

四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩 储层特征与发育规律

唐雪松^{1,2}, 谭秀成^{1,2}, 刘宏², 马腾^{1,2}, 苏成鹏^{1,2}, 程雪莹^{1,2}, 陈虹宇^{1,2}, 曹剑³

(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. 西南石油大学 中国石油碳酸盐岩储层重点实验室沉积-成藏研究室, 四川 成都 610500;

3. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要:四川盆地东部中二叠统茅口组发育了独具特色的白云岩及云质硅岩类储层, 主流观点是“断控热液”成因, 但勘探多有落空, 说明需要重新认识。通过盆地周缘露头剖面 and 盆内钻孔资料的系统对比分析, 研究了储层特征与发育规律。结果表明, 储层岩石类型主要包括晶粒白云岩、硅质白云岩和云质硅岩, 它们的分布与岩溶系统有关, 在纵横向上展布不稳定。其中, 晶粒白云岩主要位于岩溶系统周缘, 储集性能差, 相比而言, 硅质白云岩及云质硅岩主要位于岩溶系统内部, 储集性能好。储层发育遵循“相控岩溶”的规律, 颗粒滩相为储层形成提供了物质基础, 早成岩期层控型风化石岩溶是优质储层形成的关键。热液白云岩化作用有利于储层的保存, 硅质热液活动与后期的方解石胶结充填了部分孔隙, 最终形成了独具特色的硅质白云岩和云质硅岩储层。据此建议在前期注重“断控热液”型储层的基础上, 进一步加强对“相控岩溶”的分析, 找准目标。研究认识加深了对四川盆地茅口组碳酸盐岩储层的理解, 也可供相似地质背景地区参考。

关键词:硅质云岩; 云质硅岩; 热液白云岩; 相控岩溶; 碳酸盐岩储层; 茅口组; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characteristics and development mechanism of dolomite and dolomitic quartzite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

Tang Xuesong^{1,2}, Tan Xiucheng^{1,2}, Liu Hong², Ma Teng^{1,2}, Su Chengpeng^{1,2},
Cheng Xueying^{1,2}, Chen Hongyu^{1,2}, Cao Jian³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Branch of Deposition and Accumulation, PetroChina Key Laboratory of Carbonate Reservoir, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: Unique dolomite and dolomitic quartzite reservoirs occur in the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin. They are commonly believed to be of “fault-controlled hydrothermal” origin. However, most of the exploratory wells targeting at these reservoirs are unsuccessful, thus further study needs to be performed. The characteristics and development mechanism of these reservoirs are studied by means of comparative analysis of the outcrops on the periphery of the basin and cores inside the basin. The results indicate the main reservoir rocks in the Maokou Formation are crystalline dolomite, siliceous dolomite and dolomitic quartzite, whose distributions are mainly related to the karst systems, thus are uneven both laterally and vertically. Most of the crystalline dolomite occurs on the periphery of the karst systems, and their reservoir properties are poor. On the contrary, the siliceous dolomite and dolomitic quartzite are mostly distributed within the karst systems and have favorable reservoir properties. The development of reservoirs obeys the law of “facies-controlled karst”. Specifically, grain-beach facies provided the material basis for the reservoirs, and facies-controlled eogenetic karst was the key for the formation of high-quality reservoirs. The following hydrothermal dolomitization made it possible for the preservation of reservoir pores. The siliceous hydrothermal activities and later calcite cementation resulted in the filling of some pores. The unique siliceous dolomite and dolomitic quartzite finally came into being. According to these results, it is proposed to further strength study on “facies-controlled karst” reservoirs in addition to

收稿日期: 2016-04-14; 修订日期: 2016-05-21。

第一作者简介: 唐雪松(1992—), 男, 硕士研究生, 储层沉积学。E-mail: a5243170@163.com。

通讯作者简介: 谭秀成(1970—), 男, 教授、博士生导师, 储层沉积学。E-mail: tanxiucheng70@163.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214803)。

“fault-controlled hydrotherm” reservoirs, so as to improve the accuracy of reservoir prediction.

Key words: siliceous dolomite, dolomitic quartzite, hydrothermal dolomite, facies-controlled karst, carbonate reservoir, Maokou Formation, Sichuan Basin

四川盆地中二叠统茅口组是盆地天然气勘探的一个重要领域,并以岩溶型和白云岩储层为特色^[1-5]。最近在盆地东部,钻探发现硅质白云岩及云质硅岩也是重要的储集岩类,展现出与盆地其他地区的差异,因此开展这套白云岩及云质硅岩类储层研究具有重要意义。不仅是对盆地内茅口组储层研究的新积累,而且可以应用于区域勘探。然而,迄今对这套储层的研究存在巨大争议,提出的储层成因观点包括同生-准同生期混合水、埋藏、“玄武岩淋滤化”、热次盆及热液等^[1-4,6-12],并且主流认识是热液^[1,4,6,12]。据此模式,勘探应该围绕深大断裂展开。然而,一方面勘探多有落空,另一方面露头剖面和钻井展示的白云岩宏观分布特点主要与岩溶系统密切相关、部分也与生物滩有关^[13]。这种分布特点有悖于传统的热液白云岩沿断裂分布的特点^[14],反映研究区的白云岩储层成因与分布需要重新认识。有鉴于此,本文以盆地东部中二叠统茅口组为例,拟通过露头 and 钻孔取心资料的系统研究,分析这套独具特色的硅质白云岩及云质硅岩储层的形成和分布特征,并探讨其控制因素。

1 地质背景

四川盆地东部研究区西起于南充,东至奉节、宣恩一线,北达城口一带,南抵桐梓,构造位置为川东古斜中隆高陡断褶带(图1)。

早-中二叠世中上扬子地区受挤压应力作用,主要形成克拉通内拗陷的边缘裂陷盆地^[15]。茅口组与下部栖霞组呈不整合接触^[16-17],经历了3个完整的三级海侵海退旋回,形成了一套以灰-深灰色泥晶灰岩夹生屑颗粒灰岩为特征的开阔海台地沉积^[4,16-17]。依据海平面升降旋回和岩性组合特征,自下而上茅口组可分为茅一、茅二、茅三和茅四段(图1)。其中,茅一段多以泥晶灰岩与泥质灰岩互层为特征,茅二段和茅三段主要为颗粒灰岩,茅四段以泥晶灰岩为主,并夹少量颗粒灰岩^[1,18-19]。茅口末期受东吴运动抬升暴露影响,区内茅口组顶部普遍具典型风化壳岩溶特征^[5]。大量与风化壳岩溶有关的钙结壳、风化残积层、铝土质泥岩、铝土矿、褐铁矿、原地残积角砾岩等特殊沉积表明其暴露时间相对较长,约7~8 Ma^[20-21],致使部分地区缺失茅四段,区内茅口组残余厚度普遍介于200~355 m。在此之后,海平面上升致使研究区茅口组顶部沉积一套区域稳定分布的龙潭组煤系地层^[17],茅口组与上覆龙潭组之间为平行不整合关系。

2 储层特征

2.1 储层岩石学及产出特征

如前所述,四川盆地东部地区茅口组发育了独具特色的白云岩和硅质岩类储层。其中白云岩又可分为晶粒白云岩和硅质白云岩,而硅质岩主要是云质硅岩,它们的产出与岩溶系统密切相关。根据岩溶发育或者影响程度的强弱,以及其宏观形态将岩溶体系大致分为3类:①在颗粒岩溶蚀作用的过程中,受致密层的阻挡,岩溶水将紧临致密层之上的颗粒岩顺层面运动,形成似层状岩溶系统(图2a);②在颗粒岩溶蚀作用的过程中,受致密层阻挡影响较弱部位,水沿粒间孔流动并溶蚀,局部溶蚀相对较强,形成豹斑状岩溶系统(图2b,c);③当泥晶岩类中存在裂缝时,岩溶水沿裂缝局部扩溶,形成宏观孤立囊状岩溶系统(图2d)。

宏观上,野外露头显示研究区白云岩及云质硅岩呈两种产出状态。一种与似层状(图2a,图3a—c)或孤立囊状(图2b)发育的岩溶系统有关,其中似层状岩溶系统中常伴有大量基岩角砾(图3b)。另一种则与豹斑状岩溶系统(图2c,图2d,图3d)密切相关。结合

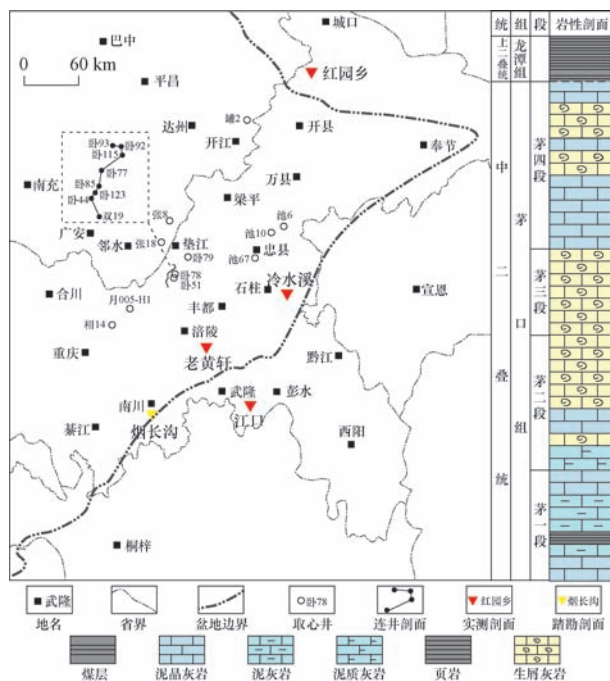


图1 研究区位置及茅口组地层剖面

Fig.1 Location of the study area and stratigraphic column of the Maokou Formation

前人对卧龙河地区茅口组白云岩发育层位的研究报道^[3,11],综合岩屑和测井资料,发现卧龙河地区茅二段a亚段白云岩在横向上具有似层状发育的特征,单井白云岩层厚具有明显差异性(图4)。与此同时,岩心尺度虽然相对较小,但仍可见白云岩与云质硅岩的分布与岩溶系统的发育密切相关,岩溶角砾大量发育,优质白云岩或云质硅岩储层主要位于岩溶系统充填段(图5)。进一步观察发现,各岩溶系统洞壁与岩溶系统内部的白云石或云质硅岩在储层岩石学特征上存在较大差异。

2.1.1 岩溶系统洞壁晶粒白云岩

野外调查和薄片观察发现,各岩溶系统周缘往往发育较纯净的晶粒云岩。这类晶粒云岩的形成主要与岩溶系统周缘基质灰岩的云化有关,白云岩化作用向基岩方向的影响深度较小,所形成的白云岩规模有限,厚度较薄,一般不大于10 cm。白云石晶体较纯净,晶粒呈它形曲面镶嵌状接触,以细晶为主,偶见原岩组构破坏严重具生物颗粒幻影,与未受云化作用影响的基质灰岩一样,岩性相对致密,储集性能较差(图5c,图5g,图6a)。

2.1.2 岩溶系统内部硅质白云岩及云质硅岩

岩溶系统内部晶粒白云岩中普遍含硅质,形成区内较有特色的硅质云岩(白云石含量>50%,硅质含量介于25%~50%)。受风化作用的影响,野外露头可见硅质云岩呈现土黄色(图3a)。镜下观察发现,硅质

云岩中白云石晶体存在两种形态:一种白云石晶粒呈半自形-自形状(图5a,图5i,图6b—f),部分具雾心亮边特征(图5a),少量白云石具共轴胶结现象(图6c, d),白云石晶粒以细晶为主,晶粒大小分异大,多介于80~200 μm ;另一种白云石晶体呈马鞍状结构(图7a, b),具较明显的波状消光。晶粒大小介于100~300 μm 。硅质云岩中可见硅质交代白云石和最晚期的方解石胶结充填(图5a,图6b—f),并伴有萤石等典型的热液矿物(图7b, c)。当硅化作用较强时,硅质云岩逐渐过渡为云质硅岩(硅质含量>50%,白云石含量介于25%~50%)(图5h),云质硅岩中多数白云石晶体因受到硅质的胶结交代作用的影响现晶形已模糊难辨,仅有少量自形白云石依稀可见。

2.2 储集空间类型

通过对野外剖面、岩心和薄片的详细观察,发现茅口组储层垂向上主要集中在茅二段和茅三段,储集空间类型总体丰富多样,既有受组构控制的粒间(溶)孔、粒内溶孔、生物体腔孔、晶间(溶)孔、溶洞等,又有不受组构控制的构造缝和溶缝(表1)。

具体而言,岩溶系统周缘纯净的晶粒白云岩岩性致密,储集空间主要为晶间微隙(图5c,图5g,图6a),偶见小型裂缝发育(图5g),部分裂缝为方解石及硅质充填,总体储集性能较差。相比而言,岩溶系统内部的硅质云岩及云质硅岩储集空间则以晶间孔、晶间溶孔及小型溶洞为主,伴随裂缝沟通,储集性能最好。其中晶间孔主要呈不规则多边形(图5i,图6b—f),单个孔



图2 四川盆地东部茅口组白云岩野外宏观展布特征

Fig. 2 Outcrop characteristics of dolomites of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

- a. 似层状岩溶系统,岩溶系统内部白云岩风化成土黄色,茅二段,涪陵老黄轩剖面;b. 孤立囊状岩溶系统,茅二段,开县红园乡剖面;
c. 豹斑状岩溶系统,茅二段,涪陵老黄轩剖面;d. 豹斑状岩溶系统,茅二段,南川烟长沟剖面

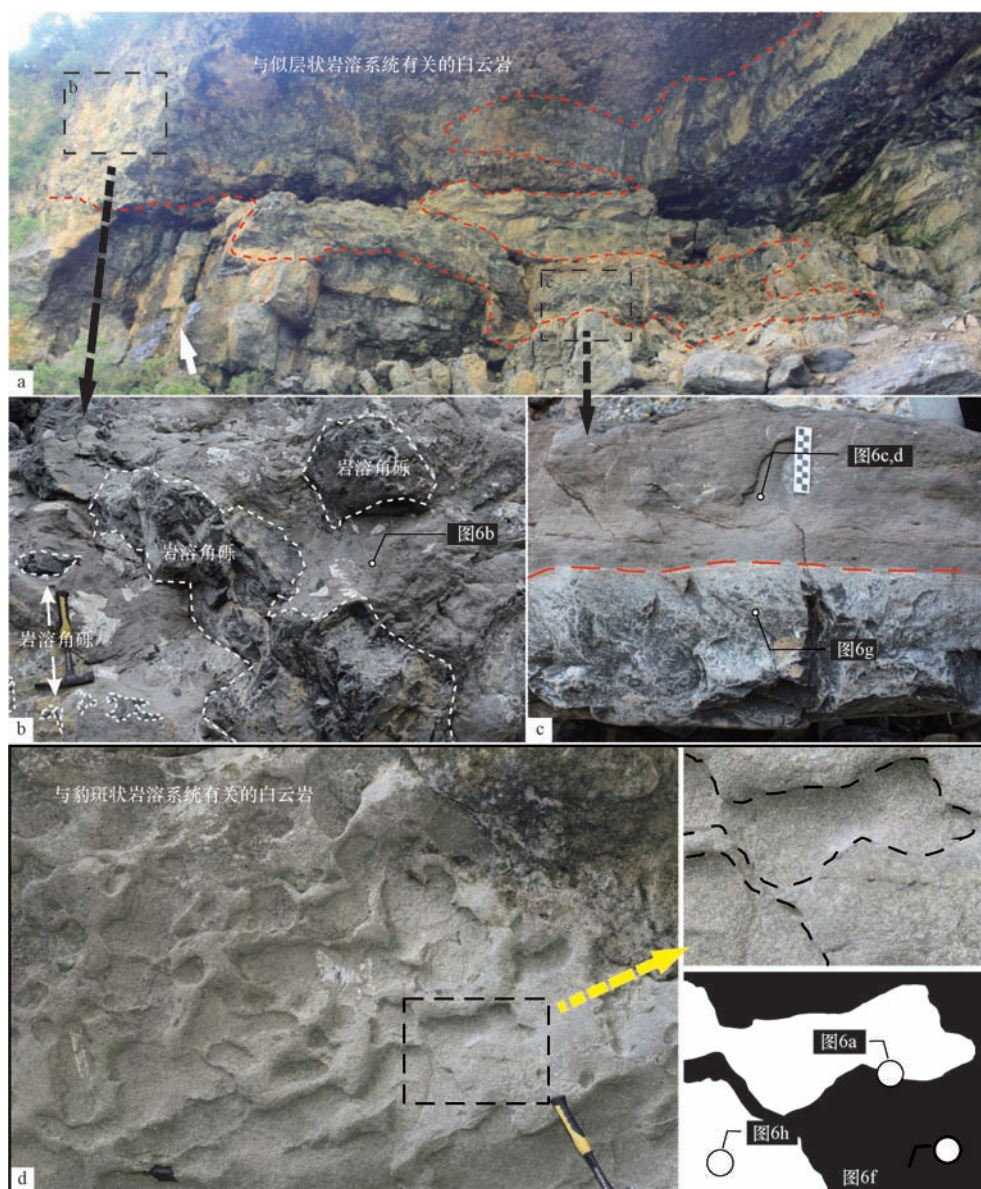


图3 四川盆地东部茅口组二段露头宏观特征

Fig. 3 Outcrop characteristics of the 2nd member of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

a. 似层状岩溶系统,岩溶系统内部云岩风化成土黄色;b. 图3a中似层状岩溶系统内垮塌的新鲜滚石,见岩溶角砾;c. 图3a中似层状岩溶系统洞壁附近垮塌的新鲜滚石,上部为岩溶系统内部充填物,地下暗河沉积,下部为致密隔水层;d. 豹斑状岩溶系统,差异性风化,凸处为岩溶系统内部充填物,凹处为基质灰岩部分

隙直径小于白云石晶体大小,多介于 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。部分晶间孔受酸性流体进一步扩溶,原本晶面平直的白云石晶体形态变得不规则,形成晶间溶孔(图5h—i,图6b,图6e—f),致使岩心及露头上多见典型的针孔状特征,部分晶间溶孔直径大于白云石晶体大小可达 $800 \mu\text{m}$,晶间(溶)孔常为沥青侵染。此外,溶洞也是十分重要的储集空间类型之一,大量岩心、露头 and 镜下资料表明,溶洞以小洞为主(图5d, e),中洞次之,洞径多介于 $5 \sim 20 \text{ mm}$ 。同时,裂缝对岩溶系统内的硅质白云岩及云质硅岩而言主要起到提高渗透率的作用(图5d, f, i),部分裂缝现已被方解石或沥青等半—全充填(图5d, f)。

2.3 储层物性特征

通过对研究区 11 口单井及 4 条野外剖面共计 93 个白云岩及云质硅岩样品的孔渗数据进行分析处理(图8),发现其孔隙度和渗透率均较低。其中,孔隙度最小值为 0.07% ,最大值为 9.43% ,平均值为 1.24% ,孔隙度小于 2% 为样品频率分布的主体范围,占样品总数的 84.9% 。渗透率最小值趋于 0,最大值仅 $1.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占到 55.6% ,渗透率在 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的样品占样品总数的 28.4% ,位于 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内的样品占 14.8% ,渗透率大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占 1.2% 。

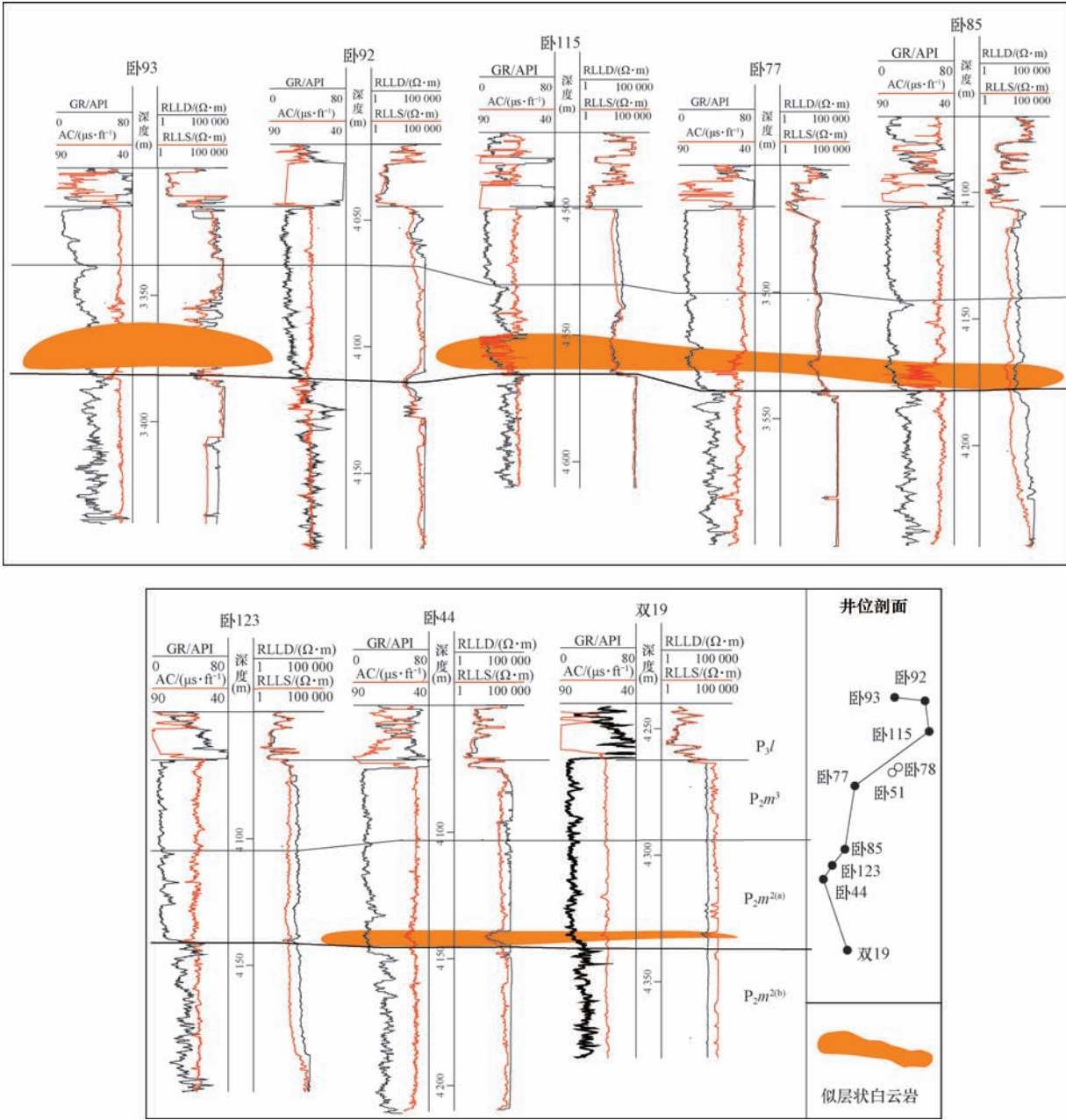


图 4 四川盆地东部卧龙河地区 $P_2m^{2(a)}$ 似层状白云岩井位剖面

Fig. 4 Well correlation of quasi-stratiform dolomites of $P_2m^{2(a)}$ in Wolonghe area in eastern Sichuan Basin

P_3l . 上二叠统龙潭组; P_2m^3 . 中二叠统茅口组三段; $P_2m^{2(a)}$. 中二叠统茅口组二段 a 亚段; $P_2m^{2(b)}$. 中二叠统茅口组二段 b 亚段

为了更好地反映储层的储集物性特征,利用白云岩及云质硅岩小直径样品的孔隙度、渗透率值进行了交会图绘制(图 9)。从图中可见,样品孔渗数据点具明显集中分布特征,可总体分为 3 个主要区域。其中, A 区包括所有晶粒白云岩样品点及部分硅质云岩样品点,表现出低孔高渗的渗流特征,反映白云岩储集性能较差,渗滤能力主要依靠裂缝沟通的特点。B 区硅质白云岩及云质硅岩样品点渗透率随孔隙度增加而增加,表现出孔隙型的储层特征,储集空间应主要为稳定发育的晶间(溶)孔。而对于 C 区孔隙度较高的有限硅质云岩及云质硅岩样品点而言,渗透率不随孔隙度

的增大而增大,总体表现为孔隙较孤立、连通性差的特征,这主要与部分硅质云岩及云质硅岩小直径样品中发育孤立的小型溶洞有关,若无裂缝的沟通难以成为有效储层。

需要注意的是,小直径样品孔渗分析结果并不具有全岩代表性,难以准确表征岩溶缝洞型储层的物性特征。观察发现,对于研究区茅口组而言,小直径样品中孔隙型、孤立孔洞型白云岩或云质硅岩还原到更宏观的尺度上,多数为裂缝沟通。综合认为川东地区茅口组储层类型主要为裂缝-孔洞型储层。

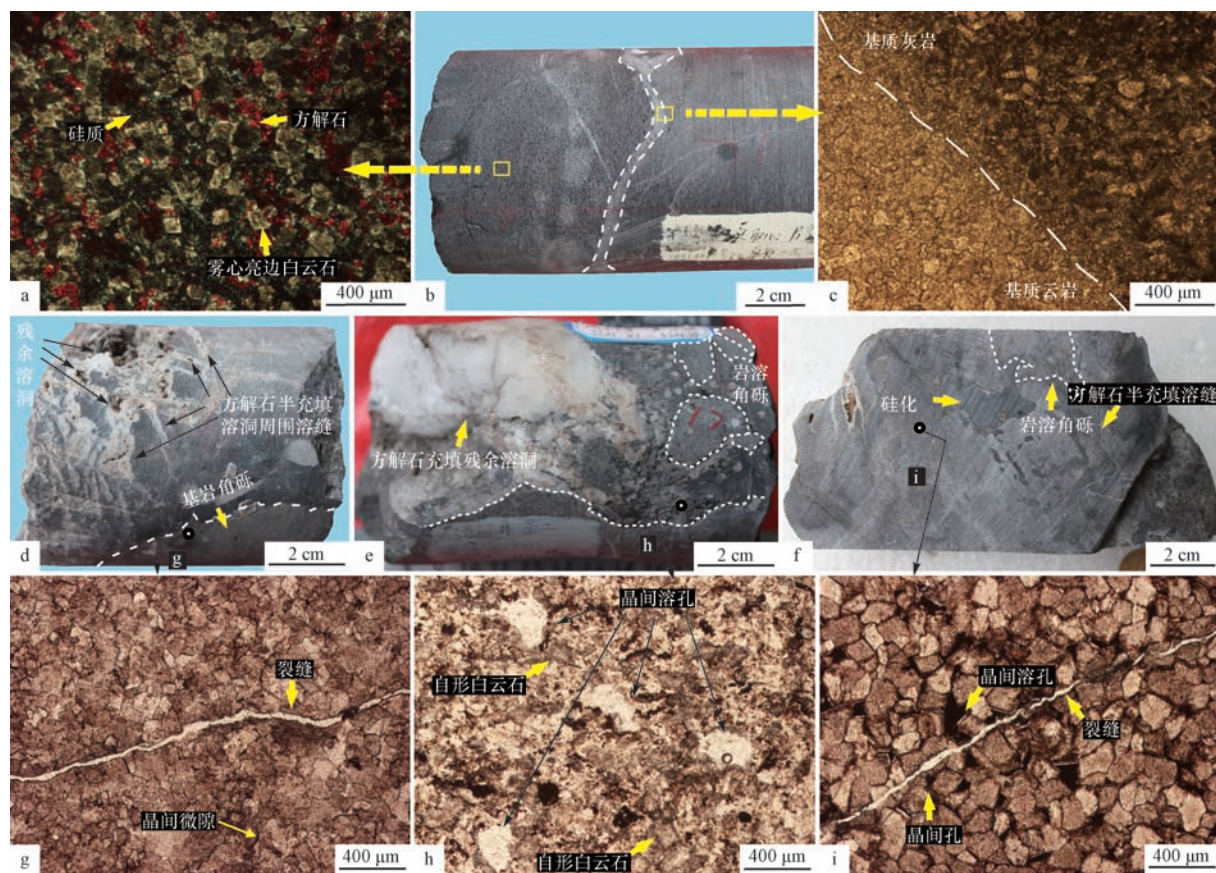


图5 四川盆地东部茅口组白云岩储层岩心宏观和微观特征

Fig. 5 Macroscopic and microscopic characteristics of the dolomite cores of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

a. 岩溶系统中硅质云岩,成岩序列:白云石、硅质、无铁方解石,埋深2 861.00~2 861.08 m,茅三段,池6井;b. 左为岩溶系统内部疏松多孔,中为岩溶系统洞壁晶粒云岩,右为基岩部分,埋深2 861.00~2 861.08 m,茅三段,池6井;c. 左下为岩溶系统洞壁晶粒云岩,白云石呈他形镶嵌状接触,右上为基岩部分,生屑灰岩,埋深2 861.00~2 861.08 m,茅三段,池6井;d. 岩溶系统充填段,见残余溶洞及方解石半充填溶缝,岩溶角砾发育,埋深3 319.09~3 319.52 m,茅二段,池67井;e. 岩溶系统充填段,见方解石充填残余溶洞,岩溶角砾发育,埋深3 321.27~3 321.39 m,茅二段,池67井;f. 岩溶系统充填段,见方解石半充填溶缝及硅化团块,埋深3 648.00~3 648.10 m,茅二段,卧78井;g. 基岩角砾,晶粒云岩,晶粒呈他形镶嵌状,裂缝发育,埋深3 319.09~3 319.52 m,茅二段,池67井;h. 岩溶系统内部云质硅岩,硅质交代白云石,晶型模糊难辨,见少量自形白云石,晶间溶孔发育,埋深3 321.27~3 321.39 m,茅二段,池67井;i. 岩溶充填段,白云岩晶间(溶)孔、裂缝发育,晶间(溶)孔被沥青充填,埋深3 648.00~3 648.10 m,茅二段,卧78井

3 储层控制因素与发育规律

3.1 颗粒滩相为储层形成提供了物质基础

沉积相是储层形成的基础和先决条件,具体表现为不同沉积相下形成的各岩石类型是后期成岩改造的物质基础,不同岩石类型受后期成岩改造的程度各不相同,因此,沉积相在区域上控制着优质储层的分布^[10,22-23]。对于碳酸盐岩而言,浅埋藏期是胶结作用最活跃的阶段,这时各岩类中均存在大量的孔隙,孔隙流体交换活跃,沉积物在经历浅埋藏期胶结作用后会完全固结成岩^[24]。低能相带下沉积的细结构碳酸盐岩多因浅埋藏期的强烈压实和胶结作用,基质孔几乎消失殆尽,形成相对致密层。而颗粒滩相沉积的粗结构碳酸盐岩即使经历浅埋藏期固结成岩后仍会存有大

量残余粒间孔,进而表现为相对高孔层的特征^[24]。碳酸盐岩台地沉积垂向叠置由多个向上变浅的米级旋回构成,单个旋回下部为低能细结构碳酸盐岩、上部为高能粗结构碳酸盐岩,故在经历浅埋藏期后,最终会在垂向上表现出由低能细结构碳酸盐岩构成的致密层和由高能粗结构碳酸盐岩构成的高孔层多旋回叠置的特点^[25]。其中,高能颗粒岩中尚存的大量基质孔可作为后期成岩流体进一步改造的输导体系^[12,18,21,26-27]。

从研究区研究层位实际情况来看,颗粒灰岩受后期成岩改造程度明显高于致密的泥晶灰岩。以研究区一口垂向序列发育最典型的取心井(月005-H1)为例(图10),该井存在多套泥晶灰岩与颗粒灰岩垂向叠置的旋回,单个旋回底部滩间海亚相的泥晶灰岩由于初期压实和胶结致密化,成岩流体输导体系相对缺乏的缘故,多以不发育或仅发育小型溶沟为特征。与之相较,单个旋回上部台内滩亚相的颗粒灰岩受岩溶作

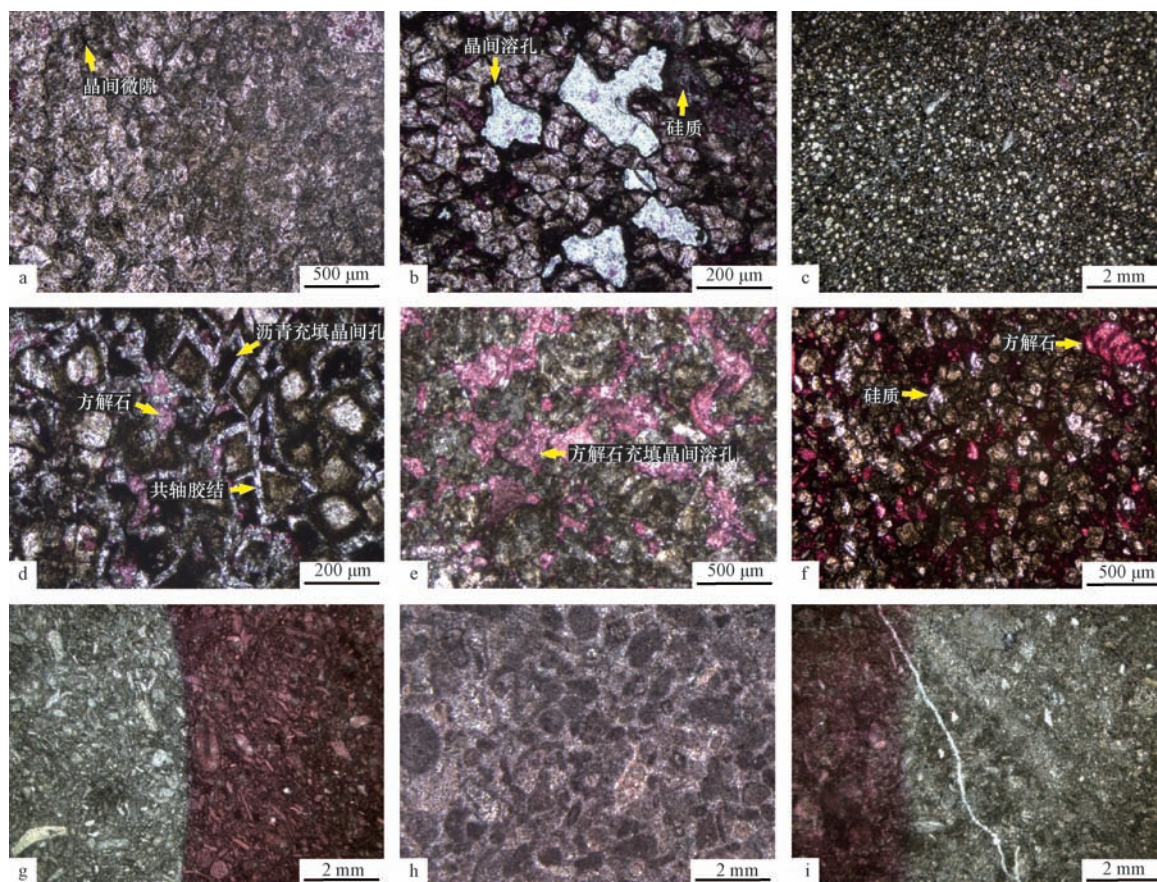


图6 四川盆地东部开县红园乡剖面茅口组二段镜下微观特征

Fig. 6 Microscopic characteristics of the 2nd member of the Maokou Formation in Hongyuan, Kaixian in eastern Sichuan Basin

a. 豹斑状岩溶系统周缘致密的晶粒云岩(基岩云化); b. 似层状岩溶系统内角砾间硅质云岩, 晶间孔和晶间溶孔发育, 部分被沥青充填; c, d. 似层状岩溶系统内白云岩, 白云石自形程度高, 具共轴胶结现象, 晶间孔发育, 见方解石及沥青充填; e. 孤立囊状岩溶系统内白云岩, 晶间溶孔充填方解石; f. 豹斑状岩溶系统内部的硅质云岩, 白云石间见硅质及方解石充填, 残余晶间(溶)孔见沥青侵染; g. 似层状岩溶系统底部致密隔水层(生屑泥晶灰岩); h. 豹斑状岩溶系统洞壁基岩部分(亮晶生屑灰岩); i. 孤立囊状岩溶系统洞壁基岩(泥晶灰岩)

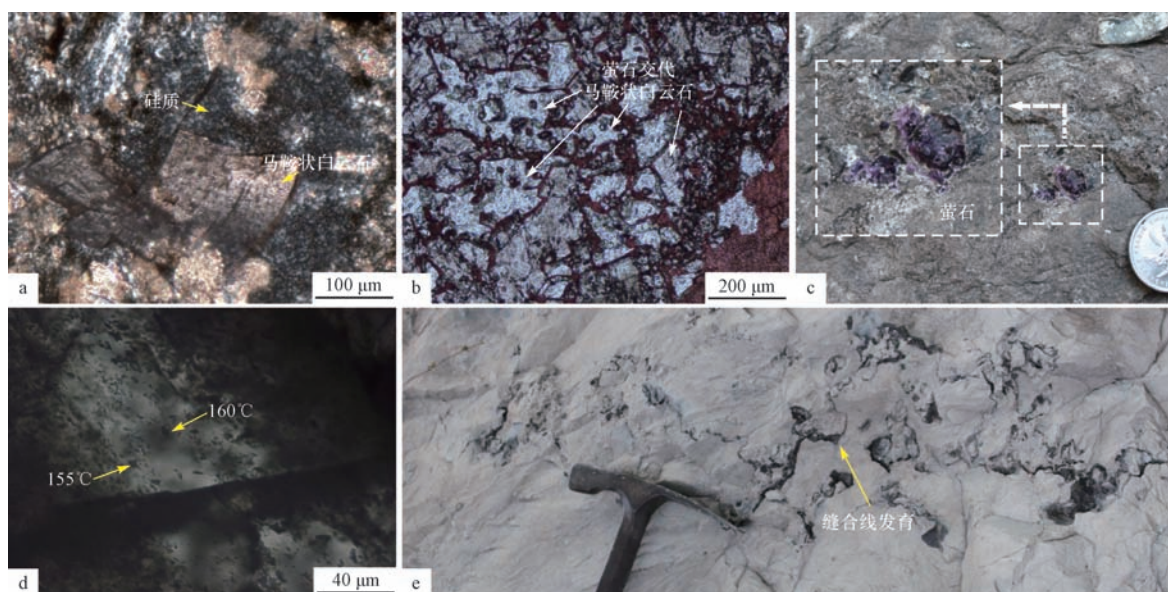


图7 四川盆地东部茅口组白云岩宏观和微观特征

Fig. 7 Macroscopic and microscopic characteristics of dolomites of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

a. 岩溶系统中鞍状白云石, 具波状消光, 茅二段, 石柱冷水溪剖面; b. 岩溶系统中鞍状白云石被大量萤石交代, 茅二段, 武隆江口剖面; c. 岩溶系统内见大量紫色萤石, 茅二段, 开县红园乡剖面; d. 岩溶系统内白云石的包裹体均一温度, 茅三段, 涪陵老黄钡剖面; e. 灰岩中发育大量压溶缝, 茅二段, 涪陵老黄钡剖面

表 1 四川盆地东部茅口组储集空间类型划分

Table 1 Reservoir space types of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

储集空间类型			主要储集岩石类型	发育频率	分布层位
孔隙	原生孔隙	残余粒间孔	云化的高能颗粒岩基岩	中	茅三段、茅二段
		粒间溶孔	溶洞充填物形成的灰岩或硅质云岩	中	茅三段、茅二段
	次生孔隙	生物体腔孔	生物格架灰岩	低	茅三段、茅二段
		晶间孔	晶粒云岩、溶洞充填物形成的硅质云岩	高	茅三段、茅二段
		晶间溶孔	溶洞充填物形成的硅质云岩	高	茅三段、茅二段
裂缝	构造裂缝		不限	低	茅口组
	溶蚀裂缝		不限	高	
洞穴	次生洞穴	溶洞	颗粒灰岩、溶洞充填物形成的硅质云岩	高	茅三段、茅二段
			泥晶灰岩、泥质灰岩	中	茅二段、茅一段

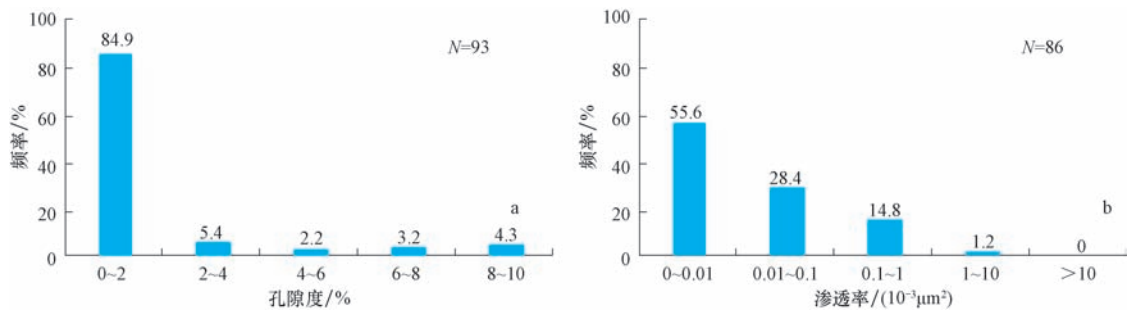


图 8 四川盆地东部中二叠统茅口组储层孔隙度和渗透率直方图

Fig. 8 Histogram of porosity and permeability of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

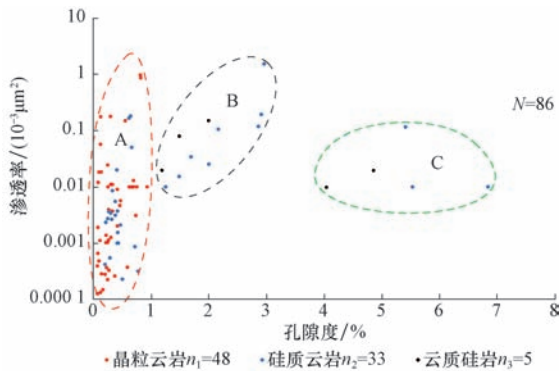


图 9 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩孔 - 渗交会图

Fig 9 Cross-plot of porosity and permeability of dolomites and dolomitic quartzite of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

(A 区为晶粒白云岩样品点及部分硅质云岩样品点,表现出低孔高渗的渗流特征;B 区为部分硅质白云岩及云质硅岩样品点,表现出孔隙型的储层特征;C 区为少量硅质云岩及云质硅岩样品点,表现出孔隙较孤立、连通性差的特征。)

用改造则十分强烈,岩溶系统发育规模明显大于致密的泥晶灰岩。不仅如此,区内野外露头及其对应的薄片资料也同样证实了这种沉积物质基础差异导致后期成岩改造差异的现象。从宏观不同类型岩溶系统所发育的宿主基质灰岩岩性来看,似层状岩溶系统中充填物层理明显(图 3c),反映为典型的地下暗河沉积充填物,受岩性致密的泥晶灰岩致密层阻挡(图 3c,图 6g)。

该层受岩溶作用改造较彻底,基质颗粒灰岩溶蚀殆尽,泥晶灰岩致密层则基本未受岩溶影响,控制着似层状岩溶系统纵向规模。豹斑状岩溶系统的溶蚀程度相较于似层状岩溶系统更弱,现仍残余大量宿主基质灰岩,基岩与充填物之间呈现出豹斑状交织的特征(图 3e)。基岩为典型的亮晶颗粒灰岩(图 6h),是颗粒滩相沉积产物。此外,规模最小、占比最少的孤立囊状岩溶系统主要发育于致密泥晶灰岩中(图 2b,图 6i),主要与泥晶灰岩内裂缝局部扩溶有关,但整体受岩溶改造较弱。

综合上述,可见研究区茅口组与岩溶系统密切相关的白云岩及硅质云岩储层的发育受控于沉积相,具体表现为颗粒滩相是受后期成岩改造最有利的相带,为储层的形成提供了物质基础。

3.2 早成岩期层控型风化壳岩溶是优质储层形成的关键

通过对研究区茅口组岩溶作用的综合分析,可以认为茅口组岩溶作用发生时间应该在沉积物经历浅埋藏期浅度成岩以后,为典型的早成岩期层控型风化壳岩溶作用,具有鲜明的岩性分异特征^[28]。具体表现为,在泥晶岩类致密层与颗粒岩类高孔层垂向叠置的旋回中,由于颗粒岩类高孔层流体输导体系远远优于泥晶岩类致密层,岩溶水会优先选择对高孔层进行溶蚀改造,而以泥晶灰岩为代表的相对致密层在岩溶过程中存在一定的隔水作用。在溶蚀作用的过程中,受

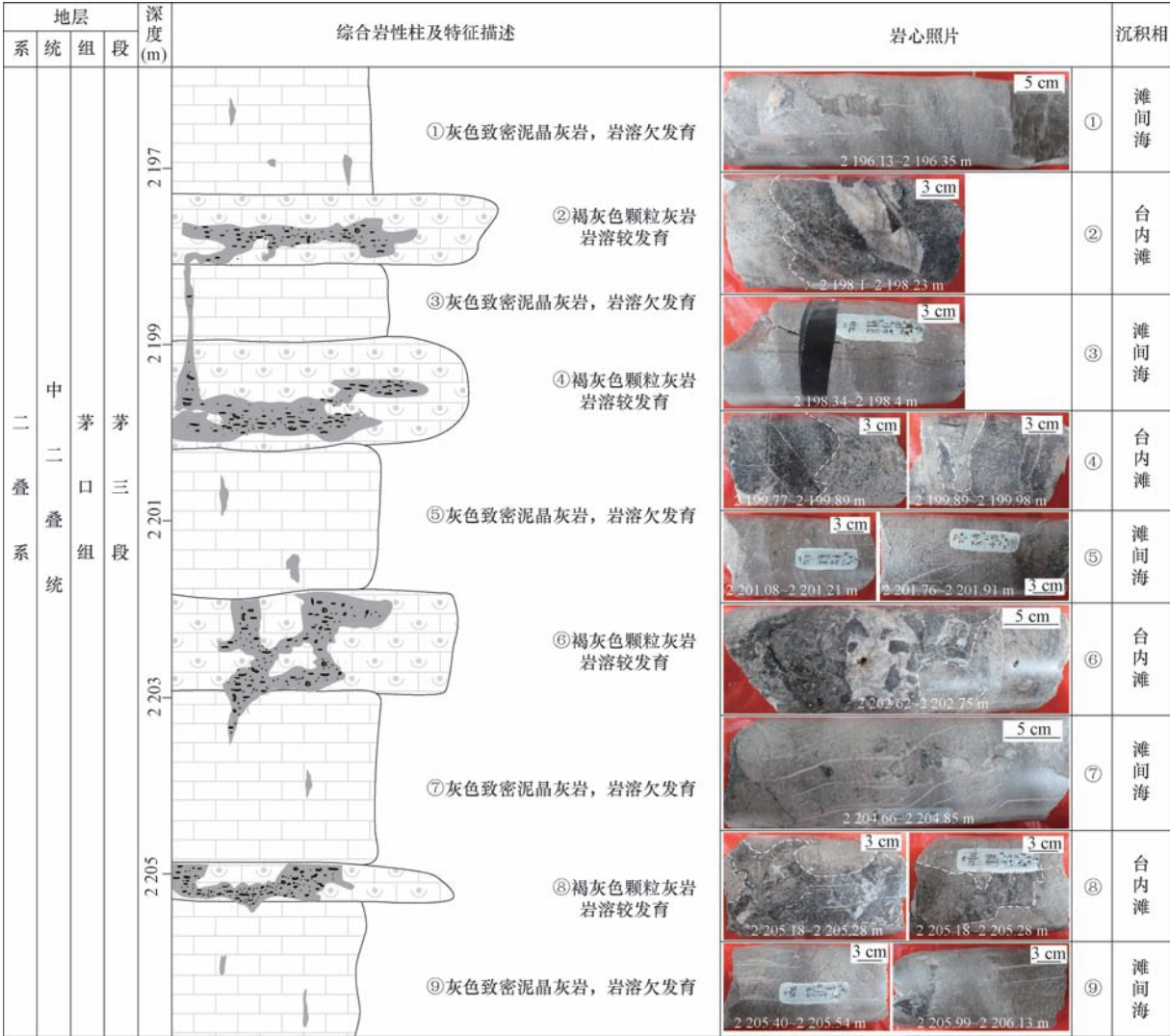


图 10 四川盆地东部月 005 - H1 井单井地层综合柱状图
Fig. 10 Stratigraphic column of Well Yue 005-H1 in eastern Sichuan Basin

致密层的阻挡,岩溶水将在其之上的颗粒岩高孔层中沿趋势面以散流或漫流形式运动,并溶蚀扩大孔洞层,这种溶蚀改造甚至可造成较大型层状岩溶系统的形成。当单个旋回的泥晶岩类所形成的隔水层被击穿后或存在断裂、裂缝系统时,岩溶水的运动方式将更趋复杂化,岩溶水将顺着隔水层中的击穿通道、断裂、裂缝系统向下运移进入下部垂向旋回的高孔层中,呈现沿多个趋势面运动的特点,最终导致水平潜流带及垂直渗流带界线模糊,在水平潜流带及垂直渗流带皆具有水平层状溶蚀及垂直渗流状溶蚀交织发育的特征(图 11)。

当下伏隔水层较厚时,在隔水层之上易发育规模较大、层位稳定的似层状岩溶系统^[28]。对于茅口组而言,厚度规模较大的茅一段作为隔水层,使茅二段极易发育较大规模的似层状岩溶系统^[29]。如区内红园乡剖面茅二段下部发育有似层状的白云岩(图 3a),其具有典型的穿层性(图 3a)、穿层洞穴角砾岩(图 3b)、囊状溶洞(图 2b),结合茅二段顶部(该剖面已剥至茅二段)的网状豹斑岩溶系统(图 3d),不难判识其表生岩

溶成因。同样,在区内的卧龙河气田地区,100 余口井中若出现白云岩储层,也多出现于层位稳定的相对高伽层之上的茅二段 a 亚段(图 4)。从对比图上发现,各井的白云岩发育层位和规模存在一定的差异,总体具似层状特征。取心分析也表明,白云岩存在穿层(图 5b)和洞穴角砾(图 5e)等典型的与岩溶系统相关特征。综合上述特征发现,茅二段白云岩的发育与岩溶密切相关,其可能为厚度规模较大的茅一致密层作为隔水层,使似层状岩溶易发育于茅二段,并由于岩溶系统作为后期热液通道而形成似层状白云岩。

值得注意的是,在岩溶作用发生的过程中,因相对浅度成岩的高能颗粒灰岩受岩溶水的影响较易离散,离散所形成的大量碳酸盐岩砂、砾等物质便成为最直接的岩溶系统充填物。当岩溶改造完成后,储渗体空间分布便已基本定型,此时的岩溶系统充填物表现出疏松多孔、多洞的特征(图 11a),并由于极易充填的特征导致钻探过程中出现较少的井漏和放空^[28]。岩溶系统充填物间大量的孔洞可为后期白云岩化作用过程

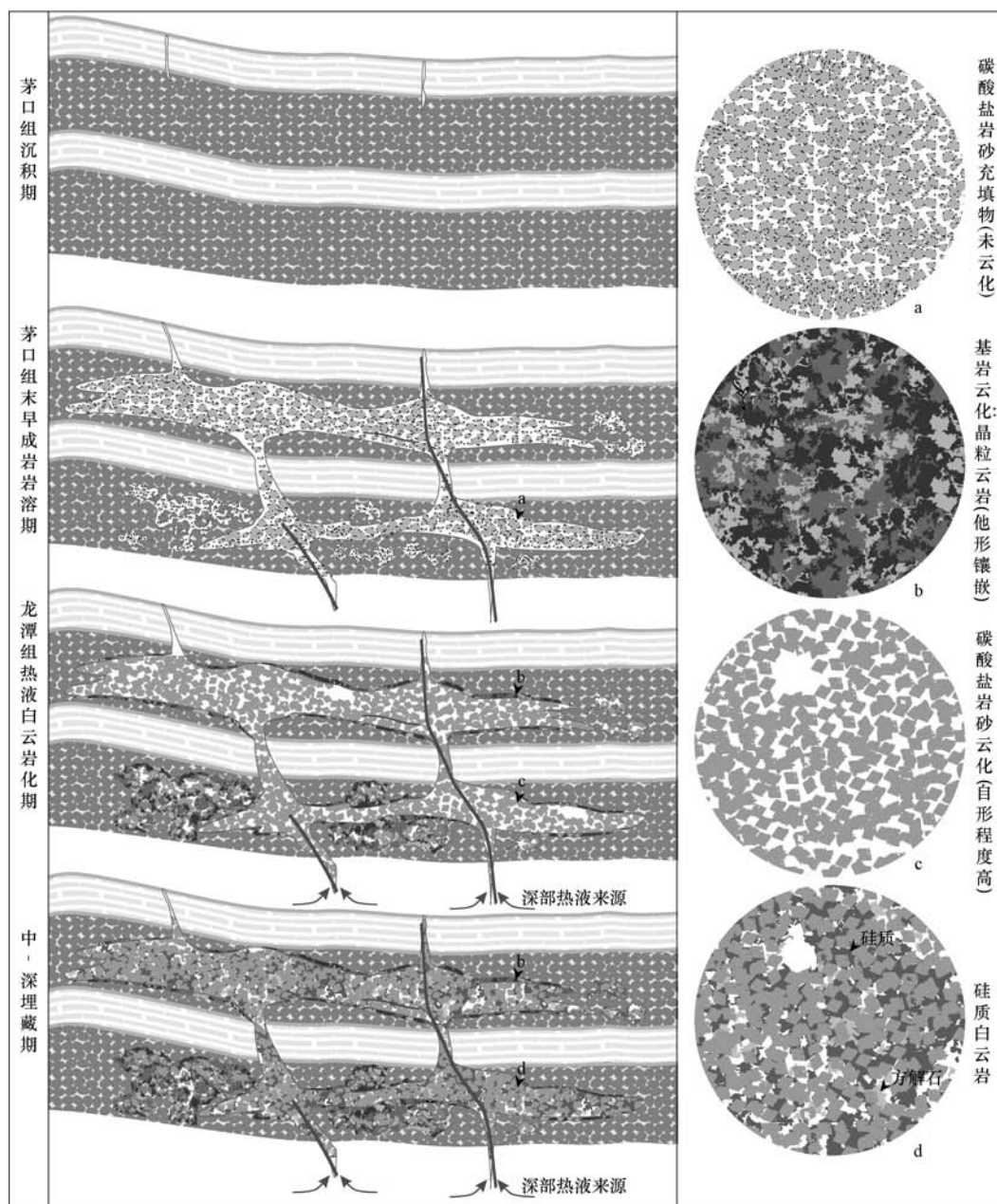


图11 四川盆地东部茅口组成岩演化模式

Fig. 11 Model of diagenesis evolution of the Maokou Formation in eastern Sichuan Basin

提供基本的充填空间和渗流通道。

综合上述,可见早成岩期层控型风化壳岩溶为区内茅口组创造了最直接的孔洞条件,是区内茅口组优质白云岩类储层形成的关键原因。

3.3 热液白云岩化作用有利于储层的保存

白云岩化是碳酸盐岩储层形成的重要影响因素。在研究区,茅口组白云岩化的时间在晚二叠龙潭期的峨眉地裂运动期间,主要证据有三:①川东地区茅口组白云岩储集体宏观展布明显受控于岩溶系统(图3),这种成岩作用的先后关系表明,具有优质储渗性能的白云岩体形成时间必然晚于茅口末期岩溶作用的发生时期;②根据白云石与沥青的充填关系(图5i,图6b—

d),发现白云石晶间为沥青充填,这一事实可以说明白云岩形成的时间应早于油气大规模生成的时间,前人研究表明茅口组储层内油气充注时间为中三叠世^[29-30],所以白云岩化时间应早于此;③区域上整个上扬子地台在二叠纪发生了对本区具有重要影响的峨眉山裂运动,晚二叠世峨眉山玄武岩喷发达到高潮^[31-32],强烈的火山岩浆作用和地幔活动一方面能直接分异出大量的热液流体,另一方面能对岩层周围地层流体进行“烘烤加热”将其改造成热液流体^[33],可见研究区具备热液白云岩形成的基本构造背景和热力条件。因此,综合白云岩产状、白云岩中含沥青以及区域构造背景这3个条件基本可以确定白云岩化作用时间为晚二叠世龙潭期。

同时,对岩溶系统内白云石进行了包裹体测温,发现样品的包裹体均一化温度平均为 157.5℃(图 7d),结合前人对四川盆地东部古地温的研究^[34-35],取平均地温梯度值 25℃/km,地表常温 20℃,在正常地热增温的情况下,只有当埋深达到 5 500 m 时才能满足白云石形成条件。显然从云化发生的时间(晚二叠世龙潭期)来看,当时的茅口组不可能满足此埋深条件。若非外来热事件的影响,将难以解释埋深与白云石形成温度之间的矛盾^[36]。进一步结合野外及镜下所发现的岩溶系统充填物中伴生的热液矿物如萤石(图 7b,c)和马鞍状白云石(图 7a,b)等可以初步推断,在早成岩期层控型风化壳岩溶系统建造基本完成后,地下高温云化流体具有沿深大断裂向上进入茅口组地层,并受岩溶系统疏松充填物之间的优势运移通道控制,发生差异白云岩化作用,最终导致岩溶系统充填物及部分岩溶系统洞壁基质灰岩的云化(图 11b,c)。

白云岩形成后,在地层持续埋藏的过程中,比灰岩的抗压能力更强,相对受压实和压溶作用的影响更小,白云岩体在深埋藏环境下的抗压作用有利于早期孔隙保存^[24,26,37-38]。一般来说,压实和压溶作用不仅使储层储集空间减少,并且压溶作用产生的富钙流体还可能在周围孔隙中沉淀并对储层造成更加严重的损害^[10,39]。鉴于现已初步推断白云岩化作用发生于龙潭期,此时茅口组埋深应仅几百米,大量孔隙尚未被破坏,此时的白云岩化作用形成的抗压溶格架为茅口组继续埋藏保存孔隙提供了保障,区内茅口组灰岩大量发育缝合线而白云岩基本不发育缝合线便是最直观的证据(图 7e)。综上所述,研究区内白云岩化对储层的建设性作用表现为深埋藏条件下的抗压实作用,进而保存更多残余原始空间。

3.4 硅质热液活动与后期的方解石胶结充填了部分孔隙

从成岩作用的先后顺序来看,岩溶系统内充填物在经历热液白云岩化作用之后,接受硅质热液的侵位,硅质在白云石晶间沉淀并交代早期白云石,随 SiO₂ 的消耗, SiO₂ 变得不饱和,胶结交代作用终止(图 5a,图 5h,图 6b—f,图 11d),形成区内较有特色的硅质云岩或云质硅岩。此时硅质云岩或云质硅岩仍可残余部分晶间孔,镜下可见这些残余的晶间孔后期进一步被方解石胶结充填,部分方解石甚至交代白云石与硅质(图 5a,图 6b—f,图 11d)。此外,方解石胶结对储层的影响还体现在对部分裂缝的充填,降低裂缝的储渗能力(图 5d,f)。值得注意的是,硅质热液活动和后期的方解石胶结作用与两类建设性的成岩作用(岩溶作用和

白云岩化作用)具有相似之处,硅质热液活动与后期的方解石胶结作用同样具有明显的成岩组构选择性。对于岩溶系统洞壁云化的致密基岩而言,由于该类岩性先天致密,流体疏导体系较缺乏,除裂缝发育部分,基本未受硅质热液和方解石胶结的影响。

总之,硅质热液活动与后期的方解石胶结充填了部分晶间(溶)孔及裂缝,使得岩石结构更为致密,对储层主要起破坏作用。

综合以上几点储层控制因素,认为研究区茅口组先后经历了如下成岩作用。沉积物在经历了浅埋藏期胶结浅度成岩之后,受东吴运动抬升暴露的影响,形成了典型的早成岩期层控型风化壳岩溶系统并充填大量疏松的碳酸盐岩砂,进一步的构造热液活动使充填物云化,随后硅质热液在白云石晶间孔间胶结并交代白云石,而最晚期的方解石继续在这些残余的晶间孔中胶结充填,最终形成了研究区茅口组独具特色的白云岩及云质硅岩储层。早成岩期层控型岩溶作用及热液白云岩化作用为建设性的成岩作用,而硅质及方解石胶结交代作用为破坏性的成岩作用。

4 结论

1) 四川盆地东部地区茅口组发育了独具特色的白云岩(硅质云岩)及硅质岩(云质硅岩)类储层,其分布受控于似层状、孤立囊状或豹斑状岩溶系统。岩溶系统内部硅质白云岩白云石晶体多呈半自形—自形菱面体,部分为马鞍状,当硅化作用较强时可形成云质硅岩。储集空间以晶间孔、晶间溶孔及小型溶洞为主,伴随裂缝沟通,储集性能好,属于裂缝—孔洞型储层。

2) 储层发育遵循“相控岩溶”的规律,颗粒滩相为储层形成提供了物质基础,早成岩期层控型风化壳岩溶是优质储层形成的关键,热液白云岩化作用有利于储层的保存,硅质热液活动与后期的方解石胶结充填了部分孔隙,最终形成了盆地独具特色的硅质白云岩和云质硅岩储层。

3) 区域天然气勘探建议在注重“断控热液”型储层的基础上,进一步加强对“相控岩溶”的分析,找准目标。未来对白云岩及硅质岩储层成因的研究建议进一步细化岩石学和地球化学特征研究,以使认识更为全面客观。

致谢:审稿专家与编辑老师提出宝贵建议,诚挚谢忱!

参 考 文 献

- [1] 陈轩,赵文智,张利萍,等. 川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义[J]. 石油学报,2012,33(04):562-569.
Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Zhang Liping, et al. Discovery and explora-

- tion significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(04): 562–569.
- [2] 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. *矿物岩石*, 2007, 27(04): 78–84.
Zheng Rongcai, Hu Zhonggui, Feng Qingping, et al. Genesis of dolomite reservoir of the Changxing Formation of Upper Permian, north-east Sichuan Basin[J]. *J. Mineral Petrol*, 2007, 27(04): 78–84.
- [3] 李毅, 沈浩, 石学文, 等. 川东—川中地区茅口组白云岩成因初探及“热次盆”概念的提出[J]. *天然气勘探与开发*, 2013, 36(04): 1–3, 29.
Li Yi, Shen Hao, Shi Xuewen, et al. Distribution and origin of dolomites in Maokou Formation, eastern and central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2013, 36(04): 1–3, 29.
- [4] 舒晓辉, 张军涛, 李国蓉, 等. 四川盆地北部栖霞组—茅口组热液白云岩特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(03): 442–448, 458.
Shu Xiaohui, Zhang Juntao, Li Guorong, et al. Characteristics and genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(03): 442–448, 458.
- [5] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶古地貌及勘探选区[J]. *石油学报*, 2012, 33(06): 949–960.
Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Paleokast landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(06): 949–960.
- [6] 刘树根, 黄文明, 陈翠华, 等. 四川盆地震旦系—古生界热液作用及其成藏成矿效应初探[J]. *矿物岩石*, 2008, 28(03): 41–50.
Liu Shugen, Huang Wenming, Chen Chuihua, et al. Primary study on hydrothermal fluids activities and their effectiveness on petroleum and mineral accumulation of sinian system-palaeozoic in Sichuan Basin[J]. *J. Mineral Petrol*, 2008, 28(03): 41–50.
- [7] 金振奎, 冯增昭. 滇东—川西中二叠统白云岩的形成机理——玄武岩淋滤白云化[J]. *沉积学报*, 1999, 17(03): 383–389.
Jin Zhenkui, Feng Zengzhao. Origin of Dolostones of the Lower Permian in East Yunnan—West Sichuan—Dolomitization through Leaching of Basalts[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(03): 383–389.
- [8] 何幼斌, 冯增昭. 四川盆地及其周缘下二叠统细—粗晶白云岩成因探讨[J]. *江汉石油学院学报*, 1996, 18(04): 15–20.
He Youbin, Feng Zengzhao. Origin of fine-to coarse-grained dolostones of Lower Permian in Sichuan Basin and its peripheral regions[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 1996, 18(04): 15–20.
- [9] 张荫本. 四川盆地二叠系中的白云化[J]. *石油学报*, 1982, 01: 29–33, 101–102.
Zhang Mengben. Dolomitization in Permian rocks in Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 01: 29–33, 101–102.
- [10] 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.
- [11] 汪华, 沈浩, 黄东, 等. 四川盆地中二叠统热水白云岩成因及其分布[J]. *天然气工业*, 2014, 34(09): 25–32.
Wang Hua, Shen Hao, Huang Dong, et al. Origin and distribution of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(09): 25–32.
- [12] 陈轩, 赵文智, 刘银河, 等. 川西南地区中二叠统热液白云岩特征及勘探思路[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 460–466.
Chen Xuan, Zhao Wenzhi, Liu Yinhe, et al. Characteristics and exploration strategy of the Middle Permian hydrothermal dolomite in southwestern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 460–466.
- [13] 宋文海. 四川盆地二叠系白云岩的分布及天然气勘探[J]. *天然气工业*, 1985, 5(04): 22–23 + 16 + 6.
Song Wenhui. Distribution of Permian Dolomite and Natural Gas Exploration in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1985, 5(04): 22–23, 16, 6.
- [14] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. *石油学报*, 2009, 30(5): 698–704.
Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 34(09): 25–32.
- [15] 陈洪德, 张成弓, 黄福喜, 等. 中上扬子克拉通海西—印支期(泥盆纪—中三叠世)沉积层序充填过程与演化模式[J]. *岩石学报*, 2011, 27(08): 2281–2298.
Chen Hongde, Zhang Chengong, Huang Fuxi, et al. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Hercynian-Indosinian (Devonian-Middle Triassic). *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(08): 2281–2298.
- [16] 向娟, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 四川盆地中二叠统茅口组沉积相分析[J]. *石油地质与工程*, 2011, (01): 14–19 + 141–142.
Xiang Juan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2011, (01): 14–19, 141–142.
- [17] 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 45–55.
Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Wei Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 45–55.
- [18] 罗静, 胡红, 朱遂珩, 等. 川西北地区下二叠统茅口组储层特征[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(3): 39–47.
Luo Jing, Hu Hong, Zhu Suihui, et al. Characteristics of Lower Permian Maokou Reservoir in northwest of Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(3): 39–47.
- [19] 郭旭升, 李宇平, 魏全超. 川东南地区茅口组古岩溶发育特征及勘探领域[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(6): 1–8.
Guo Xusheng, Li Yuping, Wei Quanchao. Palaeokarst Reservoirs and Exploration Areas of Maokou Formation in the Southeast of Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2012, 34(6): 1–8.
- [20] 苏成鹏, 唐浩, 黎虹玮, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组顶部钙结壳的发现及其发育模式[J]. *古地理学报*, 2015, 17(2): 229–240.
Su Chengpeng, Tang Hao, Li Hongwei, et al. Discovery of caliches at top of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin and their development model[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(2): 229–240.
- [21] 肖笛, 谭秀成, 郝爱华, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组碳酸盐岩岩溶特征: 古大陆环境下层控型早成岩期岩溶实例[J]. *古地*

- 理学报,2015,17(4):457-476.
- Xiao Di,Tan Xiucheng,Xi Aihua,et al. Palaeokarst characteristics of carbonate rocks of the Middle Permian Maokou Formation in southern Sichuan Basin; Example of strata-bound eogenetic karst in palaeo-continental settings[J]. Journal of Palaeogeography,2015,17(04):457-476.
- [22] 施泽进,彭俊,王勇. 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):1-7.
- Shi Zejin,Peng Jun,Wang Yong,et al. 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):1-7.
- [23] 江兴福,杨雨,黄建章,等. 川东北地区飞仙关期沉积相对储层的控制作用[J]. 天然气工业,2003,23(03):141-143.
- Jiang Xingfu,Yang Yu,Huang Jianzhang,et al. The controlling effects sedimentary facies of Changxin Formation in northeast Sichuan,China have on reservoirs[J]. Natural Gas Industry,2003,23(03):141-143.
- [24] 张静,胡见义,罗平,等. 深埋优质白云岩储集层发育的主控因素与勘探意义[J]. 石油勘探与开发,2010,37(2):203-210.
- Zhang Jing,Hu Jianyi,Luo Ping,et al. Master control factors of deep high-quality dolomite reservoirs and the exploration significance[J]. JPetroleum Exploration and Development,2010,37(2):203-210.
- [25] 吴兴宁,赵宗举. 塔中地区奥陶系米级旋回层序分析[J]. 沉积学报,2005,23(02):310-315.
- Wu Xingning,Zhao Zongju. Analyses of Ordovician meter-scale cyclic-sequence in Tazhong area[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2005,23(02):310-315.
- [26] 洪海涛,杨雨,刘鑫,等. 四川盆地海相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 石油学报,2012,33(2):64-73.
- Hong Haitao,Yang Yu,Liu Xin,et al. The characteristics and development law of marine carbonate reservoirs in Sichuan Basin,China[J]. Acta Petrolei Sinica,2012,33(2):64-73.
- [27] 邵龙义,韩俊,马锋,等. 塔里木盆地东部寒武系白云岩储层及相控特征[J]. 沉积学报,2010,28(5):953-961.
- Shao Longyi,Han Jun,Ma Feng,et al. Palaeokarst reservoirs and exploration areas of Maokou Formation in the southeast of Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2010,28(5):953-961.
- [28] Xiao Di,Tan Xiucheng,Xi Aihua,et al. An inland facies-controlled eogenetic karst of the carbonate reservoir in the Middle Permian Maokou Formation, southern Sichuan Basin, Southwest China[J]. Marine and Petroleum Geology,2016,72:218-233.
- [29] 钟荣春. 川东储层沥青地球化学特征及成因[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- Zhong Rongchun. Geochemical behaviors and origin of reservoir bitumen in eastern Sichuan Basin[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2007.
- [30] 李任伟,吴俊,吴汉国. 四川南桐地区二叠系长兴组和茅口组灰岩中沥青的来源[J]. 地质科学,1992,(S1):178-189.
- Li Renwei,Wu Jun,Wu Hanguo. Study of sources of solid bitumens in limestones of Permian Maokou and Changxing groups in Nantong area,Sichuan province,China[J]. Scientia Geologica Sinica,1992,(S1):178-189.
- [31] 罗志立. 峨眉地裂运动和四川盆地天然气勘探实践[J]. 新疆石油地质,2009,30(4):419-424.
- Luo Zhili. Emei Taphrogenesis and Natural Gas Prospecting Practices in Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology,2009,30(4):419-424.
- [32] 刘树根,罗志立,庞家黎,等. 四川盆地西部的峨眉地裂运动及找气新领域[J]. 成都地质学院学报,1991,18(01):83-90.
- Liu Shugen,Luo Zhili,Pang Jiali,et al. The Emei Taphrogenesis and the new regions for searching gas in the western part of Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu College of Geology,1991,18(01):83-90.
- [33] 郑剑锋,沈安江,潘文庆,等. 塔里木盆地地下古生界热液白云岩储层的主控因素及识别特征[J]. 海相油气地质,2011,16(4):47-56.
- Zheng Jianfeng,Shen Anjiang,Pan Wenqing,et al. Key controlling factors and identification characteristics of Lower Paleozoic hydrothermal dolostone reservoirs in Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology,2011,16(4):47-56.
- [34] 王玮,周祖翼,郭彤楼,等. 四川盆地古地温梯度和中-新生代构造热历史[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,(04):606-613.
- Wang Wei,Zhou Zuyi,Guo Tonglou,et al. Early cretaceous-paleocene geothermal gradients and cenozoic tectono-thermal history of Sichuan Basin[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2011,(04):606-613.
- [35] 王艳飞,肖贤明. 四川盆地东北地区古地温梯度模拟[J]. 海相油气地质,2010,(04):57-61.
- Wang Yanfei,Xiao Xianming. An investigation of paleogeothermal gradients in the northeastern part of Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology,2012,34(6):1-8.
- [36] 兰叶芳,黄思静,袁桃,等. 茜素红染色技术应用于川西北中二叠统栖霞组豹斑灰岩流体包裹体测温研究[J]. 岩矿测试,2015,34(01):67-74.
- Lan Yefang,Huang Sijing,Yuan Tao,et al. The application of alizarin reds in the fluid-inclusion homogenization temperature measurement of carbonate rocks from the Middle Permian Qixia Formation,western Sichuan Basin[J]. Rock and Mineral Analysis,2015,34(01):67-74.
- [37] Sun. S. Q. Dolomite reservoirs: Porosity evolution and reservoir characteristics[J]. AAPG Bulletin,1995,79(2):186-204.
- [38] 张学丰,刘波,蔡忠贤,等. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J]. 地质科技情报,2010,29(03):79-85.
- Zhang Xuefeng,Liu Bo,Cai Zhongxian,et al. Dolomitization and Carbonate Reservoir Formation[J]. Geological Science and Technology Information,2010,29(03):79-85.
- [39] Heydari E. The role of burial diagenesis in hydrocarbon destruction and H₂S accumulation, Upper Jurassic Smackover Formation, Black Creek Field, Mississippi[J]. AAPG Bulletin,1997,81(1):26-45.

(编辑 张玉银)