47 m，3 小层；e. 粒内孔，Y206 井，3 875.2 m，4 小层；f. 粒内孔，Y205 井，3 436.47 m，3 小层

图 9　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩孔隙类型

Fig. 9　Pore type in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area



a. 1 小层和 4 小层有机孔和无机孔面孔率；b. 有机缝、无机缝、有机孔和无机孔面孔率；c. 有机缝、无机缝、有机孔和无机孔孔隙占比

图 10　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩面孔率统计直方图

Fig. 10　Statistics histogram of visible porosity in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area

Y209 井(图 10c, 12b)。结合 3.2 节的矿物含量分析，天宫堂地区西北部白云石含量较高，其无机孔大量增加，孔径较大，面孔率贡献超 50%，有机孔较少；而东南部硅质含量较高，有机孔发育，面孔率贡献超 60%，无机孔较少，孔径较小。Y205 和 Y206 井中 1 小层无机孔孔隙度均高于 4 小层(图 12d)，同样是受到了 1 小层中高白云石含量的影响。

以上数据和分析表明无机孔的数量和孔径与白云石含量密切相关。天宫堂地区北部白云石含量的增加有利于无机孔的发育。相比于黏土矿物，粉砂颗粒的抗压实能力较强，保留有颗粒间孔隙，因此页岩储层中的粉砂质碎屑能改善致密地层的储集物性[29]。特别是纹层状和聚集状分布的白云石颗粒之间存在大量的粒间孔，与周围的矿物基质相比较，这

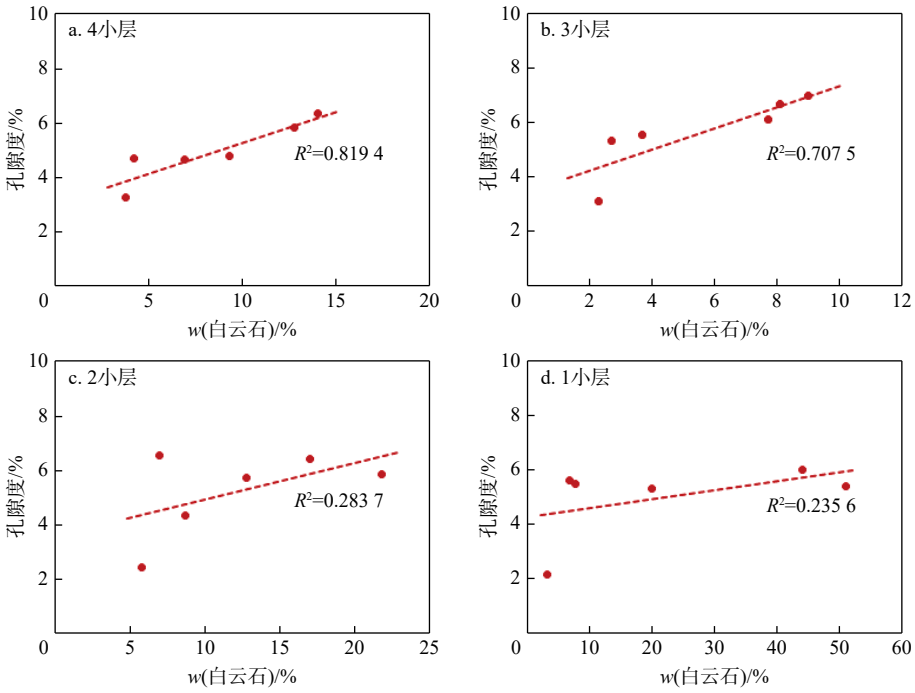


图 11　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩孔隙度与白云石质量分数关系图

Fig. 11　Relationship between porosity and dolomite content in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area

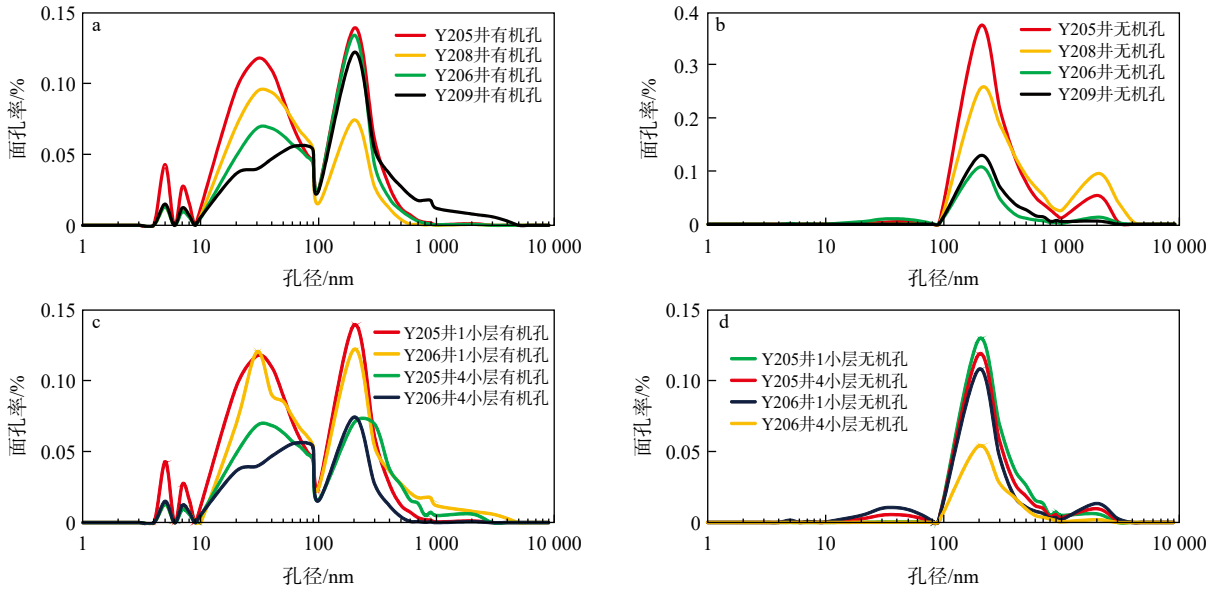


图 12　天宫堂地区龙一 1 亚段页岩孔径分布曲线

Fig. 12　Pore size distribution in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area

些白云石颗粒之间以及白云石颗粒与长英质矿物颗粒/微晶石英之间可观察到较多的粒间孔(图 9c, d),对储集空间具有较大贡献,而分散状白云石对孔隙影响小,主要通过颗粒内部的溶蚀孔隙来提供储集空间(图 9e, f)。由于钙质矿物倾向于形成一个相对刚性的框架,从而提高页岩储层的抗压强度,因此它们有利于大孔隙的保存[30]。天宫堂地区白云石可能形成于早成岩阶段。早期胶结作用会抑制后期的压实作用,一方面,胶结物充填原生粒间孔隙,对储层孔隙起破坏作用;另一方面,胶结物的发育在一定程度上保护了孔隙不受压实作用影响[31]。

5　结　论

(1)天宫堂地区龙一 1 亚段页岩白云石质量分数为 4.47% ~ 13.29%,均值为 8.57%,主要有 3 种分

布形式：分散状、纹层状和聚集状。白云石核心和环带的不同元素含量和结晶度等特征表明其具有不同成因，白云石核心可能是碎屑成因，而铁白云石环带可能形成于成岩作用早期浅埋藏阶段的硫酸根驱动的甲烷厌氧氧化作用带，孔隙流体中经过微生物硫酸盐还原作用后碱度的增加促使白云石发生沉淀。纹层状分布的白云石可能受到了水动力的影响，聚集状分布的白云石则可能受到生物扰动的影响。

（2）受古地貌北高南低，北部水体变浅的格局控制，从东南到西北岩相类型由硅质黏土质页岩逐渐向含黏土硅质页岩、灰质硅质页岩和云质硅质页岩过渡，白云石含量逐渐增加。白云石质量分数低于 15% 时，有利于无机孔的发育，白云石质量分数在达到 15%～20% 时，对孔隙发育的贡献达到最大，之后白云石含量的继续增加对储层孔隙发育的影响减弱。较高含量的钙质矿物倾向于形成一个相对刚性的框架，能够提高页岩储层的抗压强度，保存大孔径的无机孔隙。因此，天宫堂地区从东南到西北方向白云石含量具有增加的趋势，并且无机孔的数量和孔径也随之增加。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] LOUCKS R G, RUPPEL S C. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.

[2] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望：以中国致密油和致密气为例 [J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187. (in Chinese with English abstract)

[3] 刘超, 包汉勇, 万云强. 四川盆地东缘白马地区常压页岩气开发地质评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 53-61.
LIU C, BAO H Y, WAN Y Q. Development geology avaluation of normal-pressured shale gas in the Baima area, eastern margin of the Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 53-61. (in Chinese with English abstract)

[4] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.

[5] 舒志国, 舒逸, 陈绵琨, 等. 陆相页岩岩相非均质性及储层孔隙发育特征：以四川盆地自流井组东岳庙段页岩为例 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 1-15.
SHU Z G, SHU Y, CHEN M K, et al. Lithofacies heterogeneity and reservoir pore development characteristics of continental shale: A case study of the Dongyuemiao shale of the Ziliujing Formation in the Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 1-15. (in Chinese with English abstract)

[6] MATHIA E J, BOWEN L, THOMAS K M, et al. Evolution of porosity and pore types in organic-rich, calcareous, Lower Toarcian Posidonia shale[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 75: 117-139.

[7] 袁俊亮, 邓金根, 张定宇, 等. 页岩气储层可压裂性评价技术 [J]. 石油学报, 2013, 34(3): 523-527.
YUAN J L, DENG J G, ZHANG D Y, et al. Fracability evaluation of shale-gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 523-527. (in Chinese with English abstract)

[8] CHEN Y, ZHAO J H, HU Q H, et al. Origin of carbonate minerals and impacts on reservoir quality of the Wufeng and Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. Petroleum Science, 2023, 20(6): 3311-3336.

[9] WARTHMANN R, VAN LITH Y, VASCONCELOS C, et al. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments[J]. Geology, 2000, 28(12): 1091.

[10] 王秀平, 牟传龙, 葛详英, 等. 川南及邻区龙马溪组黑色岩系矿物组分特征及评价 [J]. 石油学报, 2015, 36(2): 150-162.
WANG X P, MOU C L, GE X Y, et al. Mineral component characteristics and evaluation of black rock series of Longmaxi Formation in Southern Sichuan and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 150-162. (in Chinese with English abstract)

[11] 郭芪恒, 金振奎, 耿一凯, 等. 四川盆地龙马溪组页岩中碳酸盐矿物特征及对储集性能的影响 [J]. 天然气地球科学, 2019, 30(5): 616-625.
GUO Q H, JIN Z K, GENG Y K, et al. The characteristics of carbonate minerals in the Longmaxi Formation gas shale and its impact on the reservoir performance in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(5): 616-625. (in Chinese with English abstract)

[12] 张梦琳, 李郭琴, 何嘉, 等. 川西南缘天宫堂构造奥陶系五峰组–志留系龙马溪组页岩气富集主控因素 [J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 141-151.
ZHANG M L, LI G Q, HE J, et al. Main controlling factors of Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi shale gas enrichment in Tiangongtang structure, southwestern margin of Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 141-151. (in Chinese with English abstract)

[13] 何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景 [J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 993-1006.
HE D F, LU R Q, HUANG H Y, et al. Tectonic and geological background of the earthquake hazards in Changning shale gas development zone, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 993-1006. (in Chinese with English abstract)

[14] 何骁, 吴建发, 雍锐, 等. 四川盆地长宁–威远区块海相页岩气田成藏条件及勘探开发关键技术 [J]. 石油学报, 2021, 42(2): 259-

272.
HE X, WU J F, YONG R, et al. Accumulation conditions and key exploration and development technologies of marine shale gas field in Changning-Weiyuan block, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 259-272. (in Chinese with English abstract)

[15] CHENG J R, MENG X Q, ZHANG E L, et al. An early Holocene primary dolomite layer of abiotic origin in Lake Sayram, central Asia[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(23): e2021GL096309.

[16] BAKER P A, KASTNER M. Constraints on the formation of sedimentary dolomite[J]. Science, 1981, 213: 214-216.

[17] COMPTON J S. Degree of supersaturation and precipitation of organogenic dolomite[J]. Geology, 1988, 16(4): 318.

[18] MA B B, CAO Y C, ERIKSSON K A, et al. Carbonate cementation patterns, potential mass transfer, and implications for reservoir heterogeneity in Eocene tight-oil sandstones, Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China: Evidence from petrology, geochemistry, and numerical modeling[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(12): 3035-3067.

[19] DUTTON S P. Calcite cement in Permian deep-water sandstones, Delaware Basin, West Texas: Origin, distribution, and effect on reservoir properties[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(6): 765-787.

[20] YANG T, CAO Y C, FRIIS H, et al. Genesis and distribution pattern of carbonate cements in lacustrine deep-water gravity-flow sandstone reservoirs in the Third Member of the Shahejie Formation in the Dongying Sag, Jiyang Depression, eastern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 547-564.

[21] SCHIEBER J, SHAO X H. Detecting detrital carbonate in shale successions: Relevance for evaluation of depositional setting and sequence stratigraphic interpretation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 130: 105130.

[22] DENNY A C, ORLAND I J, VALLEY J W. Regionally correlated oxygen and carbon isotope zonation in diagenetic carbonates of the Bakken Formation[J]. Chemical Geology, 2020, 531: 119327.

[23] 曲红军. 试论古构造对轿顶山式锰矿的控制作用 [J]. 地质与勘探, 1992, 28(6): 1-5.
QU H J. On Palaeostructural of control the Jaiodingshan type Mn-deposits[J]. Geology and Prospecting, 1992, 28(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[24] 冯洪真, 王海峰, 方一亭, 等. 四川汉源五峰期地层中烷烃的某些分布特征 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 1994, 30(4): 662-669.
FENG H Z, WANG H F, FANG Y T, et al. Some distributive characteristics of saturated hydrocarbons from Wufengian strata in Hanyuan area of Sichuan Province[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 1994, 30(4): 662-669. (in Chinese)

[25] DAVIES P J, BUBELA B, FERGUSON J. Simulation of carbonate diagenetic processes: Formation of dolomite, huntite and monohydrocalcite by the reactions between nesquehonite and brine[J]. Chemical Geology, 1977, 19(1/2/3/4): 187-214.

[26] MANSFIELD C F. A urolith of biogenic dolomite: Another clue in the dolomite mystery[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(6): 829-839.

[27] MACHEL H G, MOUNTJOY E W. Chemistry and environments of dolomitization: A reappraisal[J]. Earth-Science Reviews, 1986, 23(3): 175-222.

[28] 牟传龙, 王秀平, 王启宇, 等. 川南及邻区下志留统龙马溪组下段沉积相与页岩气地质条件的关系 [J]. 古地理学报, 2016, 18(3): 457-472.
MOU C L, WANG X P, WANG Q Y, et al. Relationship between sedimentary facies and shale gas geological conditions of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2016, 18(3): 457-472. (in Chinese with English abstract)

[29] 姜在兴, 孔祥鑫, 杨叶芃, 等. 陆相碳酸盐质细粒沉积岩及油气甜点多源成因 [J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 26-37.
JIANG Z X, KONG X X, YANG Y P, et al. Multi-source genesis of continental carbonate-rich fine-grained sedimentary rocks and hydrocarbon sweet spots[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 26-37. (in Chinese with English abstract)

[30] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett shale[C]//Anon. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. [S. l.]: SPE, 2008: SPE-115258-MS.

[31] 邵红梅, 高波, 潘会芳, 等. 松辽盆地古龙页岩成岩: 孔隙演化 [J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(5): 56-67.
SHAO H M, GAO B, PAN H F, et al. Diagenesis-pore evolution for Gulong shale in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 56-67. (in Chinese with English abstract)

Summary for “四川盆地天宫堂地区龙一 1 亚段页岩白云石特征及其对储层孔隙发育的影响”

Characteristics of dolomite in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area of Sichuan Basin and its influence on reservoir pore development

CHEN Liqing[a,b*], SHI Xuewen[a,b], ZHONG Kesu[a,b], ZHONG Wenwen[a,b], XU Liang[a,b], CHEN Junjie[a,b], WU Zhe[a,b]

a. Shale Gas Research Institute; b. Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Extraction in Sichuan Province, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610051, China

* Corresponding author, E-mail: chenlq28@petrochina.com.cn

Abstract: [**Objective and Methods**] This study investigates the types, origins, distribution, and impact on reservoir properties of dolomite in organic-rich marine shale of the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation in Tiangongtang area of the Sichuan Basin. [**Results**] Utilizing thin-section observation, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy, electron probe analysis, and other experiments, we have identified three dolomite types: Dispersed, layered, and aggregated dolomite. Dolomite crystals are rhombic, featuring a distinct core-ring structure. The core is poorly crystalline and compositionally characterized by high magnesium, high calcium, and almost no iron. In contrast, the ring is well-crystalline with high magnesium, high calcium, and high iron content. The distinct differential compaction boundaries and rhombic crystals at the edges of dolomite grains suggest that the ankerite ring may have formed in the methane anaerobic oxidation zone during the early shallow burial diagenesis. The rounding characteristics of the dolomite core suggest a detrital origin. Additionally, ankerite spots in the dolomite core may be due to the pore-filling cementation. The dolomite content in Tiangongtang area is highest in the first sub-member of the First Member of Longmaxi Formation shale, and gradually decreases upwards. The dolomite content shows a gradual increase from the deep-water area in the southeast to the shallow-water area in the northwest of the study area. Analysis of the dolomite content and visible porosity indicates that the development of inorganic pores in Longmaxi Formation shale in Tiangongtang area is closely related to the presence of dolomite. When the dolomite content is below 15%, it promotes the development of inorganic pores. When the dolomite content reaches about 15%～20%, its contribution to pore development peaks, and further increases in dolomite content no longer significantly affect reservoir pore development. Dolomite grains exhibit strong anti-compaction properties, retaining intergranular pores and effectively improving the reservoir properties of shale. In particular, the large number of intergranular pores between dolomite grains with layered and aggregated distributions makes a significant contribution to the reservoir space, whereas dispersed dolomite has little impact on pore development. [**Conclusion**] The research results offer valuable insights for shale gas exploration and development.

Key words: dolomite; reservoir pore development; Longmaxi Formation shale; Tiangongtang area; Sichuan Basin

Received: 2024-05-31; Revised: 2024-08-30; Accepted: 2024-09-06

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240292