

四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示

张宇¹, 曹清古², 罗开平², 李龙龙², 刘金连¹

(1. 中国石化油田勘探开发事业部, 北京 100728; 2. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

摘要:二叠系茅口组是四川盆地勘探时间最早、目前勘探活动最活跃的层系之一。茅口组气藏按其储层类型可以分为裂缝型、岩溶缝洞型、热液白云岩型、滩相白云岩型和泥灰岩型5类,以岩性气藏为主,在不同区带、不同组段气藏类型表现出差异多样化特征。在梳理前期茅口组勘探成果和分析不同类型气藏特点基础上,明确了台缘滩、台内滩和深缓坡等有利沉积相带与准同生期白云岩化作用、后期热液白云岩化作用、表生岩溶作用、褶皱和断裂等构造作用叠加形成多类型的储层,是四川盆地茅口组天然气富集的主要控制因素;指出相(貌)控岩溶缝洞型储层、滩相白云岩储层和茅口组一段泥灰岩储层具有连片大面积分布、储层品质好等特点,是未来主要的勘探领域,川东北和川南-川东南是茅口组勘探最有利地区,多种类型和多个领域叠合可以形成立体勘探格局。

关键词:气藏类型;储层;勘探领域;有利区带;油气藏勘探;茅口组;二叠系;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and enlightenment obtained

Zhang Yu¹, Cao Qinggu², Luo Kaiping², Li Longlong², Liu Jinlian¹

(1. Oilfield Exploration and Development Division, SINOPEC, Beijing 100728, China; 2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: The Permian Maokou Formation among the first batch of exploration targets is one of the most actively explored formations in the Sichuan Basin. Gas reservoirs in the formation can be classified into five types in terms of reservoir characteristics, that is, reservoirs of fracture type, karst fractured-vuggy type, hydrothermal dolomite type, shoal dolomite type and marl type, and are dominated by lithologic reservoirs. These types of gas reservoirs show diverse characters in different stratigraphic intervals and different plays. The previous exploration results of Maokou Formation and characteristics of different gas reservoirs, demonstrate that favorable sedimentary facies zones such as marginal-platform shoals, intra-platform shoals and deep gentle slopes serve as basic conditions for reservoir development, and pseudocontemporaneous dolomitization, late hydrothermal dolomitization, epigenetic karstification, and tectonic transformations such as folds and faults are the keys to forming high-quality reservoirs therein. It is pointed out that karst fractured-vuggy reservoirs, dolomite reservoirs of shoal facies and marl reservoirs in the first member of Maokou Formation (Mao 1 Member) as controlled by facies (geomorphology), characterized by continuous distribution and high quality, are the main exploration targets in the future. The northeastern and southern-southeastern parts of Sichuan Basin are the most favorable play fairways for the exploration of Maokou Formation. The superposition of various reservoir types and exploration fields is of value to setting up a holistic pattern for exploration.

Key words: gas reservoir type, reservoir, exploration field, play fairway, petroleum exploration, Maokou Formation, Permian, Sichuan Basin

引用格式:张宇,曹清古,罗开平,等.四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J].石油与天然气地质,2022,43(3):610-620. DOI:10.11743/ogg20220310.

收稿日期:2021-03-15;修订日期:2022-03-08。

第一作者简介:张宇(1971—),男,教授级高级工程师,石油地质与综合勘探。E-mail: zhangyu688@sinopec.com。

通讯作者简介:罗开平(1964—),男,博士、研究员,油气地质综合研究。E-mail: luokp.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化科技部开发部项目(P20059-7);中国石化石油勘探开发研究院项目(YK-ZH2019-035-2)。

Zhang Yu, Cao Qinggu, Luo Kaiping, et al. Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and enlightenment obtained[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 610-620. DOI: 10. 11743/ogg20220310.

二叠系茅口组勘探始于20世纪50年代,是四川盆地最早勘探的层系之一。早期以川南和川东高陡构造灰岩裂缝储集体为主要目标,采用“占高点、沿长轴”勘探思路和布井原则,圣灯山构造隆10井在茅口组获气,揭开茅口组勘探的序幕,自1井在茅口组二段(茅二段)测试获得 $17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 产量^[1],界17井和包24井又相继获得高产工业气流,发现蜀南气田群,至2004年累计探明储量近千亿方。2005—2008年,由于长兴组—飞仙关组台缘礁滩相领域的重大突破,伴随普光、元坝等大中型气田发现,茅口组勘探一度被“搁置”。2010年前后,针对东吴运动面不整合岩溶,以川东南地区岩溶高地和岩溶斜坡带缝洞体为目标相继部署的隆盛1井和福石1井分别获得 $20.60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $6.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流,特别是2014年川西北双鱼石构造双探1井在茅二段灰岩裂缝储层中测试获得 $140.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流;近期杨柳1井、五探1井和云锦2井又在向斜区茅口组顶面岩溶缝洞储层中钻获高产工业气流(图1),茅口组这一传统领域再次被勘探家所重视。近年以泰来6井、元坝7井、潼探1井和角探1井为代表的一批探井相继分别在茅口组热液白云岩、台缘滩相白云岩、泥灰岩储层和台内滩相白云岩储层中获得突破,极大拓展了茅口组的勘探领域。目前,茅口组勘探发现呈现出全盆地、多类型、多领域的蓬勃局面,成为四川盆地勘探最热的层系。因此,梳理前期茅口组勘探成果,分析、比较不同类型气藏的共性和差异性,认识油气成藏的主控因素和富集规律,明确主要勘探领域和方向,对于未来的勘探不无裨益。

1 气藏类型及基本特征

根据目前已发现气藏的圈闭类型和储层成因,将四川盆地茅口组气藏分为裂缝型、岩溶缝洞型、热液白云岩型、滩相白云岩型和泥灰岩型5种类型,不同类型气藏具有不同特征。

1.1 裂缝型气藏

一般将这类气藏归为构造气藏。灰岩裂缝构成主要的储集空间,所以又称为裂缝体或裂缝储集体,多发育在褶皱转折端及断裂带等应力集中部位。储层具有总孔隙度低,但渗透性特高的特征。气井往往初始产量高、但衰减快,单个气藏储量规模小。这类

气藏是茅口组早期勘探的主要对象,大多分布在川东高陡构造带和蜀南地区,最早的发现来自于自1井,测试获得 $17.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 初始产量。近期中国石油在川西北双鱼石构造双探1井茅口组灰岩裂缝储层中获得高产工业气流,加上之前在老关庙、河湾场、矿山梁和九龙山等多个构造上也取得发现,这类气藏的勘探潜力重新被重视。

1.2 岩溶缝洞型气藏

该类型气藏属于构造—岩性气藏或岩性气藏。储层主要由次生溶蚀孔洞和构造有效缝共同组成储渗体系,灰岩基质孔隙度很低。在垂直渗流带内沿着垂向或高角度裂缝形成溶蚀扩容,表现为串珠状小型溶孔,溶孔内见有上覆地层充填物,如威阳17井在茅口组中钻遇2 m左右上覆龙潭组铝土质沉积物,钻遇这类储层时常发生钻时加快、钻具放空、井漏和蹩跳钻等现象;沿水平潜流带溶蚀具有层位选择性,在岩性较纯的茅二段岩溶最发育,规模相对垂直渗流带大,以大型水平或低角度溶缝、洞为主,溶洞以横向分布的管道形式存在于地下,有些形成地下暗河,缝洞充填物由粗—巨晶方解石、泥晶—粉晶灰岩的角砾和炭质泥等组成,钻井中常见放空和井漏等现象,测井曲线表现为井径扩径,自然伽马值较高、曲线呈锯齿状,双侧向电阻率值较低,三孔隙度较大等特征。在蜀南地区这类气藏开发取得了很好效果,以自2井为代表的一批高产井,累计产量高、效益好,单井累计天然气产量超 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的井140多口,其中单井累产超 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的井1口(自2井),单井累产超 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的井8口^[2]。近年来,五探1井、云锦2井、隆盛1井和杨柳1井相继获得高产工业气流,展示了这类气藏的勘探潜力。

1.3 热液白云岩型气藏

目前发现的这类气藏主要分布在四川盆地15#和16#基底断裂带或两侧的大池干井、卧龙河、板东及泰来等构造上,均为岩性气藏。储层为茅三段含铁硅质白云岩,厚度10~30 m。这套储层样品的稀土元素总量低,Ce负异常明显,HREE富集,Eu正异常,含铁硅质白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)为3.24‰~4.32‰, $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)为-7.95‰~-6.31‰,白云质硅质岩 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB)为1.65‰~4.03‰; $\delta^{18}\text{O}$ (PDB)为-9.66‰~-4.47‰,是典型热液成因。储集空间主要为白云石

晶间孔、晶间溶孔、溶洞和裂缝,最大孔隙度达14.00%,平均孔隙度高达6.48%,孔隙度和渗透率总体上成正相关。卧67井、池4井和泰来6井测试分获 50.20×10^4 、 9.31×10^4 和 11.08×10^4 m³/d工业产量。

1.4 滩相白云岩型气藏

目前见于川北地区元坝7井和角探1井,为典型岩性气藏。元坝7井储层主要发育于茅三段—吴家坪组一段台缘浅滩相,岩性为生屑灰岩、白云质生屑灰岩和生屑白云岩,以生物体腔溶孔和粒内(溶)孔为主,实测孔隙度为2.64%~8.37%,平均5.09%,元坝7井测试获得 105×10^4 m³/d产量;其气源主要来自于相邻陆棚相区茅三段(孤峰段)和吴家坪组烃源岩,形成与普光长兴组—飞仙关组气藏相似的“旁生侧储”源—储组合。

1.5 泥灰岩型气藏

主要分布在川东南茅口组一段(茅一段)“眼皮眼

球状”灰泥灰岩地层中,以焦石1井、潼探1井和大石1井为代表。产层主要为灰黑色泥晶结构的泥灰岩和生屑灰岩。储集空间包括滑石成岩收缩孔缝、方解石溶孔、有机质孔和裂缝,其中以滑石成岩收缩孔缝贡献最大。焦石坝地区储层孔隙度为0.097%~6.080%,平均孔隙度1.790%,为裂缝—孔隙型储层,具有低电阻率、高伽马值和三孔隙度曲线波动的电性特征。烃源岩为眼皮状的富有机碳泥岩和泥灰岩,平均总有机碳(TOC)含量为1.0%,最高可达3.6%。属于典型的“自生自储”岩性气藏。

除了茅一段泥灰岩气藏是“源—储一体”外,对其他类型气藏气源对比结果表明,茅口组天然气主要来源于栖霞组—茅口组烃源岩,但也有深部不同气源的混入:川西北双鱼石—矿山梁一带主要混入寒武系气源,而河湾场构造和蜀南及川东南地区则主要有志留系气源的混入^[3-4]。

从目前茅口组气藏的分布来看(图1),不同构造带气藏分布不均,具有一个构造带内多个层系和多种

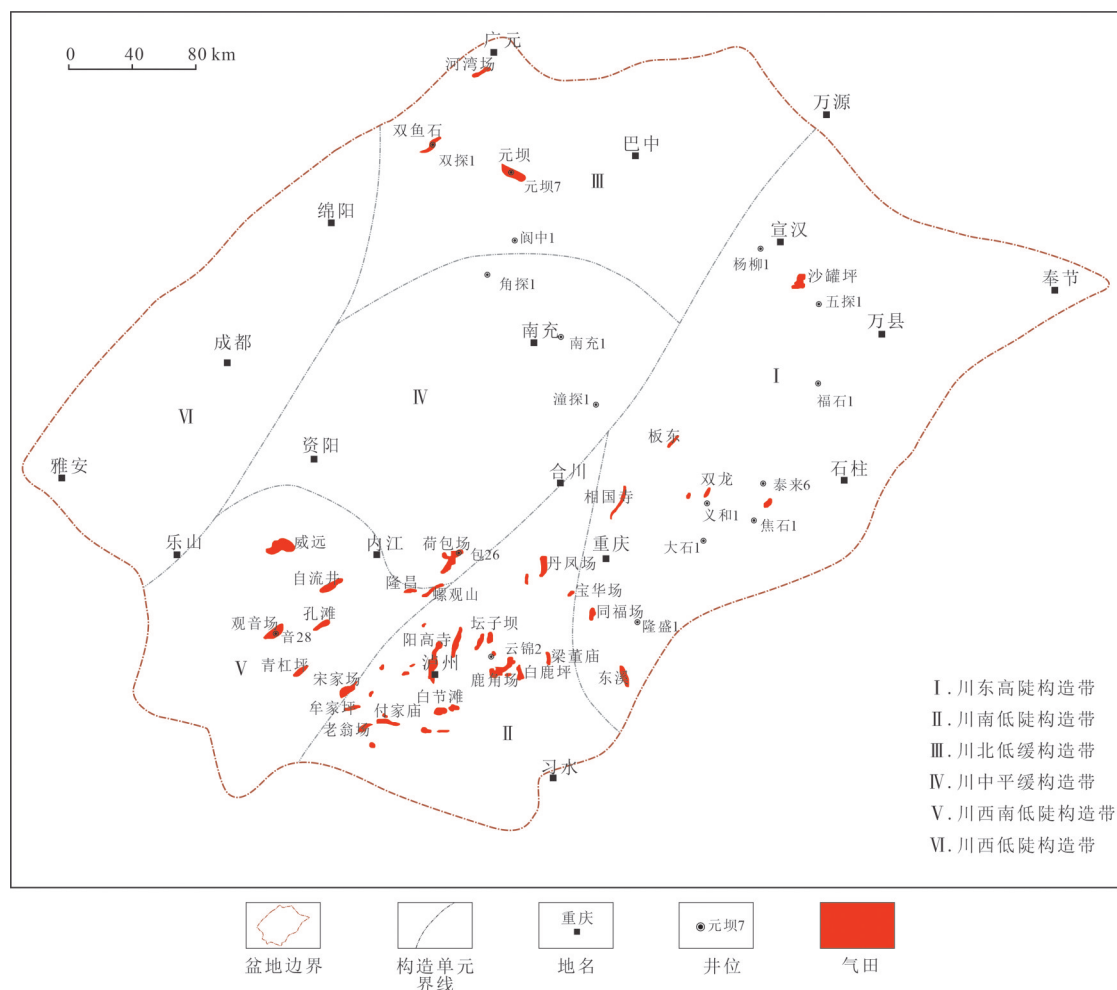


图1 四川盆地茅口组气藏及重要发现井分布

Fig. 1 Distribution of gas reservoirs and major discovery wells in the Maokou Formation, Sichuan Basin

类型气藏纵向上叠置的特点,反映茅口组成藏主控因素和富集规律的多样性和差异性。

2 成藏关键要素与油气富集规律

普光和安岳等大中型气田解剖分析表明,“近源、优储”是四川盆地海相天然气富集和成藏的主控因素。对茅口组而言,是否具有充足的烃源供给和发育规模优质储层同样也是成藏的关键要素^[5-7]。

2.1 构造沉积背景

华南陆块晚古生代构造沉积格局奠基在加里东运动扬子地块和华夏地块拼合后的前泥盆系基底上,盆地发展演化受控于古特提斯洋盆的开合。上扬子地区在泥盆纪—石炭纪接受了有限范围的沉积后,晚石炭世末云南运动使得大部分地区再次成为古陆,并持续到早二叠世早期。中二叠世栖霞组沉积期大规模海侵,除大巴山古陆、龙门山古陆,康滇古陆和江南古陆呈岛链或孤岛露出水面外,上扬子地区沦为广阔的碳酸盐岩缓坡台地,纵向上形成栖霞组和茅口组两个大的及多个次级海侵—海退沉积旋回。茅口组沉积期晚期,受峨眉地幔柱事件影响,上扬子地块西、北缘在弱

伸展背景下出现北西向的裂陷,并在吴家坪—长兴期从克拉通边缘延伸到克拉通内部,裂陷规模在晚二叠世长兴期达到顶峰,自东往西形成城口—鄂西、广元—开江—梁平、德阳—武胜3个北西向的裂陷槽,使得克拉通内呈现明显构造—沉积分异,并持续到早三叠世飞仙关期,控制了晚二叠世—早三叠世沉积格局^[8-16]。

在大量地表剖面及钻、测井资料综合分析基础上,建立了茅口组地层—层序综合柱状剖面(图2),以段为单元编制了岩相古地理图。茅口组时期四川盆地总体上具有西南地势高、水体浅,向东北方向水体逐渐加深的古地理特征。茅一段处于上扬子地区晚古生代最大的海侵期,四川盆地主体以开阔台地、斜坡—浅水陆棚相为主。在台地相区,以川中磨溪39井为代表,发育浅灰—灰褐色厚层状微晶和泥晶灰岩,夹厚层细晶白云岩和薄层灰岩夹,厚80 m;在川东斜坡—浅水陆棚区地区,发育深灰色中层状眼皮眼球状泥微晶含生屑灰岩,夹薄层泥质灰岩、炭质泥岩标志性沉积组合,以石柱冷水溪剖面为代表,厚65 m。在川西广元—江油地区发育台地边缘浅滩,在局限—开阔台地相区零星发育台内滩。茅一段厚度在60~125 m(图3a)。茅二段沉积期随着海平面下降,局限台地、开阔台地的范围向北、向东扩展,斜坡—陆棚沉积范围相应往北、往东退

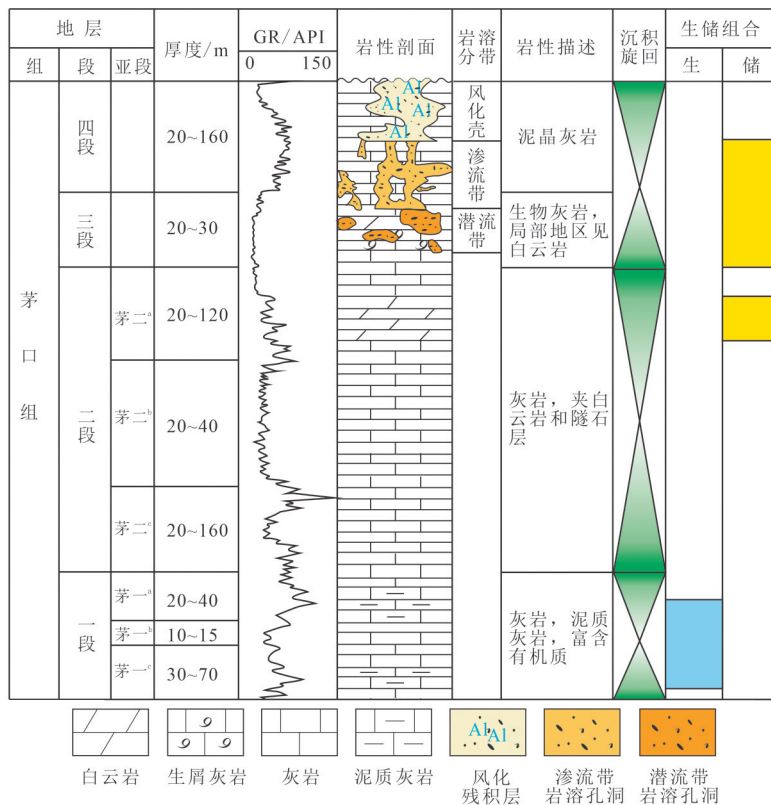


图2 四川盆地茅口组地层—层序综合柱状图

Fig. 2 The composite stratigraphic-sequence column of Maokou Formation, Sichuan Basin

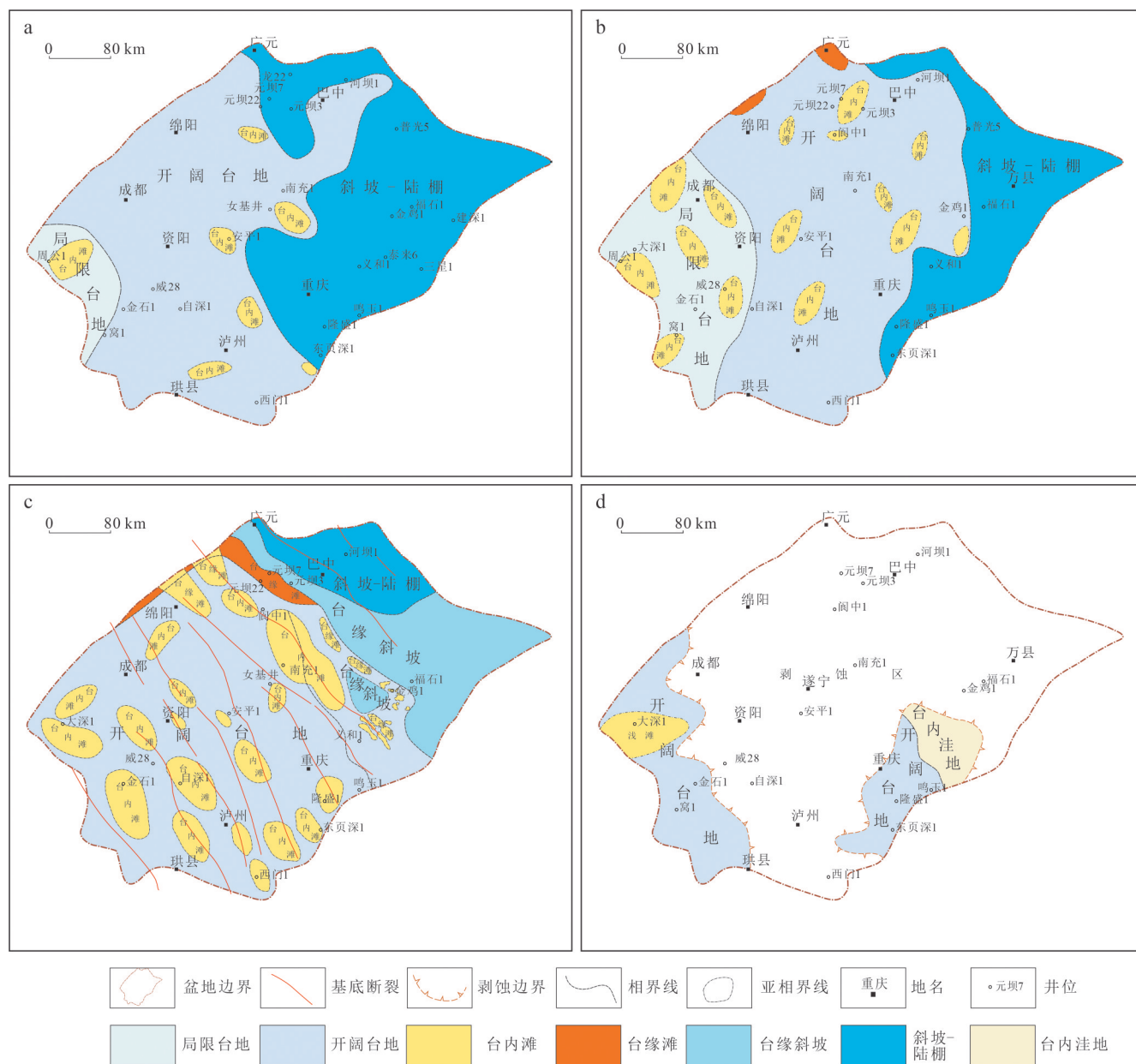


图3 四川盆地茅口组沉积相平面展布

Fig. 3 Planar distribution of sedimentary facies of Maokou Formation, Sichuan Basin

a. 茅一段; b. 茅二段; c. 茅三段; d. 茅四段

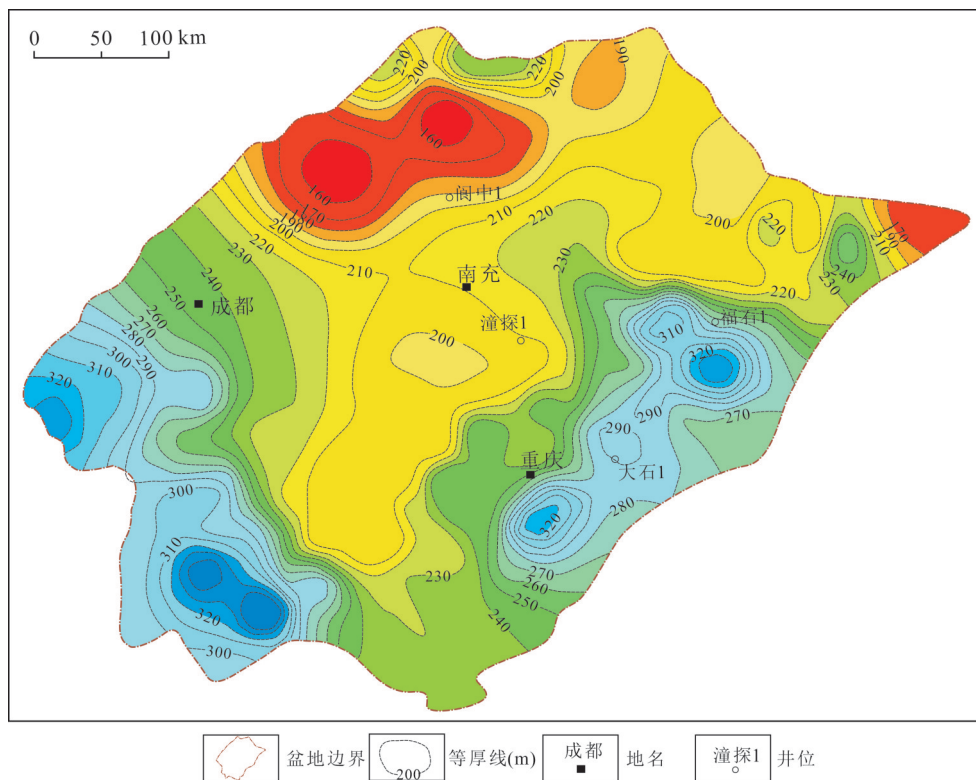
缩,局限台地、开阔台地内和川西、川北台地边缘相区浅滩相分布广泛(图3b),茅二段厚度通常在60~200 m不等。茅三段沉积期相对于茅二段沉积期海平面变化不大,但在早期填平补齐作用下,开阔台地范围显著扩大,浅滩相更为发育(图3c)。茅四段沉积期,四川盆地范围内整体为开阔台地(图3d)。茅口组总体上以浅灰、灰白色块状泥晶灰岩和微晶灰岩为主,夹有较多的白云岩、白云质灰岩,含有较多的生物碎屑,局部夹有钙质页岩和泥灰岩形成眼球状和瘤状灰岩。在盆地东部、北部常见结核状或条带状硅质岩或硅质灰岩,夹含硅质页岩。茅口组末期,由于东吴上升运动,茅三

段和茅四段在川北和川北-川中遭受不同程度剥蚀,现今茅口组残留地层总体上具有川西南和川东南厚度大(250~320 m),川西北、川中和川东北地区厚度较小(160~230 m)的特点(图4),在茅口组顶面形成明显的不整合岩溶风化壳。

沉积期岩相古地理分异、控制了烃源岩和有利储集相带的发育与分布,同沉积期和沉积期后成岩及构造作用控制了储层的形成。

2.2 烃源条件

对茅口组已发现气藏(井)系统的气/源对比结果

图4 四川盆地茅口组残留厚度分布^[17]Fig. 4 Isopach map of residual strata in the Maokou Formation, Sichuan Basin^[17]

表明,其天然气来源均具有“混源”的特征,除了栖霞组和茅口组自身烃源外,还有来自于下部志留系烃源岩甚至深部寒武系烃源岩的贡献。

栖霞组和茅口组主要发育台地相碳酸盐岩烃源岩,纵向上分布在栖霞组一段和茅一段,岩性为深灰色泥晶灰岩、生物灰岩夹薄层泥岩,厚度100~700 m,平均厚度330 m左右,TOC含量在0.3%~3.0%,平均达0.8%,这套烃源岩在四川盆地内分布广、厚度大,丰度中-低,但品质好。在川西北广元-旺苍和川东北开江-梁平一带还发育茅四段深水陆棚相含硅质泥质烃源岩,相对于碳酸盐岩烃源岩,这套泥质烃源岩具有有机质丰度高的特点,TOC含量2.0%~5.0%,平均3.0%。综合评价,中二叠统栖霞组、茅口组烃源岩在全盆地生烃强度均在 $(15 \sim 30) \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{km}^2$ 以上,具有形成大中型气田的烃源基础。此外,在川西北和川东南地区,下寒武统和下志留统两套优质烃源岩,在通源断裂存在时可以作为茅口组重要的烃源补充;另外,在荣昌-威远地区,靖和1井揭示梁山组发育近10 m暗色泥页岩,TOC含量高,是一套潜在的烃源岩。这种烃源岩构成保证了茅口组成藏充足的烃源条件。

2.3 规模优质储层

导致茅口组气藏类型多样的最根本原因在于储层

成因的多样性,不同类型储层具有不同的形成机理和控制因素。

裂缝型储层受控于地层脆性构造形变,多与褶皱和断裂作用有关。与褶皱相关的裂缝包括张裂缝、层间缝和层间脱空缝,构造高点和轴部往往裂缝最发育,其次是翼部、鞍部和低缓部位发育较差。断层相关裂缝发育程度与断层性质、规模有关。倾角大的断层在岩层中产生的裂缝带一般较窄,而倾角小于 40° 时产生的裂缝体规模往往最大,集中在垂直于断层走向距断点200~640 m范围内。大型裂缝系统是这类储层勘探的主要目标,它具有裂缝组系多、纵向穿切层位多、穿层深度大(300余米)的特点,斜交型的多组构造迭加部位派生扭应力场,致使直扭型背斜或直扭部位裂缝组系多,穿层深、延伸长、分布普遍的扭张缝与张开度大、穿层浅、延伸短的纵横张缝或不穿层的层间脱空缝相互交切构成连通范围大的储渗网络,形成大的裂缝圈闭,如相国寺背斜裂缝圈闭。

岩溶缝洞储层发育受古地貌、裂缝控制(图5),侵蚀残丘、斜坡是岩溶发育的有利地带,裂缝能促进岩溶作用进行;岩性对岩溶作用也有影响,颗粒灰岩、生屑灰岩最容易溶蚀。按照岩溶作用方式和特点可以分为风化壳岩溶、顺层面岩溶和顺断层面岩溶。统计表明,在没有断裂情况下风化壳岩溶多发生在距不整合面往

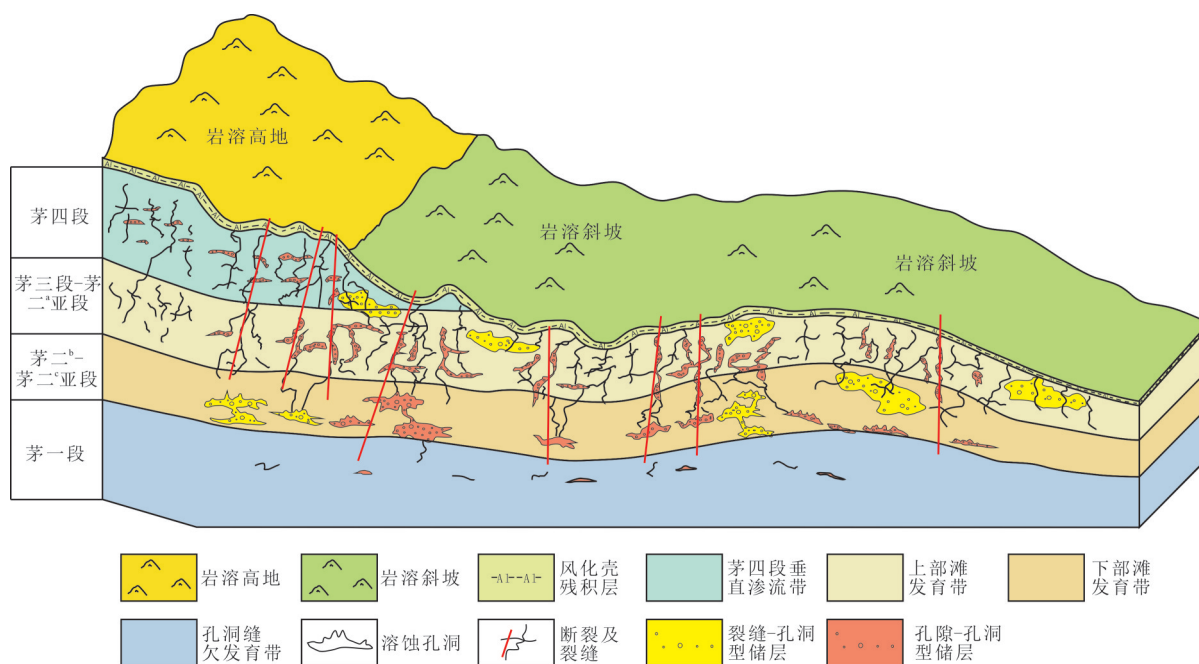


图5 四川盆地茅口组岩溶缝洞储层发育模式

Fig. 5 Schematic diagram showing the karst fractured-vuggy reservoir development in the Maokou Formation, Sichuan Basin

下30 m范围内,以亮晶颗粒灰岩和生屑灰岩溶蚀作用最强,形成溶蚀孔洞大小不一,从几毫米至数米不等,溶蚀作用受岩溶古地貌控制,岩溶斜坡带溶蚀作用最强;但在构造高部位由于断裂末端效应容易形成裂缝,大气淡水沿裂缝下渗而形成缝洞岩溶带。顺层面岩溶主要发育在岩溶斜坡带上,与不整合面无关,地表径流沿裂缝带渗至下部地层后,受古河道排泄基准控制,岩溶水以侧向径流为主,沿地层层面形成沿古河道方向发育的岩溶管道系统或溶洞系统。深大基底断裂及其伴生的层间小断层控制古水系的发育,古水系控制顺层岩溶的发育范围。顺断层面岩溶受早期断裂控制,断裂作为下渗的通道,一般具有较缓的倾角,使得水体的流速较慢,有利于溶蚀作用进行,岩溶强度沿下倾方向逐渐减弱。

热液白云岩储层主要沿基底深大断裂分布,如泰来6井和泰来7井茅口组白云岩储层,层位上一般在茅三段,距茅口组顶面约30~50 m位置,岩溶改造程度弱^[18-20]。基质深灰色细晶白云岩和缝洞中白色粗晶鞍状白云石两类白云岩具有晶面弯曲、波状消光特征,分别形成于早、晚两期白云岩化作用。早期峨眉地裂运动导致地幔热液流体沿着深部断裂向上运移至浅层灰岩中,由于上部吴家坪组致密碎屑岩的阻隔而发生侧向流动,且此时茅三段生屑灰岩处于浅埋藏成岩阶段(深度500~1 000 m),较高的孔渗性有利于热液流体进入,富镁热液交代方解石形成似层状基质白云岩;晚

期热液流体在基质白云岩中由于水力压裂作用形成破裂和溶蚀缝洞,在其中沉淀、充填形成粗晶鞍状白云石。基底断裂为热液流体提供了上侵通道,颗粒滩相具有较好渗透性灰岩利于热液活动,这两者控制了热液白云岩的形成(图6a)。

茅三段滩相白云岩储层成因类似于长兴组-飞仙关组台缘礁滩相储层,具有“相控+溶蚀+白云岩化”形成机理,所不同的是前者以台缘礁滩相为主,茅口组主要为台内滩相^[21]。茅二段和茅三段沿着川西台缘带及台地相区发育的滩相颗粒灰岩,经历同生期大气淡水岩溶、准同生期白云岩化及东吴运动抬升导致的早成岩期表生岩溶作用的叠加改造,形成优质规模白云岩孔隙性储层(图6b)。

茅一段泥灰岩气藏作为近年来发现的一种新气藏类型,基于MAPS定量、应力加载-SEM观察、液氮吸附法孔容分析、X射线衍射谱图差异性分析和混层矿物定量等手段,揭示了这类储层孔隙结构特征(图7)。其类型为裂缝-孔隙型,主要发育无机粒间孔、有机质内孔和粘土片状缝,主体以碳酸盐岩粒间孔隙为主,且储层孔隙之间由于裂缝存在具有较好的连通性。混层矿物与孔隙发育程度具有较好的正相关性,表明储层发育主要受控于蒙脱石向混层矿物转化。川东南地区茅一段沉积期为斜坡-浅水陆棚相较深水缺氧还原环境[元素含量比值 $Ni/Co > 7.00$, $V/(V+Ni) > 0.60$, $U/Th > 1.25$],这种环境有利于海泡石沉积。中侏罗世

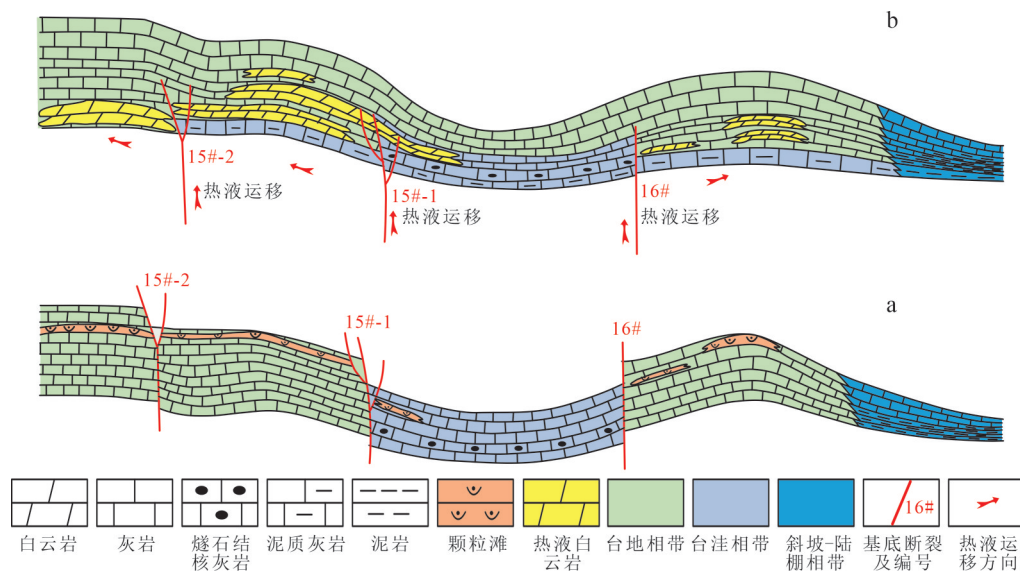


图6 四川盆地茅口组白云岩储层形成模式

Fig. 6 Schematic diagrams showing the development of dolomite reservoirs in the Maokou Formation, Sichuan Basin
a. 沉积期,受基底断裂控制,造成构造-沉积分异,浅水台地及台缘带发育颗粒滩灰岩储层及准同生期白云岩储层;
b. 沉积期后,热液沿基底断裂上涌,颗粒滩灰岩被交代,形成热液白云岩储层

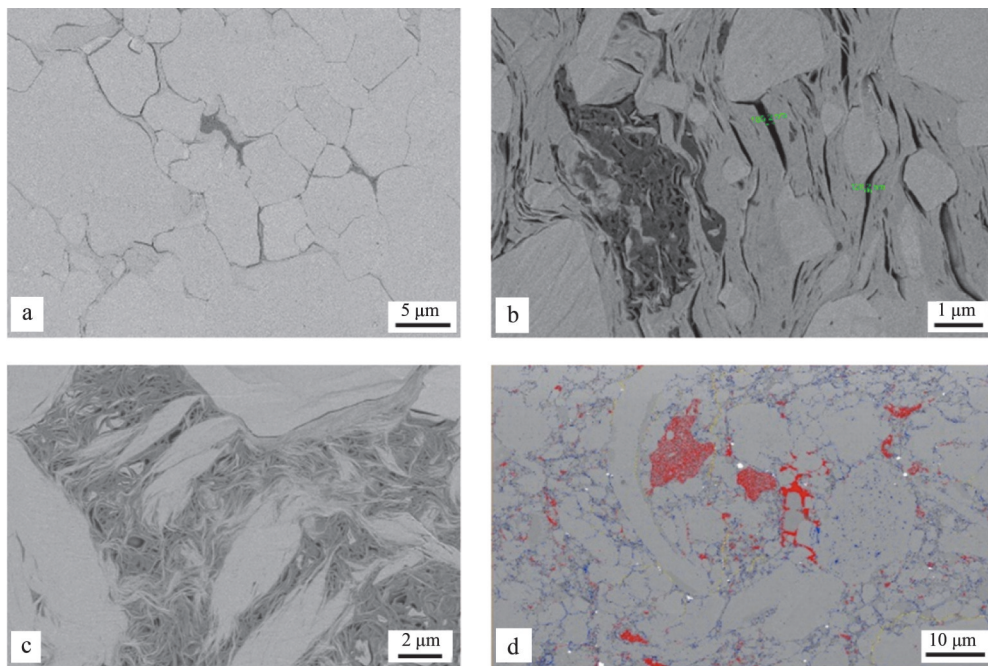


图7 四川盆地茅一段泥灰岩储层孔隙结构特征

Fig. 7 Micrographs showing pore structure characteristics of marl reservoirs in the Mao 1 Member, Sichuan Basin
a. JY66-1-28井,埋深1 304.00 m,粒间孔,SEM; b. JY66-1-5井,埋深1 358.90 m,粘土矿物片间缝,SEM;
c. JY66-1-23井,埋深1 321.30 m,有机质孔,SEM; d. MY1-4井,埋深2 922.93 m,基质孔与裂缝,SEM

末期,二叠系地层温度最高达140℃,并在整个晚侏罗世保持在120℃,持续时间大约15 Ma,这种地层条件下海泡石向滑石转化。海泡石为三八面体层链状硅酸盐矿物,滑石是典型的三八面体层状硅酸盐矿物,在扫描电镜下呈纤维状-片状结构。海泡石被埋藏到一定深度时,受温度和压力的双重影响,引起海泡石

晶格不稳定,发生层链塌陷而向滑石转化,由于转化的不均一,滑石晶层交错叠置形成层间孔缝,成为主要储集空间。
在上述5种类型储层中,滩相白云岩储层、茅口组一段泥灰岩储层和岩溶缝洞储层发育具有“相(貌)控成因”和“层状分布”特点,储层分布广、规模较大,特别

是滩相白云岩储层和岩溶缝洞储层往往具有较好的储集物性。

2.4 成藏富集规律

从目前茅口组已经发现的气藏分布来看,在层位上、地域上和类型上具有明显的差异:一些地区以某一层段和某一类型气藏为主,但有些地区则表现为多层段、多类型气藏的叠置,反映了不同构造单元、不同区带成藏条件、主控因素的差异。在前人认识基础上,通过对茅口组成藏条件及特征的系统梳理,茅口组成藏富集规律可总结如下。

1) 规模储层发育控制油气富集。有利沉积相带、准同生期或表生期成岩作用及成岩后期构造作用等多因素的叠加,形成不同类型、不同规模、分布于不同地区或/层系的储层。匹配其他成藏要素(有效烃源、圈闭、保存条件),控制了油气的富集:①主要受晚期构造应力作用控制的裂缝型储集体,主要发育于高陡褶皱转折端或断裂附近,因此,这类气藏的主要分布在构造运动改造相对较强的川南、川东地区及川北一些局部正向构造上;②岩溶缝洞型储层受东吴运动面岩溶古地貌、古水文条件及原始地层(包括岩性、裂缝)多因素影响,残丘-岩溶斜坡(岩溶谷地)与滩相叠合区,岩溶储层最为发育,成为油气富集有利区;③台内及台缘滩相经过准同生期或成岩后期深部热液白云化改造形成规模不等的层状、条带状白云岩储层,形成川东北元坝地区(如元坝7井)、川东南泰来地区(如泰来6井、泰来7井)油气富集带。储层在上述地区或类型的气藏形成中均属于关键要素。

2) 川东南茅一段气藏分布受控于沉积相带,储层甜点控制天然气富集。川东南地区茅一段泥灰岩气藏形成于含泥质较高的瘤状灰岩(亦称眼皮眼球状灰岩)地层中,这是一种“源-储一体,连续、无明显边界”介于非常规和常规气之间的气藏类型。瘤状灰岩主要发育在较深水缓坡相带中,眼皮状泥岩 TOC 含量介于 0.8%~1.0%,在地层中占比 50%左右,地层的连续性和一定厚度(一般在 20~30 m)是成藏的基本条件,基质孔隙、裂缝发育程度是影响储层甜点形成、也是控富的主要因素。

3 主要勘探领域与有利区带

据新近完成的四川盆地资源评价结果,中二叠统栖霞组-茅口组天然气资源量达 $1.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,而已探明储量仅为 $811.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源探明率不足 6%,具

有很大的勘探潜力,尤其是茅口组。

基于四川盆地油气成藏富集规律的认识和近期茅口组勘探发现的启示及“效益勘探”的需求,茅口组下一步勘探应聚焦于岩溶缝洞、滩相白云岩和泥灰岩 3 个领域。

3.1 岩溶缝洞型勘探领域

岩溶缝洞型油气藏是海相碳酸盐岩层系油气勘探的重要领域^[22-23]。四川盆地茅口组普遍发育风化壳岩溶储层,主要分布在茅二段-茅三段^[24-27]。从早期的蜀南气田,到近期杨柳 1 井、五探 1 井和云锦 2 井的新发现,茅口组岩溶缝洞型气藏是四川盆地最有生命力的勘探层系;从岩溶残丘、岩溶斜坡到岩溶谷地,这种类型油气发现已经拓展到全盆地,未来其仍然是重要的勘探领域。在古构造分析和岩溶古地貌恢复基础上,通过井-震结合精确厘定茅口组残留地层空间展布,结合对滩体、古河道、古水系及古裂缝的识别和刻画,表明四川盆地中部、南部地区处于岩溶斜坡带-岩溶谷地,侵蚀强烈,古河道和古水系交错分布,是岩溶储层发育的有利地区,也是未来勘探的有利区带(图 8)。

3.2 滩相白云岩勘探领域

全球主要含油气盆地中,礁滩相白云岩储层占比达 27.4%^[28],普光气田、元坝气田和磨溪龙王庙组气田储层均属此类,礁滩相储层是四川盆地海相最主要的勘探目标。茅二段和茅三段发育的滩体主要分布在川西台缘带和川西南-川中的局限台地-开阔台地相区,尤以川西南局限台地相区最为发育,是茅口组滩相白云岩气藏勘探的有利地区(图 8)。

3.3 茅一段泥灰岩勘探领域

从气藏特征和成藏机理看,茅一段泥灰岩气藏是一种受沉积相控制、自生自储(源-储一体)、大面积分布、丰度较低的连续性岩性气藏^[29]。川东-川东北较深水斜坡-浅水陆棚区发育有连续厚度超过 30~50 m、TOC 含量为 0.6%~0.9%的灰泥灰岩,特别是川东-川东南地区茅口组埋藏相对较浅,埋深普遍小于 3 000 m 为勘探的有利区带(图 8)。

总体来看,川西-川西南地区茅口组在滩相白云岩储层基础上发育有岩溶缝洞型储层,川东-川东南地区茅一段灰泥灰岩、滩相白云岩储层和岩溶缝洞储层 3 种类型储层纵向上迭置,这两个地区是茅口组多类型气藏立体勘探的有利地区(图 8)。

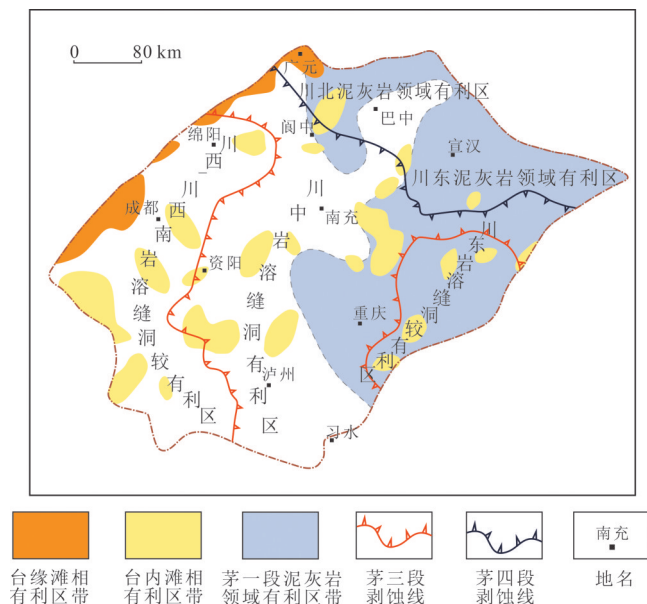


图8 四川盆地茅口组主要勘探领域有利区带

Fig. 8 The map showing play fairways in the main exploration fields of Maokou Formation, Sichuan Basin

4 结论

1) 四川盆地茅口组气藏具有多种类型,在不同区带、不同层段气藏类型具有差异多样化特征。

2) 沉积相带和准同生期、表生期成岩作用及后期构造作用组合、叠加控制不同类型储层的发育和油气富集,并造成气藏类型的多样化。

3) “相(貌)控”岩溶缝洞型、滩相白云岩型、茅一段泥灰岩型气藏是茅口组未来主要的有利勘探领域,川西-川西南、川东-川东南是多类型气藏立体勘探有利地区。

参考文献

- [1] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志卷十四四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
Petroleum geological chronicles compilation group of Sichuan oil and gas area. Petroleum geology of China volume 14 Sichuan oil and gas area[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [2] 汪泽成, 江青春, 黄士鹏, 等. 四川盆地中二叠统茅口组天然气大面积成藏的地质条件[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 30-38.
Wang Zecheng, Jiang Qingchun, Huang Shipeng, et al. Geological conditions for massive accumulation of natural gas in the Mid-Permian Maokou Fm of the Sichuan Basin[J]. Nature Gas Industry, 2018, 38(1): 30-38.
- [3] 刘羿伶. 川西北部地区中二叠统茅口组天然气成藏研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
Liu Yiling. Research on natural gas accumulation in the Middle

Permian Maokou Formation in northwestern Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

- [4] 张健, 周刚, 张光荣, 等. 四川盆地中二叠统天然气地质特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 10-20.
Zhang Jian, Zhou Gang, Zhang Guangrong, et al. Geological characteristics and exploration orientation of Mid-Permian natural gas in the Sichuan Basin[J]. Nature Gas Industry, 2018, 38(1): 10-20.
- [5] 马永生, 蔡勋育, 郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素[J]. 科学通报, 2007(S1): 149-155.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Guo Tonglou. The main controlling factors of oil and gas charging, enrichment and accumulation in the large-scale Puguang gas field in the Sichuan Basin[J]. Science Bulletin, 2007(S1): 149-155.
- [6] 王大鹏. 全球古生界海相碳酸盐岩油气富集规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
Wang Dapeng. Hydrocarbon accumulation patterns in the marine Paleozoic carbonate reservoirs in the world[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016.
- [7] 田兴旺, 孙奕婷, 杨岱林, 等. “源控论”再探讨——以四川盆地海相碳酸盐岩气藏勘探为例[J]. 四川地质学报, 2020, 40(3): 410-415.
Tian Xingwang, Sun Yiting, Yang Dailin, et al. A further discussion on source-control theory——by the example of marine carbonate gas reservoir in the Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, 40(3): 410-415.
- [8] 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等. 关于开江-梁平海槽的认识[J]. 石油与天然气地质, 2006(3): 326-331.
Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Tan Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang-Liangping ocean trough[J]. Oil & Gas Geology, 2006 (3): 326-331.
- [9] 罗志立. 峨眉地裂运动观对川东北大气区发现的指引作用[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(4): 401-407.
Luo Zhili. Guidance function of Emei Taphrogenesis viewpoint on discovery of large gas province in Northeastern Sichuan[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(4): 401-407.
- [10] 罗志立, 孙玮, 韩建辉, 等. 峨眉地幔柱对中上扬子区二叠纪成藏条件影响的探讨[J]. 地学前缘, 2012, 19(6): 144-154.
Luo Zhili, Sun Wei, Han Jianhui, et al. Effect of Emei mantle plume on the conditions of Permian accumulation in middle-up-per Yangtze Area[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(6): 144-154.
- [11] 刘树根, 王一刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 1-23.
Liu Shugen, Wang Yigen, Sun Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 1-23.
- [12] 刘树根, 孙玮, 李智武, 等. 四川叠合盆地海相碳酸盐岩油气分布特征及其构造主控因素[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(5): 1-18.

- Liu Shugen, Sun Wei, Li Zhiwu, et al. Distribution characteristics of marine carbonate reservoirs and their tectonic controlling factors across the Sichuan superimposed basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(5): 1-18.
- [13] 蔡珺君, 彭先, 李骞, 等. 四川盆地重点海相碳酸盐岩气藏产能评价现状及展望[J]. *断块油气田*, 2021, (5): 655-660.
- Cai Junjun, Peng Xian, Li Qian, et al. Present situation and prospect of productivity evaluation of key marine carbonate gas reservoirs in Sichuan Basin[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2021, (5): 655-660.
- [14] 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 四川海相克拉通盆地显生宙演化阶段及其特征[J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1058-1072.
- Liu Shugen, Sun Wei, Zhong Yong, et al. Evolutionary episodes and their characteristics within the Sichuan marine craton basin during Phanerozoic Eon, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1058-1072.
- [15] 刘树根, 孙玮, 宋金民, 等. 四川盆地海相油气分布的构造控制理论[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 146-160.
- Liu Shugen, Sun Wei, Song Jinmin, et al. Tectonics-controlled distribution of marine petroleum accumulations in the Sichuan Basin, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 146-160.
- [16] 姚军辉, 罗志立, 孙玮, 等. 峨眉地幔柱与广旺-开江-梁平等拗拉槽形成关系[J]. *新疆石油地质*, 2011, 32(1): 97-101.
- Yao Junhui, Luo Zhili, Sun Wei, et al. Relationship between Emei mantle plume and aulacogens of Guangwang-Kaijiang-Liangping[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2011, 32(1): 97-101.
- [17] 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(6): 949-960.
- Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions [J]. *Acta Petroli Silica*, 2012, 33(6): 949-960.
- [18] 李双建, 杨天博, 韩月卿, 等. 四川盆地中二叠统热液白云岩化作用及其储层改造意义[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1265-1280.
- Li Shuangjian, Yang Tianbo, Han Yueqing, et al. Hydrothermal dolomitization and its role in improving Middle Permian reservoirs for hydrocarbon accumulation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1265-1280.
- [19] 张涛, 林娟华, 韩月卿, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 132-143, 200.
- Zhangtao, Lin Juanhua, Han Yueqing, et al. Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 132-143, 200.
- [20] 黎霆, 诸丹诚, 杨明磊, 等. 热液活动对四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 639-651.
- Li Ting, Zhu Dancheng, Yang Minglei, et al. Influence of hydrothermal activity on the Maokou Formation dolostone in the central and western Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 639-651.
- [21] 刘玲, 沃玉进, 张涛, 等. 运用岩性因子预测四川盆地涪陵地区茅口组白云岩储层[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 144-156.
- Liu Ling, Wo Yujin, Zhang Taoet al. Dolomite reservoir prediction with lithology factor in the Maokou Formation, Fuling area, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 144-156.
- [22] 沈安江, 陈娅娜, 蒙绍兴, 等. 中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(4): 1-14.
- Shen Anjing, Chen Yana, Meng Shaoxing, et al. The research progress of marine carbonate reservoirs in China and its significance for oil and gas exploration[J]. *Marine Petroleum Geology*, 2019, 24(4): 1-14.
- [23] 潘政屹. 川中地区中二叠统茅口组岩溶型白云岩储层特征[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- Pan Zhengyi. Characteristics of karst dolomite reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation in Central Sichuan[D]. Chengdu: Southeast Petroleum University, 2018.
- [24] 吴悦. 四川盆地川中地区二叠系茅口组岩溶储层特征研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- Wuyue. Study on the characteristics of karst reservoir in Chuanzhong area of Sichuan Basin[D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2019.
- [25] 白光辉. 开江地区茅口组岩溶古地貌恢复及储层预测研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- Bai Guanghui. Karst palaeogeomorphology restoration and reservoir prediction of Maokou Formation in Kaijiang area[D]. Xi'an: Xi'an Shiyu University, 2019.
- [26] 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(5): 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(5): 756-763.
- [27] Li Y Z. Mechanics and fracturing techniques of deep shale from the Sichuan Basin, SW China[J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2(1): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.06.002>.
- [28] 蔡涵鹏. 礁滩相储层综合预测研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- Cai Hanpeng. Study on reef flat facies reservoir integrated prediction[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [29] 张培先, 何希鹏, 高全芳, 等. 四川盆地东南缘二叠系茅口组一段页岩气藏地质特征及富集模式[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 146-157.
- Zhang Peixian, He Xipeng, Gao Quanfang, et al. Geological characteristics and enrichment pattern of Permian Mao 1 Member shale gas reservoirs at the southeastern margin of Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 146-157.

(编辑 梁 慧)