

四川盆地中西部栖霞组—茅口组 孔洞型白云岩储层成因与分布

周进高^{1,2}, 郝毅^{1,2}, 邓红婴¹, 谷明峰¹, 潘立银^{1,2},
姚倩颖¹, 杨雨然³, 娄雪⁴

1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室;
3 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院; 4 中国石油大学(北京)

摘要 近期,四川盆地中西部地区下二叠统栖霞组—茅口组的勘探取得持续突破,引起人们对白云岩储层的广泛关注。从储层形成的地质背景入手,以露头 and 岩心为切入点,结合实验分析,在储层成因与分布方面取得4项主要认识:①栖霞组和茅口组的白云岩储层均发育在高位域,台地边缘和台洼边缘是储层发育的主要沉积环境;②储层的主要岩性是晶粒白云岩(残余颗粒白云岩和中细晶白云岩),溶蚀孔洞、残余粒间孔、生物体腔孔和裂缝是主要储集空间,栖霞组和茅口组储层的平均孔隙度分别为3.87%、4.57%,均具有良好的储集性能;③颗粒滩亚相、准同生溶蚀作用是储层形成的主控因素,其中颗粒滩是储层发育的物质基础和原生孔隙的载体,准同生溶蚀作用将原生孔隙扩溶成孔洞,是改善储集空间的关键;④剑阁—雅安台缘滩和盐亭—广安台洼边缘滩带是白云岩储层有利分布区,是天然气勘探的主攻方向。

关键词 沉积相;白云岩储层;有利区带;栖霞组;茅口组;四川盆地

中图分类号: TE112.23

文献标识码: A

近期,川西北双探1井和川中南充1井、磨溪39井、磨溪42井等井相继在下二叠统栖霞组和茅口组获得高产气流,显示栖霞组—茅口组具有良好的勘探潜力。关于栖霞组—茅口组储层,前人做过大量研究,普遍认为茅口组发育裂缝型储层,栖霞组发育白云岩储层,但对白云岩成因的认识存在较大分歧^[1-14]。本次研究认为,栖霞组和茅口组发育白云岩储层和石灰岩岩溶储层。本文仅探讨白云岩储层的成因与分布,认为白云岩储层分布在栖霞组和茅口组的高位域沉积期,由颗粒滩体经准同生期溶蚀作用改造所形成,并明确了剑阁—雅安地区和盐亭—广安地区是白云岩储层有利分布区,这为栖霞组—茅口组的下步勘探指明了方向。

1 储层发育地质背景

高位域是储层发育的主要部位。高位域沉积期,海平面逐步下降,尤其到中晚期,海平面的降低使水体变浅,但能量增加,这有利于生物的繁殖,而生物

活动及生物骨骼提供了大量的碳酸盐岩颗粒,这又为储层的发育奠定了物质基础。栖霞组—茅口组白云岩储层在纵向上主要分布在栖霞组二段(简称栖霞二段)、茅口组二段(简称茅二段)和茅三段,均位于三级层序的高位域(图1),表明海平面下降所形成的浅水环境有利于储层发育。

古地貌高部位是储层发育的重要地质背景。下二叠统栖霞组沉积前,四川盆地总体表现为西南高、东北低的特点。受东吴运动早期构造拉张的影响^[15],北西向及北东向的基底断裂复活,发育一系列北西—南东向或北东—南西向裂隙,其中,最明显的是位于旺苍—梁平—奉节一带的裂隙,该裂隙在茅口组沉积晚期为台内深洼区^[16],而到晚二叠世长兴期进一步裂隙,演变成“开江—梁平海槽”^[17]。台内裂隙的发育使四川盆地在西高东低的背景上叠加了隆洼相间的古地理格局,使得在古地貌高部位发育颗粒滩^[18-19],低洼位置以低能泥晶灰岩或泥质灰岩沉积为主,这种相带的分异与展布决定了储层的发育部

收稿日期: 2018-01-30; 改回日期: 2018-11-30; 网络发表日期: 2019-04-03

本文受国家科技重大专项课题“下古生界—前寒武系碳酸盐岩沉积特征及规模储层形成与分布”(编号: 2016ZX05004-002)、中国石油重大专项“深层油气勘探开发关键技术研究”(编号: 2014E-32)联合资助

第一作者: 周进高,教授级高级工程师,博士,主要从事碳酸盐岩沉积储层及石油地质研究工作,发表文章60余篇,出版专著7部。
通信地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号; E-mail: zhoujg_hz@petrochina.com.cn

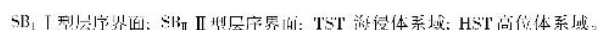
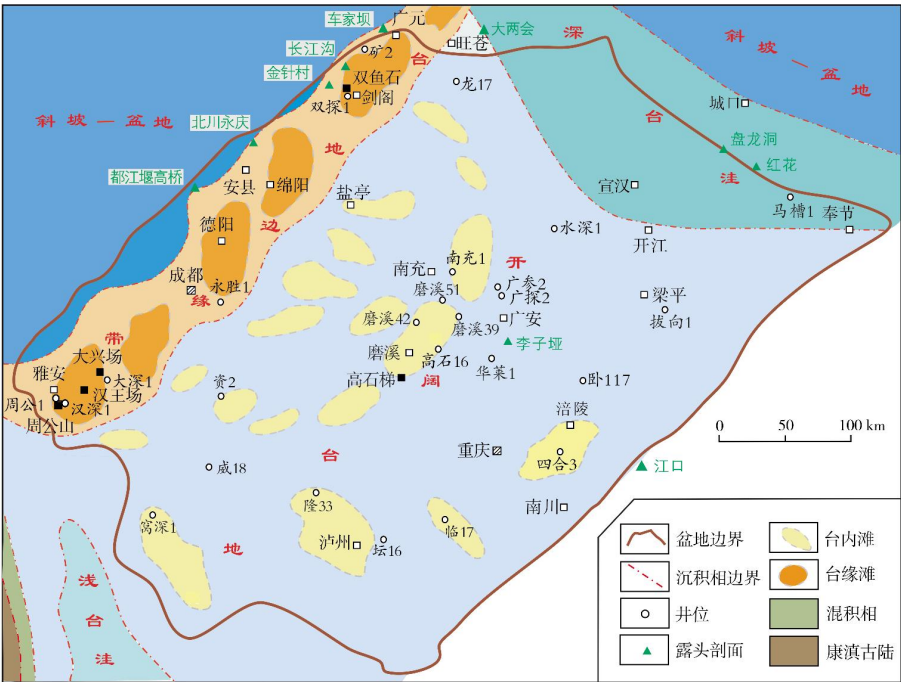


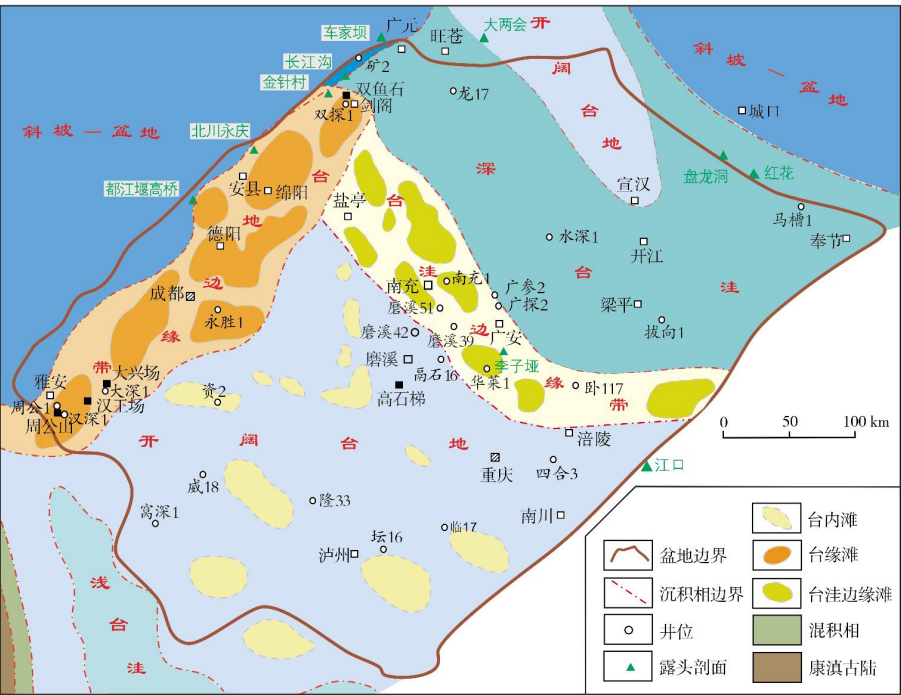
图1 四川盆地中西部栖霞组—茅口组层序地层综合柱状图

从下二叠统SQ₁层序高位域(栖霞二段)和SQ₂层序高位域(茅二段和茅三段)岩相古地理图看(图2),颗粒滩有3种类型:台缘颗粒滩、台洼边缘颗粒滩和台内颗粒滩。台缘颗粒滩相在野外、钻井和地震上

均有所反映。例如,矿2井栖霞组台缘颗粒滩分布在2 400~2 453 m井段(栖霞二段),由4个向上变浅的旋回组成:底部旋回由生物碎屑灰岩和白云岩组成,中部2个旋回由晶粒白云岩或残余颗粒白云岩组成,顶部旋回主要由斑状白云质灰岩组成;单个旋回厚度10~20 m,在伽马测井曲线上表现为低值箱状结构。又如汉深1揭示的4 730~4 850 m的台缘礁滩井段(茅二段—茅三段)纵向上可分为4个向上变浅的旋



(a) 栖霞组二段



(b) 茅口组二段—三段

图2 四川盆地栖霞组二段、茅口组二段—三段岩相古地理图

回:下部2个旋回由生物碎屑灰岩夹白云岩组成,伽马曲线表现为中低值箱状结构;上部2个旋回由白云岩组成,伽马曲线为低值箱状结构。

茅口组台缘礁滩在地震剖面上表现为大型建隆,具空白—杂乱地震反射特征。刘殊等^[20]在德阳—绵阳三维地震工区刻画多个大型礁滩建隆。在都

江堰高桥、北川永庆等地的野外剖面也发现了茅口组生物礁和厚层颗粒滩。此外,周公 1 井和永胜 1 井钻探揭示,在茅口组台缘还存在碳酸盐岩与火山岩混积的现象,但火山岩仍然具有一定储集性能。已钻探井揭示:无论是栖霞组还是茅口组,白云岩皆发育于颗粒滩亚相,且分布在滩体的上部,滩间和台洼相则不发育白云岩。这表明颗粒滩是白云岩储层赖以发育的物质基础。

2 储层主要特征

2.1 储层岩性

构成栖霞组—茅口组白云岩储层的主要岩性是晶粒白云岩和斑状灰质白云岩,晶粒白云岩包括中细晶白云岩和残余颗粒中细晶白云岩,有效储层主要分布在晶粒白云岩中,而斑状灰质白云岩储层较差。

中细晶白云岩由 0.2~0.6 mm 半自形—他形白云石晶体组成,晶体见明亮和昏暗 2 种,以线状和镶嵌状接触为主,见孔隙。经采用特殊光源的原岩恢复发现,中细晶白云岩的原岩为亮晶颗粒灰岩,颗粒以生

物碎屑为主,颗粒经白云石化转化成昏暗的白云石,而亮晶胶结物转化为明亮的白云石。残留的孔隙有 2 种:一种是残余粒间孔或生物体腔孔,另一种是在粒间孔和体腔孔基础上扩溶形成的溶孔或溶洞(图 3a, 3b)。残余颗粒白云岩与中细晶白云岩相似,只是残余颗粒结构较明显而已(图 3c—3f)。

斑状灰质白云岩在露头 and 岩心上表现为具有不规则的明暗斑块结构,明亮斑块由灰岩组成,无有效孔隙,暗色斑块由半自形—自形白云石组成,晶间孔隙发育,其中常有沥青充填,斑块间边界明显(图 3g, 3h)。经对 30 cm × 40 cm 岩块密集切片(每片厚约 1 cm)观察,白云岩斑表现为规则—半规则的管柱体或不规则球体,呈垂直、斜交和近水平方向分布,直径为 2~6 cm,长为 5~16 cm,与石灰岩的接触界面既有圆滑的,也有不规则的,有的甚至以缝合线接触;白云岩斑间常见微裂缝沟通,较宽的缝中见石灰岩角砾和白云石不完全充填,镜下常见白云石斑中含生物碎屑,生物种类与围岩类似。关于斑状灰质白云岩的成因,目前有“生物潜穴或生物搅动”、“岩溶缝洞充填物”、“不均匀白云石化”3 种观点^[2-3,5],本文不作进一步讨论。

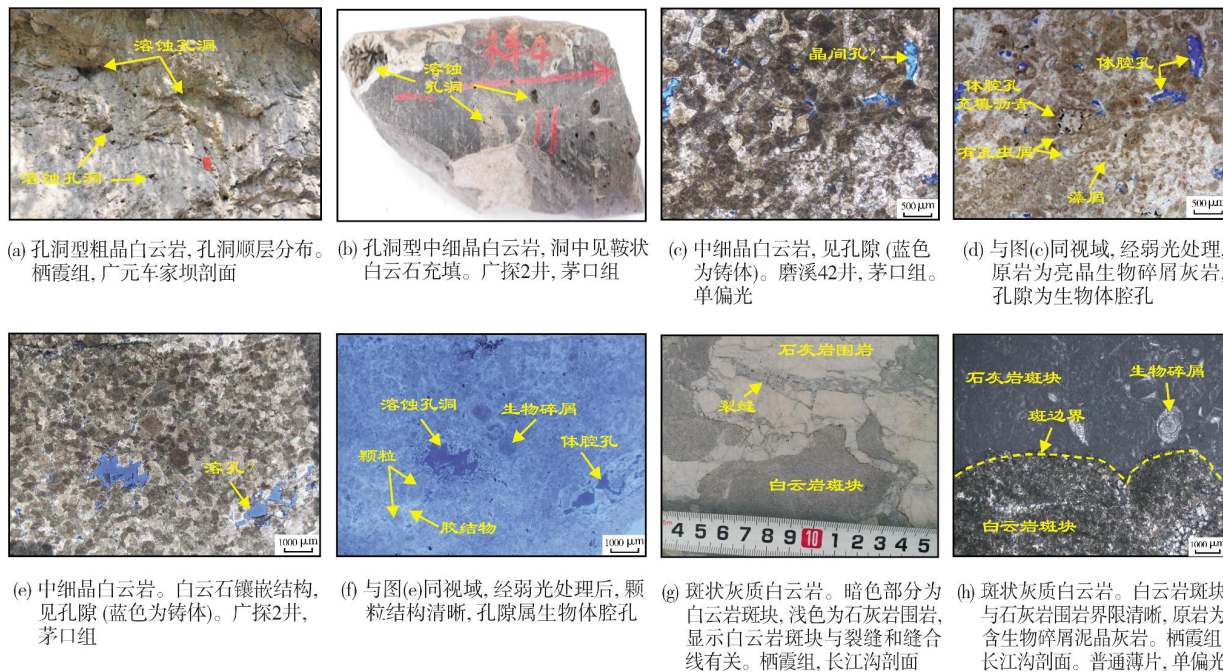


图 3 四川盆地中西部栖霞组—茅口组白云岩储层特征图

2.2 储集空间类型与物性

白云岩储层的主要储集空间是溶孔溶洞,约占

60%~80%;次为残余粒间孔及体腔孔,约占 20%~40%;再次为裂缝,缝隙度<1%。据野外和岩心观察,溶洞直径介于 1~10 cm 的居多,大致顺层分布(图 3a);溶洞的

大小和多寡随着滩体旋回的变化而变化,与滩体旋回密切相关,在靠近滩体的顶部溶洞多而大,向下逐渐变少变小。溶洞内常见2期白云石胶结物,第1期为自形白云石,第2期为鞍状白云石,残余空间见沥青半充填。残余粒间孔和体腔孔以往往往被误认为是晶间孔,本文经过图3c与图3d、图3e和图3f原岩恢复前后的对比,完全可以确认晶间孔是原生孔隙经

白云石化后调整的结果,部分形态有所变化,但性质不变。

据茅口组112个柱塞样品分析显示,储层平均孔隙度为4.57%(图4a);而栖霞组236个柱塞样品分析显示,储层平均孔隙度为3.87%(图4b)。这表明栖霞组和茅口组白云岩储层均具有良好的储集性能。

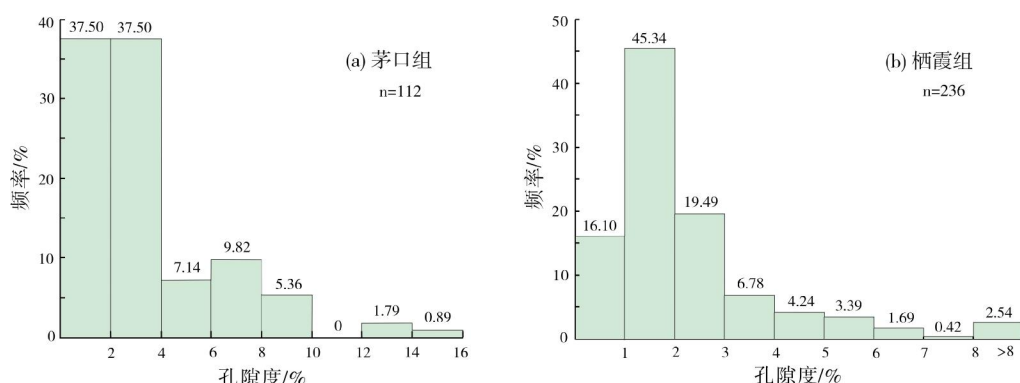


图4 四川盆地中西部栖霞组—茅口组物性分布直方图

3 储层成因

暴露颗粒滩相和准同生溶蚀作用是储层形成的主控因素。其中,暴露颗粒滩是储层发育的载体,而准同生溶蚀作用是储集空间形成的关键。

3.1 暴露颗粒滩相是储层发育的基础

沉积相研究表明,栖霞组和茅口组发育台地边缘、开阔台地、台洼及台洼边缘相带(图1)。从野外剖面 and 钻井岩心来看,台洼相由“牛眼状灰岩”、薄层硅质灰岩、泥页岩和硅质岩组成,开阔台地的滩间海亚相由泥晶灰岩、泥质灰岩或含颗粒泥晶灰岩组成,这2种岩相岩性致密,储层均不发育;台地边缘滩、台洼边缘滩以及开阔台地的台内颗粒滩主要由灰色—浅灰色颗粒灰岩、残余颗粒白云岩和斑状白云质灰岩或灰质白云岩组成,白云岩储层赋存于上述3种岩相中,在台地边缘滩、台洼边缘滩中尤为发育。这反映了位于古地貌高部位、易于暴露而受大气淡水改造的高能颗粒滩相是储层发育的物质基础。这一结论与前人在其他盆地和层位研究中得到的认识一致^[21-24]。

对颗粒滩的进一步研究揭示,颗粒滩不仅是储层发育的物质基础,也是原生储集空间的重要载体。因

为生物碎屑颗粒本身含有体腔孔,颗粒堆积时也形成了粒间孔,这些原生孔隙是有效储集空间的重要组成部分,同时也为准同生溶蚀作用提供了良好的渗流通道和改造基础,促进了准同生期溶蚀孔洞的发育,这与安岳气田龙王庙组储层的形成具有相同的特点^[24]。

3.2 准同生溶蚀作用是孔洞发育的关键因素

溶蚀孔洞是栖霞组—茅口组最重要的储集空间,约占总孔隙的60%~70%。对于这套孔洞系统的成因,前人多认为与风化壳岩溶有关,而本文认为是由准同生溶蚀作用所形成。准同生溶蚀作用与高频旋回的暴露相关:当海平面下降,处于古地貌高部位的滩体遭受暴露,一些易溶矿物,如文石、高镁方解石等,在淡水参与下易于溶解,从而产生溶蚀孔洞。本文之所以认为孔洞的形成与准同生溶蚀作用有关,有以下3点依据:

(1)从野外露头 and 钻井岩心尺度看,准同生溶蚀作用表现为形成系列顺层分布的溶蚀孔洞,且孔洞大多发育于滩体旋回的上部。如在广元车家坝剖面,可清楚观察到栖霞组上部白云岩储层具有4个孔洞发育层段,每个层段对应一个向上变浅的滩体旋回,每个旋回上部暴露面附近的溶洞大且密集,向下则逐渐变小、变少,显示暴露面控制了准同

生溶蚀作用的溶蚀程度和强度。如矿2井(图5a)在2 405~2 460 m井段发育台缘颗粒滩亚相,该段可划分出4个向上变浅的旋回:下部旋回由石灰岩过渡为白云岩,顶部旋回发育斑状白云质灰岩,中间2个旋回发育厚层白云岩,孔洞主要分布在中间这2个旋回,越靠近旋回顶部,孔洞越发育。又如磨溪42井在

4 651~4 660 m井段发育台内颗粒滩亚相与滩间海亚相,也可识别出4个次级旋回,在每个旋回下部发育无溶蚀现象的生物碎屑灰岩,在中部发育含溶孔的残余生物碎屑白云岩,在顶部发育含溶洞的生物碎屑白云岩,同样显示出越靠近旋回顶部暴露面,溶蚀作用越强的特点(图5b)。广探2井茅口组白云岩储

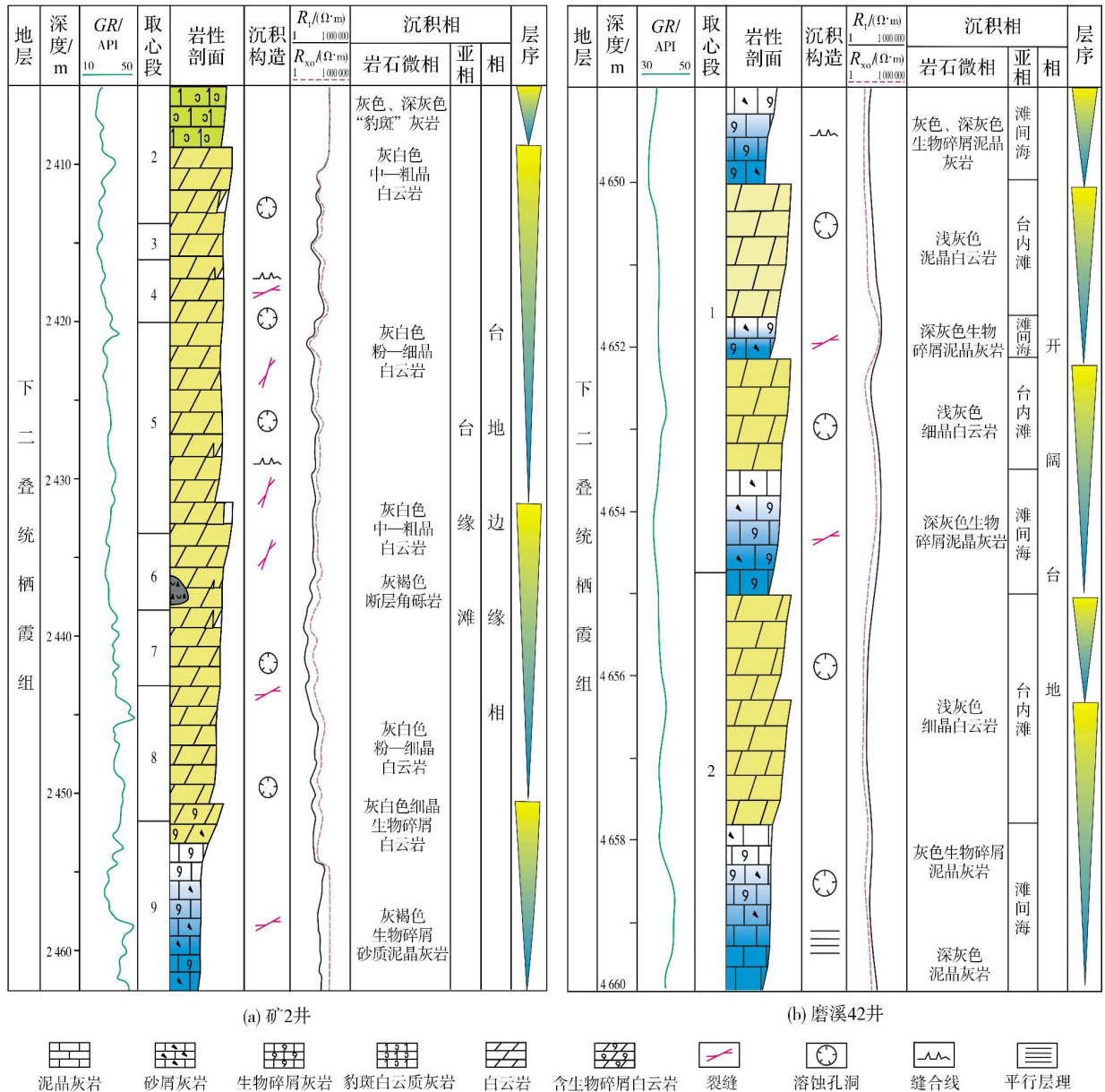


图5 四川盆地矿2井、磨溪42井栖霞组溶蚀孔洞与沉积旋回关系图

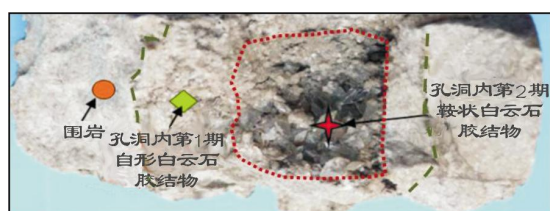
层也具有相似的特点。

(2)从薄片尺度看,准同生溶蚀作用表现为对粒间孔和生物体腔孔等原生孔隙进行扩溶,形成不同

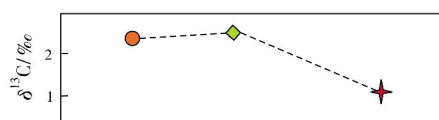
级别的溶蚀孔洞(图3b,3e)。

(3)从孔洞中的充填矿物看(图6a),有2期白云石充填物,第1期为自形白云石胶结物,第2期为粗大的

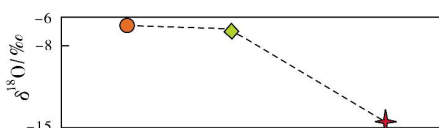
鞍状白云石。第1期胶结物与白云岩围岩的地球化学参数一致($\delta^{13}\text{C}$ 介于 2‰ ~ 3‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 介于 -8‰ ~ -6‰ , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 $0.7075\sim0.7077$)(图6b—6d),说明第1期胶结物的形成环境与围岩的形成环境相同,也就是说胶结物形成于沉积环境。而“胶结物形成时间晚于其所赋存的孔洞形成时间”,由此推断孔洞形成于准同生期。而第2期鞍状白云石的碳氧同位素明显偏轻,锶同位素偏重($\delta^{13}\text{C}$ 近于 1‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 达 -15‰ , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.7097)(图6b—6d),说明第2期胶结物形成于晚期的热液流体。



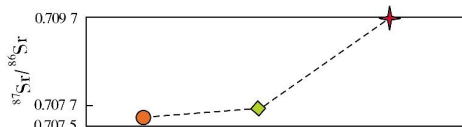
(a) 围岩与孔洞充填矿物特征



(b) 围岩与孔洞充填矿物碳同位素特征



(c) 围岩与孔洞充填矿物氧同位素特征



(d) 围岩与孔洞充填矿物锶同位素特征

图6 四川盆地矿2井栖霞组围岩与孔洞充填矿物地球化学参数特征

上述说明了准同生溶蚀作用是白云岩储层主要储集空间形成的关键因素,同时也决定了储集空间类型和储集性能。

4 储层的保持与改造

四川盆地栖霞组—茅口组白云岩储层形成后,经历了复杂的成岩作用和构造活动的改造,海水白云石化对储层保持起着关键作用,岩溶和构造碎裂作用对储层物性有所改善,而热液矿物充填作用使

储集空间显著减少。

4.1 海水白云石化作用有利于储层保持

关于四川盆地栖霞组和茅口组白云岩的成因,前人认识分歧较大,有混合水成因、热液成因、热水成因、多种白云石化成因等^[1,4,9,11,25-28]。本次研究认为这2套白云岩属海水白云石化成因,时间从准同生期延续至浅埋藏期,具体有以下3个方面的证据:

(1)从白云石分布的特点看,栖霞组和茅口组的白云岩都分布在三级层序高位域的中上部,滩相旋回的上部,紧邻高频海平面旋回的暴露面,白云石化似乎与暴露有关。但从图7a来看,川西北地区白云岩的 Ce/Ce^* 介于 $0.8\sim1.0$ 之间,比值小于 1.0 ,表现为正异常,说明白云石化作用发生于弱氧化至还原环境,由此推断在暴露时期开放的氧化环境下,滩体主要受淡水溶蚀作用影响,形成溶蚀孔洞,白云石化作用从脱离地表淡水环境后开始,延续至浅埋藏还原环境,而先存溶蚀孔洞为埋藏白云石化作用提供了良好的镁源通道。

(2)稀土元素分析显示(图7b),石灰岩与白云岩的稀土元素配分模式一致,表明白云石化的流体与石灰岩沉积时的流体相同。

(3)碳、氧、锶同位素显示(图7c,7d),川西北地区栖霞组—茅口组白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $1.8\text{‰}\sim4\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $-8\text{‰}\sim-6\text{‰}$ 之间, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 $0.7074\sim0.7079$,均落在同期海水相应的同位素数值范围之内,同样表明白云石化流体来源于早二叠世的海水;而川西南白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $3\text{‰}\sim4\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $-12\text{‰}\sim-10\text{‰}$ 之间,碳、氧同位素的数据点落在同期海水数值范围之内,说明白云石化的流体与同期海水有关,但碳同位素趋于偏重,氧同位素明显偏轻,且锶同位素显著偏重, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 达 $0.7082\sim0.7091$,这预示白云岩遭受了热液的影响。

对于白云石化的作用,前人大多认为白云石化可增孔或减孔,但从原岩恢复结果看,白云石化似乎仅是将石灰岩转化成白云岩而已,因为从白云岩中识别出来的孔隙仍然是残余粒间孔、生物体腔孔或经溶蚀作用改造而形成的孔洞。因此,白云石化的作用可能有2个方面:一是白云石化将灰质矿物转化为白云石,这增加了岩石强度和抗压溶能力,进而能有效抑制岩石在进一步埋藏过程的压溶及其引起的

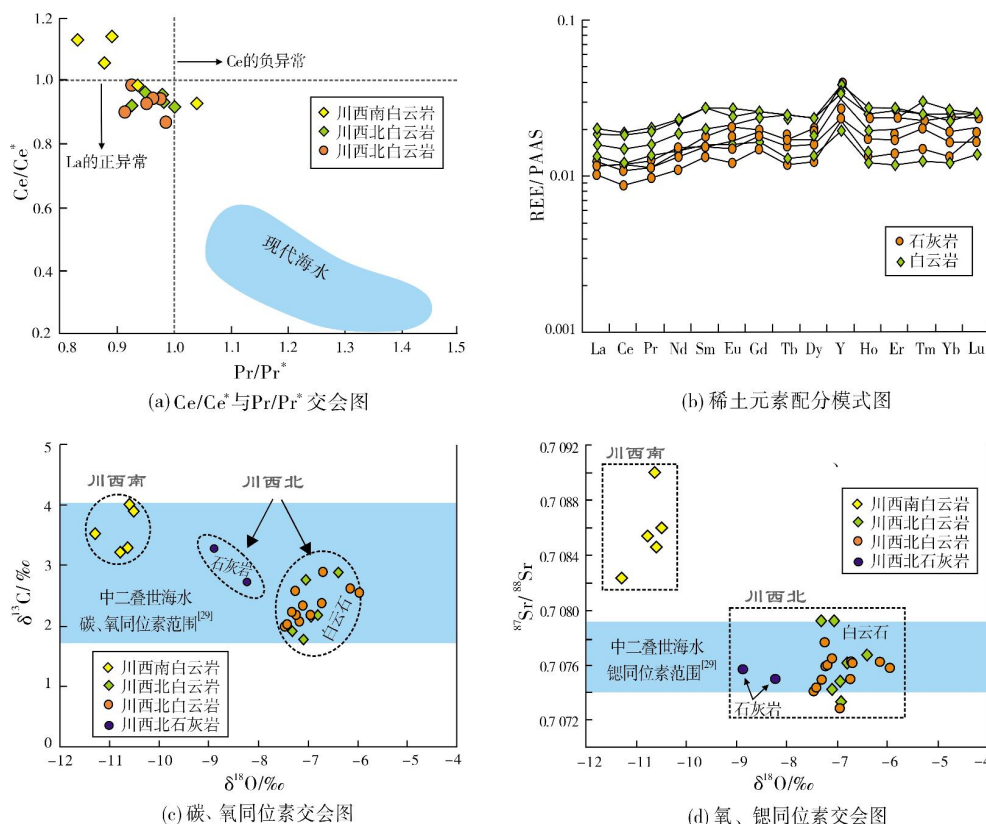


图 7 四川盆地栖霞组—茅口组白云岩碳、氧、锶同位素及稀土元素特征

胶结物沉淀,使早期形成的孔隙得以保存下来,这对储层的保持至关重要;二是使早期相对孤立的孔洞通过白云石晶间缝连通,改善了岩石的渗透性,从而提高了储层的品质。

4.2 岩溶作用改善储层物性

常见的岩溶作用有 2 种:一种与三级层序界面有关,有人称之为层间岩溶作用;另一种与构造抬升暴露有关,通常叫风化壳岩溶作用。四川盆地栖霞组储层主要经历了层间岩溶作用改造,而茅口组储层则经历了上述 2 种岩溶的叠加改造。

层间岩溶作用主要对先存孔隙带进一步溶蚀改造,从而扩大了储集空间。当海平面下降至坡折带的低位域期间,由于整个碳酸盐台地暴露地表,沉积物遭受风化剥蚀和大气淡水的淋滤溶蚀作用,造成了少量地层的缺失和岩溶缝洞系统的形成,但因暴露时间较短(几万年至几十万年),一般未形成典型的风化壳,上、下地层也以连续或间断面接触。据研究,栖霞组/茅口组之间、茅三段/茅四段之间为岩相转换型层序界面,界面下伏地层为厚层块状颗

粒灰岩或白云岩,上部为薄层泥质灰岩和泥晶灰岩或硅质泥页岩,表现出由浅水(或暴露)到迅速海侵水体变深的转换特点,期间存在暴露溶蚀的地质背景。从广元车家坝剖面栖霞组白云岩中发育几厘米至几十厘米的洞穴(现今已垮塌,由与围岩相同的颗粒白云岩角砾充填)来看,该时期的岩溶作用较强,对先存孔隙带具有明显的改造,其建设性作用毋庸置疑,但对储集空间的增量难以估算,值得今后深入研究。

风化壳岩溶对茅口组白云岩储层的叠加改造有一定影响。野外观察和钻探揭示,受东吴运动的影响,茅口晚期台地隆升致使茅口组上部遭受剥蚀,历经了大约 8 Ma 的表生风化作用,四川盆地范围内大多缺失茅四段,部分地区剥蚀至茅二段,茅口组与上覆龙潭组之间为不整合接触。川西、川北及川东地区均可见到明显的风化壳,这表明茅口组上部具备风化壳岩溶的形成条件,但风化壳岩溶对白云岩储集空间的贡献似乎不大,这体现在 2 个方面:首先,广元长沟和金针村、旺苍大两会、宣汉盘龙洞、华蓥李子垭、开县红花、武隆江口等剖面揭示,风化壳之

下的茅口组(主要是茅二段、茅三段)存在岩溶现象,但岩溶缝洞系统基本被铝土质泥岩或龙潭组暗色泥岩充填;高石梯—磨溪地区 50 余口探井揭示,东吴构造面之下的放空、漏失现象少,少量取心资料也显示发育有溶沟溶缝,但也被龙潭组泥页岩充填。其次,在已有钻井揭示的茅口组白云岩储层孔洞中,目前尚未发现风化壳上覆地层物质的充填或渗流粉沙,以上迹象显示风化壳岩溶作用可能尚未影响到茅口组白云岩储层。因此,依据目前的资料,笔者认为风化壳岩溶的主要贡献是形成了茅口组缝洞型石灰岩储层,这方面的研究已有相关报道^[13],但对白云岩储层尤其是栖霞组白云岩储层的叠加改造研究方面的报道有限。

综上所述,层间岩溶作用能改善白云岩储层物性,而风化壳岩溶作用对白云岩储层的改善影响不大。

4.3 热液充填作用使储层致密

热液矿物充填作用是储层减孔的最主要因素。从已有取心井和野外露头看,栖霞组和茅口组白云岩溶蚀孔洞中普遍充填鞍状白云石、天青石和石英等低温热液矿物。据肉眼统计,充填程度可达 50%~100%;利用 96 块薄片通过镜下鉴定统计,孔洞充填程度主要介于 30%~80%之间。这些均说明热液矿物充填的减孔作用十分明显。热液来源有 2 种途径:一是源于火山热液,二是源于下伏硅质碎屑岩地层水。

受峨眉地裂运动的影响,四川盆地茅口晚期出现火山喷发作用,尤其在川西南,玄武岩喷发作用强、分布面积广;在川西北及川东宣汉—开江地区发现有同期辉绿岩侵入,说明该时期火山活动较强烈,推测与之相关的火山热液活动也较活跃。而栖霞组—茅口组下伏广泛的硅质碎屑岩地层,如志留系、下寒武统及前震旦系,这些硅质碎屑岩层同样可以提供热液。因此,上述 2 种来源的热液均可能对栖霞组—茅口组白云岩储层进行改造。从图 7d 来看,川西南白云岩铀同位素比同期海水明显偏高,说明有壳源物质的加入,暗示热液可能来自下伏硅质碎屑岩层,或在白云石化时有淡水加入。

上述 3 种成岩作用对储层保存和改造至关重要,其他的一些成岩作用如硅化作用、压实压溶作用、构造碎裂作用等对储层改造也有一定影响,限于

篇幅,本文不再展开论述。

5 有利储层分布预测

据储层成因分析,经历早期暴露溶蚀的颗粒滩才能形成有效储层。理论上讲,能同时满足滩相沉积和准同生溶蚀作用这 2 个主控因素的地质背景有 3 种:一是沉积期古地貌高部位的滩体,二是快速堆积的礁滩体,三是进积速率低于海平面下降速率的滩体。据此,并结合储层的保持与改造,综合预测了栖霞组和茅口组白云岩有利储层分布(图 8)。图 8a 是栖霞组白云岩储层分布图,揭示川西台缘带储层厚度最大,一般为 10~50 m,汉王场和大兴场一带最厚达 70 m,这与栖霞组沉积时西高东低的古地理背景相符。图 8b 为茅口组白云岩储层分布图,显示储层主要沿川西台缘滩和川中台洼边缘滩带分布:川西台缘带既是古地貌高部位,也是茅口组纵向加积最快的地方,滩体厚,暴露频繁,因此,储层相对发育,累计厚度可达 40 m;而川中盐亭—广安台洼边缘带是滩体进积的主要地带,由于海平面下降快,滩体间歇暴露,因此储层单层厚度小,但累计达 5~25 m,且具有分布范围宽的特点。综合栖霞组—茅口组储层分布特点,初步优选出剑阁—雅安和盐亭—广安 2 个有利储层分布区。

5.1 剑阁—雅安有利区

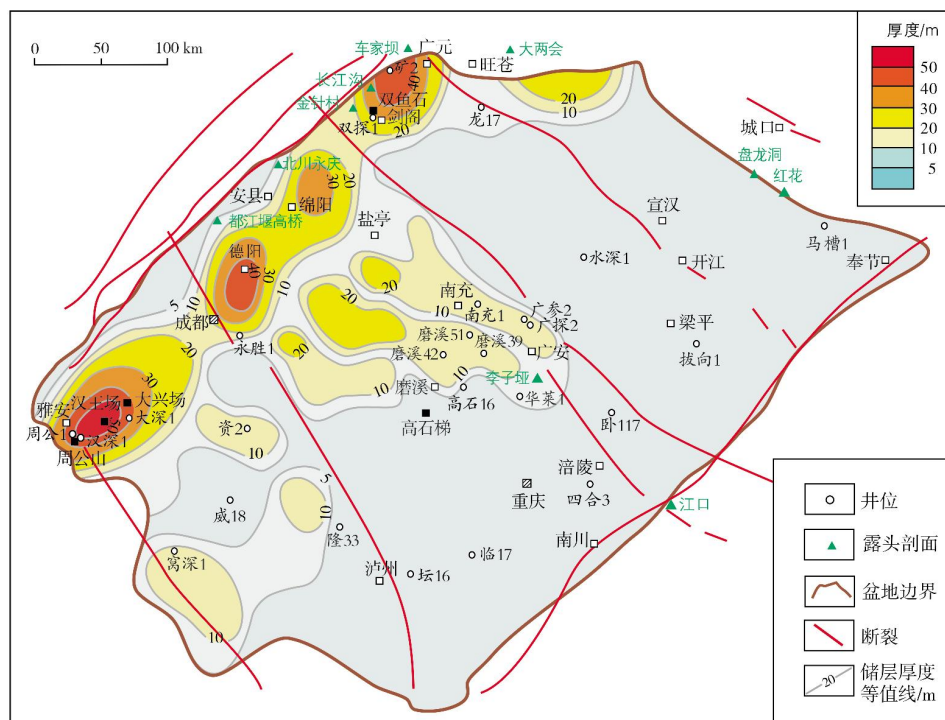
该有利区位于龙门山前,沿剑阁—绵阳—雅安一线展布,面积约 20 000 km²。岩相古地理研究认为该区是栖霞期—茅口期台缘颗粒滩有利分布区(图 2)^[16],双探 1、大深 1 井等探井揭示发育栖霞组和茅口组 2 套白云岩储层,储层累计厚度 30~100 m,在成都附近完钻的永胜 1 井揭示二叠系还发育火山岩型储层,说明该区不仅储层发育,而且储层类型多样。目前,在北部双鱼石地区和南部周公山及大兴场地区的钻探均获得高产工业气流,本区带的优选将为下一步勘探部署提供支撑。

5.2 盐亭—广安有利区

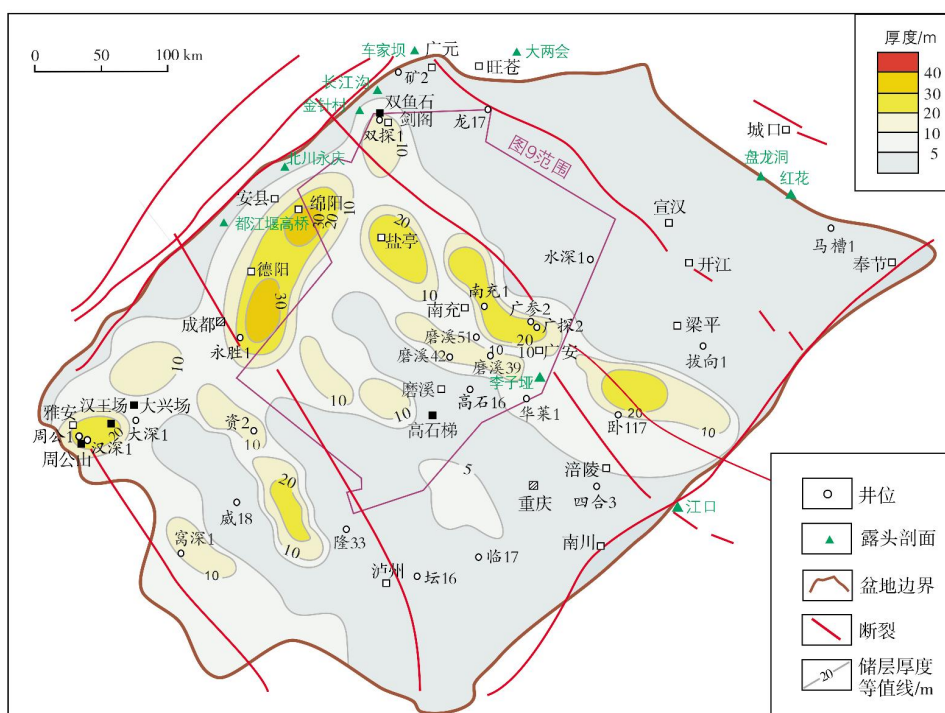
该区位于大川中地区,沿盐亭—南充—广安一带近东西向展布,面积约 18 000 km²,是茅口组台洼边缘颗粒滩有利发育区(图 2b)^[16]。据茅口组顶界向下 0~25 ms 时窗的最大波谷振幅地震属性(图 9)分析,该区茅口组颗粒滩分布面积达 9 800 km²,探井揭

示白云岩储层一般厚 10~20m, 南充 1 井和广探 2 井厚达 30m, 且南充 1 井、磨溪 39 井、广参 2 井、华

莱 1 井获得工业气流, 展示该区带茅口组具备良好储集性能, 勘探潜力不容小觑。



(a) 栖霞组



(b) 茅口组

图 8 四川盆地栖霞组、茅口组白云岩储层分布预测图

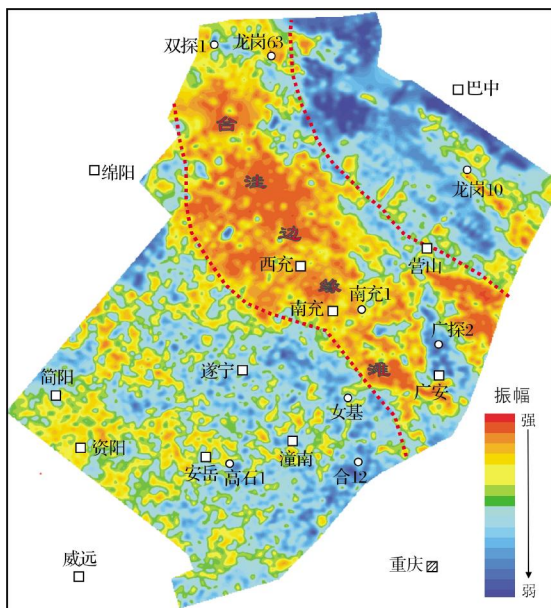


图9 川中地区茅口组颗粒滩分布预测图

地震工区范围参见图8b

6 结论

(1)四川盆地中西部栖霞组和茅口组白云岩储层均发育在高位域,台地边缘和台洼边缘等古地貌高部位是储层发育的有利古地理背景,颗粒滩是储层发育的物质基础。

(2)栖霞组和茅口组储层的主要岩性是残余颗粒白云岩和中细晶白云岩,溶蚀孔洞、粒间(内)孔(晶间孔)和裂缝是主要储集空间,栖霞组和茅口组白云岩储层的平均孔隙度分别为3.87%、4.57%,均具良好储集性能。

(3)颗粒滩和准同生期溶蚀作用控制了栖霞组—茅口组白云岩储层的形成和分布,海水白云石化作用是储层得以保持的关键因素,岩溶作用对储层的改造有一定影响,但还难以进行定量评估,而热液充填作用是造成储层致密的主要因素。

(4)地质、地球物理综合预测剑阁—雅安地区和盐亭—广安地区是2个白云岩储层的有利分布区,是天然气勘探的主攻方向。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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,2013,3(1): 68-74.

- [3] 吕杰. 四川盆地西部下二叠统白云岩形成机制[D]. 成都: 成都理工大学,2013.
- [4] 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.
- [5] 徐世琦,周建文,曾庆,等. 龙门山北段二叠系栖霞组二段白云岩储层特征[J]. 天然气工业,2005, 25(增刊A): 59-61.
- [6] 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(3): 442-448.
- [7] 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(4): 15-20.
- [8] 黄思静,吕杰,兰叶芳,等. 四川盆地西部中二叠统白云岩/石的主要结构类型;兼论其与川东北上二叠统一三叠系白云岩/石的差异[J]. 岩石学报,2011,27(8): 2253-2262.
- [9] 田景春,林小兵,张翔,等. 四川盆地中二叠统栖霞组滩相白云岩多重成因机理及叠加效应[J]. 岩石学报,2014,30(3): 679-686.
- [10] 曾德铭,石新,王兴志,等. 川西北地区下二叠统栖霞组滩相储层特征及其分布[J]. 天然气工业,2010,30(12): 25-28.
- [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(9): 25-32.
- [12] 蒋晓迪,朱仕军,张光荣,等. 四川盆地蜀南地区茅口组储层预测研究[J]. 天然气勘探与开发,2014,37(1): 37-40,44.
- [13] 桑琴,黄静,程超,等. 蜀南地区茅口组古岩溶识别标志及储层预测[J]. 大庆石油学院学报,2012,36(2): 53-57,64.
- [14] 郝毅,周进高,倪超,等. 川西北中二叠统茅口组储层特征及成因[J]. 四川地质学报,2014,34(4): 501-504.
- [15] 王一刚,文应初,洪海涛,等. 四川盆地开江—梁平海槽内发现大隆组[J]. 天然气工业,2006,26(9): 32-36.
- [16] 周进高,姚根顺,杨光,等. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. 天然气工业,2016,36(4): 8-15.
- [17] 罗志立,金以钟,朱夔玉,等. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. 地质论评,1988,34(1): 11-24.
- [18] HALLEY R B, HARRIS P M, HINE A C. Bank margin environment[M]//SCHOLLE P A, BEBOUT D G, MOORE C H. Carbonate Depositional Environments. AAPG memoir 33, 1983: 463-506.
- [19] 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.
- [20] 刘殊,张虹,唐建明,等. 川西坳陷二叠系礁滩相预测及油气远景评价[J]. 石油物探,2014,53(1): 106-115.
- [21] 赵文智,沈安江,周进高,等. 礁滩储集层类型、特征、成因及勘探意义:以塔里木和四川盆地为例[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3): 257-267.
- [22] 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.
- [23] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 545-554.
- [24] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166.
- [25] 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(4): 562-569.
- [26] 解发川. 四川盆地西—北部中二叠统热液作用及对储层影响[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [27] 黄思静, 李小宁, 黄可可, 等. 四川盆地西部栖霞组热液白云岩中的自生非碳酸盐矿物[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 343-352.
- [28] 金振奎, 冯增昭. 滇东—川西下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(3): 383-389.
- [29] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical geology, 1999, 161(1/3): 59-88.

编辑: 黄革萍

Genesis and distribution of vuggy dolomite reservoirs of the Lower Permian Qixia Formation and Maokou Formation, western-central Sichuan Basin

ZHOU Jin'gao, HAO Yi, DENG Hongying, GU Mingfeng, PAN Liyin, YAO qianying, YANG Yuran, LOU Xue

Abstract: Recently, continuous breakthrough have been made in the exploration of Qixia Formation and Maokou Formation in the western-central Sichuan Basin, which has attracted extensive attention to the dolomite reservoir. Based on the geological background of reservoir formation, taking outcrops and cores as the access point and combining with the experimental analysis, four significant conclusions on the genesis and distribution of reservoir are drawn: (1) Dolomite reservoirs in both Qixia Formation and Maokou Formation developed in the highstand systems tract. The platform margin facies and the syncline margin facies are the main sedimentary environment of reservoir development. (2) Crystalline dolomite, including residual granular dolomite and medium to fine crystalline dolomite, is the main lithology of reservoir, and dissolution holes, residual intergranular pores, biological coelomic pores and fractures are the main reservoir space. Both the Qixia Formation with an average porosity of 3.87% and the Maokou Formation with an average porosity of 4.57% show good reservoir property. (3) Grain beach subfacies and penecontemporaneous dissolution are the two major controlling factors of reservoir formation. Grain beach is the material basis of reservoir development and the carrier of primary pore. Penecontemporaneous dissolution is the key to improve the reservoir space by enlarging primary pores into holes. (4) The marginal-platform shoals along Jian'ge-Ya'an and the marginal-syncline shoals along Yanting-Guang'an are the favorable zones of dolomite reservoir development and the main target areas of gas exploration.

Key words: sedimentary facies; dolomite reservoir; favorable zone; Qixia Formation; Maokou Formation; Sichuan Basin

ZHOU Jin'gao, First author: PhD, Professor. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, No. 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China