

# 川西北下二叠统栖霞组有利成岩作用与孔隙演化

蒋志斌 王兴志 曾德铭 鲁铁梅 王保全 张金友

(西南石油大学资源与环境学院, 四川 成都 610500)

**摘要:**据宏观、微观及地球化学特征等综合分析,川西北下二叠统栖霞组储层段主要的建设性成岩作用有同生-准同生期溶解、埋藏期溶解、构造抬升期溶解、混合水白云石化、埋藏白云石化及重结晶作用。其中埋藏期溶蚀和埋藏白云石化作用对储集层的储集空间贡献最大,其产生的晶间孔、晶间溶孔、洞、缝是现今该层段主要的储集空间;其次是重结晶作用。重结晶作用对储集空间的直接贡献不大,但重结晶作用提高了岩石的有效孔隙度和渗透率从而为后期的溶蚀作用提供了条件;而同生期的溶解作用形成的孔隙由于后期的压实、胶结等作用破坏而几乎消失殆尽。

**关键词:**成岩作用;白云岩;栖霞组;孔隙演化;四川盆地西北部

**中图分类号:**P534.46 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)01-0101-09

川西北下二叠统栖霞组广泛发育白云岩,该套白云岩能够在一定范围内加以追踪对比,并且具有很好的储集性能。对于控制该套地层孔隙发育的机理何在是当前勘探最关心的问题。众所周知,碳酸盐易受成岩作用的影响,碳酸盐储集层的储集空间大多以次生孔隙为主。笔者经研究发现该套地层储层的孔隙发育与否及发育的好坏在很大程度上受成岩作用的控制,因此通过此次的研究希望能够为以后该地区该套地层的勘探提供有益的地质资料。

## 1 概 况

该套地层在区内厚 70~130 m,按岩性可进一步由下至上分为栖霞一段和栖霞二段<sup>[1]</sup>。其中白云岩广泛发育于栖霞组二段,因此也是笔者研究的重点。区内栖霞一段主要是在低能缓坡环境<sup>[1-4]</sup>下沉积的一套主要由中-薄层状深灰、黑灰色似“眼球”状石灰岩、生物(屑)质石灰岩、含生物(屑)泥晶石灰岩、泥晶石灰岩夹泥质泥晶石灰岩组成。该类岩石在成岩期由于强压实、胶结等破坏性作用导致原生储集空间消失殆尽,岩石的储集性能差,但具有较好的生油能力。

栖霞二段主要是在碳酸盐缓坡环境中高能滩相<sup>[3-7]</sup>

下沉积的一套由厚层块状灰、浅灰色的泥晶生物(屑)灰岩、亮晶生物(屑)石灰岩、生物(屑)泥晶石灰岩和褐灰、灰白色的云质“豹斑”石灰岩、中-粗晶白云岩和颗粒白云岩等构成(图 1),其中云质“豹斑”石灰岩和中-粗晶白云岩在龙门山前山北段的通口-团山、天井山-矿山梁和曾家山一带较为发育,厚度大。该类岩石由于沉积时能量高,原生孔发育,并且由于后期有利成岩作用的改造导致储集空间极为发育,具有较好的储集性能,特别是中-粗晶白云岩中含有大量的孔、洞、缝,构成了区内研究层段中最主要的一类储集岩。

## 2 成岩作用类型、特征及其与孔隙关系

通过对区内研究层段的宏观、微观和地球化学研究,其储层中所经历的有利成岩作用类型主要有云化作用、重结晶作用和溶蚀作用等,它们对储集空间的影响明显不同<sup>[7,8]</sup>(图 1)。其中云化作用和溶解作用是次生孔隙形成的关键原因,其次是重结晶作用。

### 2.1 重结晶作用

#### (1)特征

收稿日期:2008-05-07;改回日期:2008-09-01

基金项目:教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NECT-04-0911)和四川省重点建设学科建设项目(SZD0414)联合资助。

作者简介:蒋志斌,男,1981年生,硕士生,主要从事沉积学及储层地质学研究;E-mail:ltmjzb@qq.com。

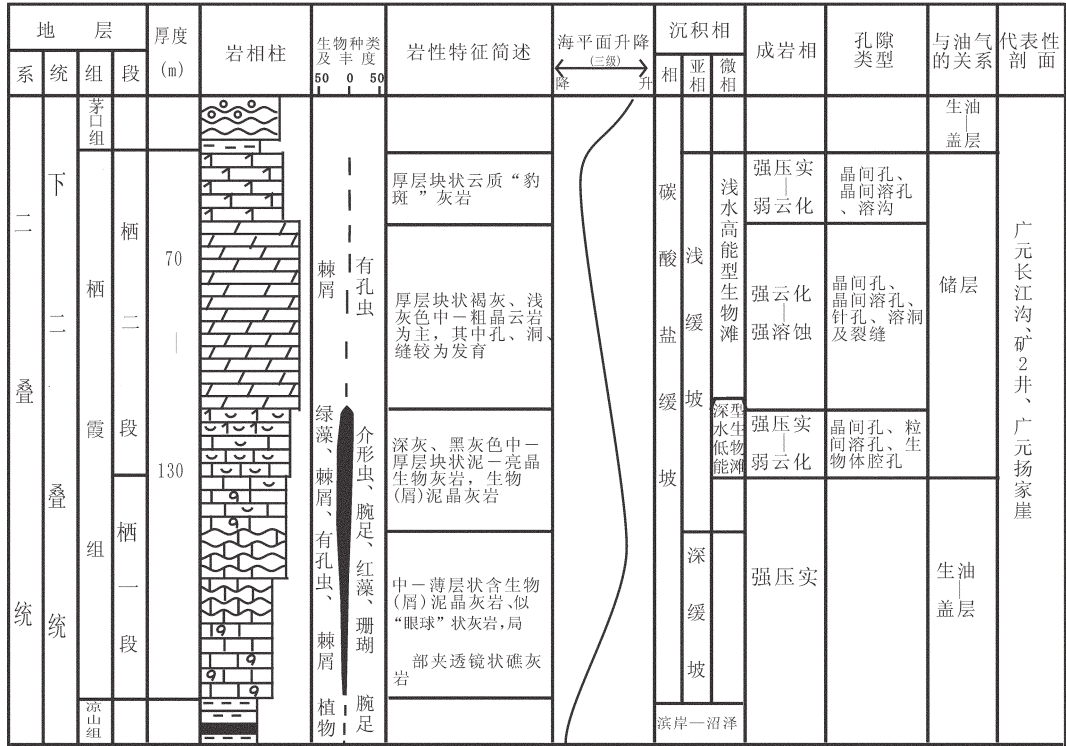


图 1 四川盆地西北部栖霞组地层、成岩综合柱状图  
 Fig.1 Stratigraphic and diagenetic integrated column of the Qixia Formation in northwest Sichuan basin

区内栖霞组白云岩中的重结晶作用较强，对储层的建设性明显。重结晶作用的结果一方面导致晶粒变粗和趋于自形，使得早期细粒白云岩中的晶间微孔重新组合调整，变成较大的晶间孔(图 2-A)；同时，孔隙之间的喉道更加平直和光滑，从而提高了岩石的有效孔隙度和渗透率。另一方面，重结晶导致白云岩中的有序度和包裹体均一温度升高，有序度一般 0.9~1，包裹体均一温度一般 110~127℃。此外，重结晶部位还是地层中的薄弱部位，有利于后期建设性成岩作用的进行。

(2)成因

碳酸盐沉积物中的细小矿物质点，由于具有较大的表面积和棱角，其不饱和键也较多，因而易于溶解，被溶解的物质向邻近较大晶粒的外侧运移并在其上沉淀再结晶，使晶体增大的作用称之为重结晶作用。重结晶作用及强弱受多种因素的控制，一般情况下，随埋藏深度的增加和温度的升高和增强，重结晶作用越强，晶粒越大。

(3)与储集空间关系

一般认为重结晶作用都是一种破坏性成岩作用<sup>[3,5,9]</sup>，但是研究区栖霞组白云岩的重结晶确实一定程度上为后期的溶蚀作用提供了条件，由镜下可知(图 2-A)，重结晶强烈的部位溶蚀作用强烈，反之溶蚀孔隙不发育。但是重结晶作用对于储集层储集空间直接的贡献不大，对孔隙度的直接贡献一般小于 1%。

2.2 白云石化作用

现代碳酸盐沉积物和古代碳酸盐岩中都有白云石的存在。但是白云石在成因和产状上都是一个需要进一步研究的有问题的矿物。目前还不能够证明，在沉积作用的温度(<50℃)条件下<sup>[9-11]</sup>，用人工方法从海水中直接沉淀白云石。大规模的白云石化过程中，白云石形成需要考虑两个问题：Mg<sup>2+</sup>来源和白云石化流体的流动方式<sup>[12]</sup>。海水是富含 Mg<sup>2+</sup>的，并且也是白云石化过程中 Mg<sup>2+</sup>的来源，但海水对白云石的沉淀有动力学障碍。因此，白云石化作用时还需克

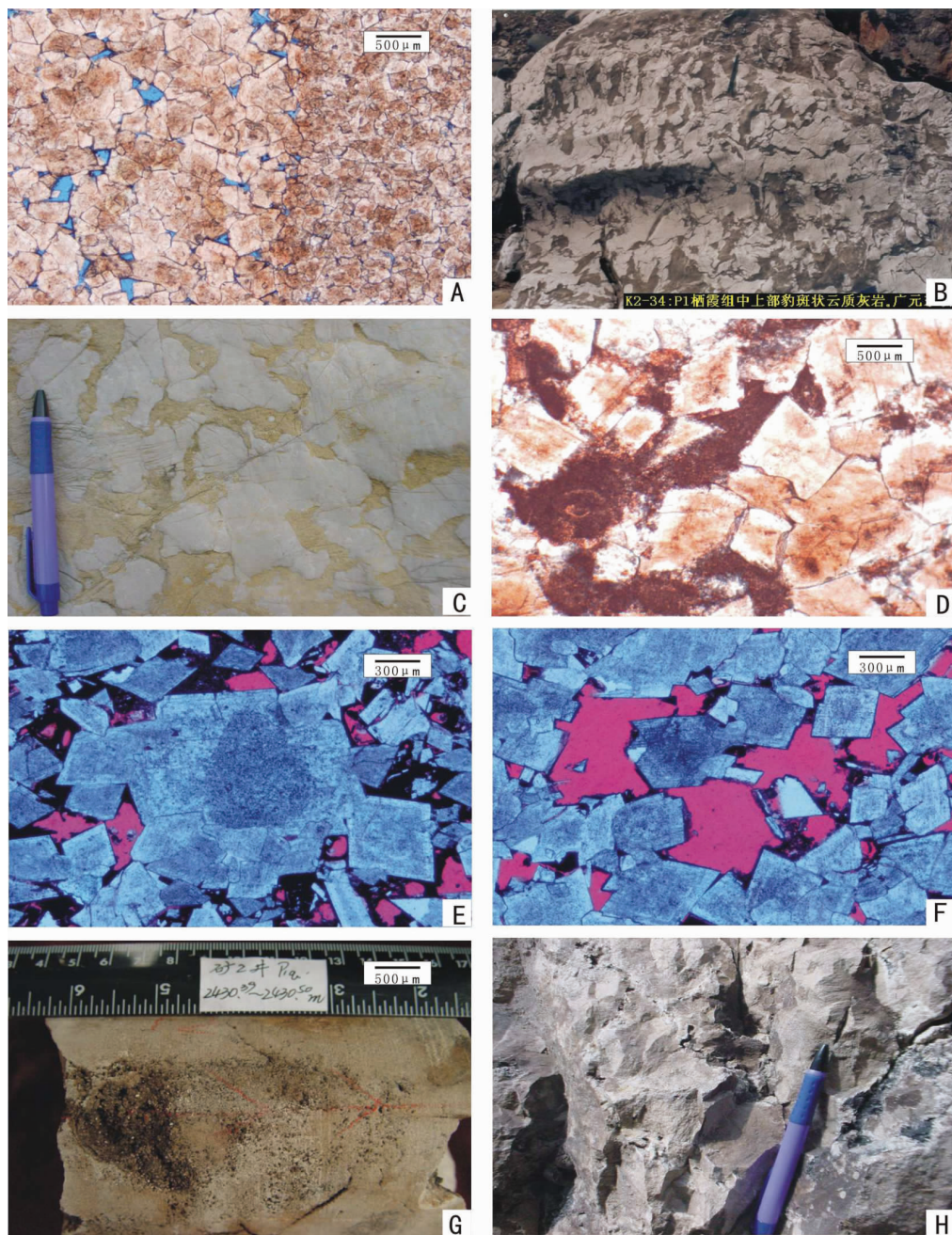


图 2 四川盆地西北部栖霞组晶粒白云岩和云质“豹斑”灰岩宏、微观特征照片

A—晶粒白云岩,重结晶强的部位晶间溶孔发育好,而重结晶弱的部位晶间溶孔发育较差,单偏光;  
 B—云质豹斑灰岩,云质豹斑呈长条状近垂直分布;C—云质豹斑灰岩中的干裂构造发育;D—云质豹斑灰岩,镜下可见豹斑由中晶白云岩组成,栖霞二段,单偏光;E—晶粒白云岩,镜下可见生物碎屑的残余结构,栖霞二段,单偏光;F—晶粒白云岩,其中的晶间孔和晶间溶孔发育,栖霞二段,单偏光;G—中粗晶白云岩,其中蜂窝状溶孔、溶洞发育。广元长江沟剖面,栖霞二段;H—晶粒白云岩,由构造期溶蚀作用产生的裂缝及沿裂缝分布的溶蚀扩大缝和小溶洞。广元杨家崖剖面,栖霞二段

Fig. 2 Microscopic and macroscopic features of crystalline dolomite of the Qixia Formation in northwest Sichuan basin  
 A—Crystalline dolomite, with well-developed intercrystal solution pores at the strong recrystallization position, and poorly-developed intercrystal solution pores in other places, plainlight; B—“Leopard spots” limestone, with nearly vertical distribution of stripes of “leopard spots”;  
 C—Well-developed drying cracks in “leopard spots” limestone; D—“Leopard spots” limestone (under the microscope, leopard spots are formed by medium-crystalline dolomite, debris of creature residual structure could be seen).; E—Crystalline dolomite, with well developed intercrystal pores and intercrystal solution pores, plainlight; G—Medium-crystalline dolomite, with well-developed honeycomb solution holes and dissolved caverns, the Guangyuan section of Yangtze River ditch; H—Crystalline dolomite, with the construction period cracks and erosion expansion fractures and small caves observed along the cracks, the Yangjiaya section of Guangyuan

服种种动力学障碍。基于在白云岩油气勘探中所遇到的难题, Allan 和 Wiggins<sup>[13]</sup>提出了一种地球化学的方法来评价白云岩的成因和分布。这种技术在几年的实践中证明是有经济价值的行之有效的方法<sup>[14]</sup>。笔者也是根据他们的方法并结合区内栖霞组的沉积环境对栖霞组白云岩的成因、产状等进行研究的。

根据栖霞组白云岩的组构、产状及岩相组合特征可以将其划分为:云质“豹斑”和其下伏的晶粒白云岩两种类型。这两种白云岩无论是宏观产状还是微观特征都有较大的差异。此次研究综合已有的钻井、地球化学及薄片分析等资料认为它们具有不同的成因。研究认为:云质豹斑灰岩中的“豹斑”为混合水白云石化<sup>[13,14]</sup>的产物,而其下伏晶粒白云岩应为埋藏成因。

### 2.2.1 混合水白云石化

#### (1) 特征

云质“豹斑”多呈大小为 3 cm×10 cm~5 cm×20 cm 的褐灰色条带状、管状分布于浅灰色的泥-亮晶生物(屑)灰岩之中,条带垂直或近于垂直层面分布,颜色较围岩深,其顶部岩层面上暴露干裂常见(图 2-B、C)。由粉-中晶他形粒状白云石构成(图 2-D),并含少量围岩角砾、生物碎屑和泥质,与围岩渐变或突变接触。微量元素中的 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Sr<sup>2+</sup>含量极低;阴极射线不发光;未见有包裹体的分布;其碳氧同位素较围岩偏负,但较下伏晶粒白云岩偏正,  $\delta^{18}\text{O}$  一般为-4.72‰~-3.14‰(PDB),平均是-3.79‰(PDB),  $\delta^{13}\text{C}$  一般为 2.80‰~3.53‰(PDB),平均是 3.12‰(PDB),呈低正值;有序度较低,为 0.77~0.82;白云岩(CaCO<sub>3</sub>)摩尔分数为 50.7~55.3,平均 52.9,属于富钙白云石(表 1)。

#### (2) 成因

栖霞末期,区域性的三级海平面的下降导致龙门山前山北段早期固结-半固结浅水-较浅水高能型生物滩较长时间暴露于水体之上,受到大气淡水和海水的共同影响。一方面,在栖霞组顶部形成一个可追踪对比的 II 型层序界面(整合面或假整合面),该界面为栖霞组与上覆茅口组的分界面,界面上下岩性差异明显;另一方面,栖霞组顶部渗流带中上部下渗的大气淡水移动较快,大气淡水停留时间短,形成的溶沟、溶缝被淡水白云石和机械碎屑充填,构成云质“豹斑”。另外,据其氧同位素值较二叠纪海水<sup>[14,15]</sup>偏负,未见包裹体、阴极发光下不发光及有序度较低等地球化学

特征显示其为近地表环境中形成的,再结合其所处的古地理环境认为云质“豹斑”应为混合水白云石化的产物。

#### (3) 与储集空间关系

据薄片观察云质“豹斑”灰岩仅可见少量晶间孔和晶间溶孔,常规孔隙度一般 0.5%~3%,渗透率极低,局部具有一定储集性能。由此可知,此处混合水白云石化作用对储层储集空间的贡献不大。

### 2.2.2 埋藏白云石化

#### (1) 特征

晶粒白云岩晶粒大小和自形程度不均,在溶洞和裂缝周围,白云石晶粒一般较粗大、自形,以粗粒的自形-半自形晶常见,孔隙也较发育;而其他部位,白云石晶粒相对较小,以中粒的他形-半自形晶为主,多镶嵌接触;局部见较多的生物(屑)残余结构(图 2-E)。阴极射线下发光暗淡均一,一般呈暗褐色,局部可见到较多生物屑颗粒的残余结构,推测这类白云岩为早期生物滩经晚期埋藏交代作用形成;其氧碳同位素中的  $\delta^{18}\text{O}$  一般为-7.41‰~-7.04‰(PDB),平均为-7.14‰(PDB)呈低负值; $\delta^{13}\text{C}$  一般为 2.60‰~2.95‰(PDB),平均为 2.82‰(PDB)呈低正值;有序度较高,平均为 0.95;均一温度较高,在 110~127℃。

#### (2) 成因

晶粒白云岩的岩石学和地球化学特征都与“混

表 1 川西北地区栖霞组云质“豹斑”灰岩和晶粒白云岩地化特征

Table 1 Geochemical characteristics of the “leopard spots” limestone and crystal grain dolomite in northwest Sichuan Basin

特征		云质“豹斑”灰岩中的云质“豹斑”	块状晶粒白云岩
层位		栖霞组顶部	栖霞组中上部
同位素 (PDB‰)	$\delta^{18}\text{O}$	-4.72~-3.30/-3.79	-7.41~-7.04/-7.14
	$\delta^{13}\text{C}$	2.80~3.53/3.12	2.60~2.95/2.82
白云石有序度		0.77~0.96/0.825	0.90~1/0.95
白云石(CaCO <sub>3</sub> )摩尔分数		50.7~55.3/52.9	49~50.7/49.6
阴极发光		不发光	暗褐色
包裹体	类型	未见	少量
	均一温度/℃		110~127℃
形成环境及成因		混和水成因	埋藏成因

合水”模式不相符合,其地球化学特征和云质“豹斑”明显不同(表 1),其氧同位素明显负于二叠纪海水<sup>[14-16]</sup>,并且较云质“豹斑”更偏负,其包裹体温度也显示该类白云岩是在埋藏期交代灰岩而形成的。另外,晶粒白云岩有序度也较上覆云质“豹斑”更高说明其是在埋藏期缓慢交代灰岩而形成的。种种证据都显示晶粒白云岩是埋藏成岩环境中的产物。

(3)与储集空间关系

据薄片观察晶粒白云岩中晶间孔和晶间溶孔广泛发育,其孔隙度一般为 2%~15%,这些孔隙是现今栖霞组储层重要的储集空间。因此,埋藏白云石化对于储集空间的建设性作用明显。

2.3 溶解作用

溶解作用是区内栖霞组白云岩中储集空间形成的主要因素,是良好储层形成的又一关键。根据溶解作用形成的机理和先后顺序等可将发生于研究层段中的溶解作用主要分为同生-准同生期、埋藏期和构造期等 3 期溶解类型。溶解类型不同,其溶蚀特征成因、对储集空间的贡献有着明显的差异(表 2)。

2.3.1 同生-准同生期溶解作用

(1)特征

栖霞期同生-准同生期溶解作用主要发生于栖霞组栖霞二段地层中,典型剖面为广元长江沟剖面栖霞组栖霞二段(图 3)。常具有以下特征:

①形成小溶沟。区内龙门山前缘和米苍山前缘

的栖霞二段上部有大量被云质“豹斑”充填的小溶沟(图 2-B)。其顶部长条状小溶沟多垂直或近于垂直层面分布,向下具有产状变缓、数量增多的趋势;②形成干裂暴露标志。在栖霞组顶底常见有暴露干裂构造,干裂缝多被褐灰色粘土泥、泥-粉晶白云石近全充填(图 2-C);③形成可追踪对比的 II 型层序界面。区内栖霞组顶部主要由云质“豹斑”灰岩构成,与上覆黑灰、灰黑色灰质泥岩、泥质泥晶灰岩呈突变接触,二者之间构成一 II 型层序界面。④同位素值降低。与该期溶解改造有关的栖霞组顶部云质“豹斑”同位素值较围岩偏低,其  $\delta^{13}\text{O}$  一般为  $-4.72\text{‰} \sim -3.13\text{‰}$ (PDB)、 $\delta^{13}\text{C}$  一般为  $2.80\text{‰} \sim 3.53\text{‰}$ (PDB);未受该期溶解改造或改造不强的围岩同位素相对较高, $\delta^{13}\text{O}$  一般为  $-2.53\text{‰} \sim -2.97\text{‰}$ (PDB)、 $\delta^{13}\text{C}$  一般为  $3.47\text{‰} \sim 3.85\text{‰}$ (PDB);⑤溶解作用主要受沉积相的控制。该期溶解作用明显受到沉积相的控制,主要发生在龙门山前缘栖霞二时碳酸盐缓坡的浅水高能型和深水低能型生物滩的顶部,其他部位基本未出现。

(2)成因及模式

早二叠纪栖霞晚期,区内龙门山前山北段发育众多的浅水高能型生物滩和一定数量的浅水高能鲕粒滩。这些滩体在三—四级海平面下降的影响下,频繁和较长时间暴露于海平面之上,接受大气淡水和混合水的改造,形成同生-准同生期溶解作用。因此同生期的溶蚀作用明显受沉积相带的控制,其模式

表 2 川西北地区栖霞组溶解作用类型及特征  
Table 2 Dissolution types and characteristics of the Qixia Formation in northwest Sichuan Basin

类型	同生-准同生期	埋藏期		构造抬升
		第一期埋藏溶蚀	第二期埋藏溶蚀	
成岩阶段	同生-准同生	中—深埋	中—深埋	构造抬升
流体性质	大气淡水、混和水	富含 H <sub>2</sub> S、CO <sub>2</sub> 和草酸等腐蚀性组分的地层水		大气淡水、酸性地层水
溶蚀特征	组构选择性溶蚀为主,形成溶孔、粒内溶孔、铸模孔和粒间溶孔等	多发生于早期地层薄弱部位,主要形成晶间溶孔、粒间溶孔和溶洞,其中常有沥青充填	多发生于早期薄弱部位,主要形成晶间溶孔、粒间溶孔和溶洞,其中无沥青充填	沿裂缝、缝合线及周围进行,主要形成溶蚀扩大缝及伴生的溶孔、溶洞
溶蚀规模	较大	中等	中等	小
形成的孔隙度	10%~35%	1%~5%	2%±	<1%
孔隙保存情况	差	中等	好	好
对储集空间的贡献	小 一般<1%	中等—大 一般 1%~4%	中等—大 一般 2%	小 一般<1%

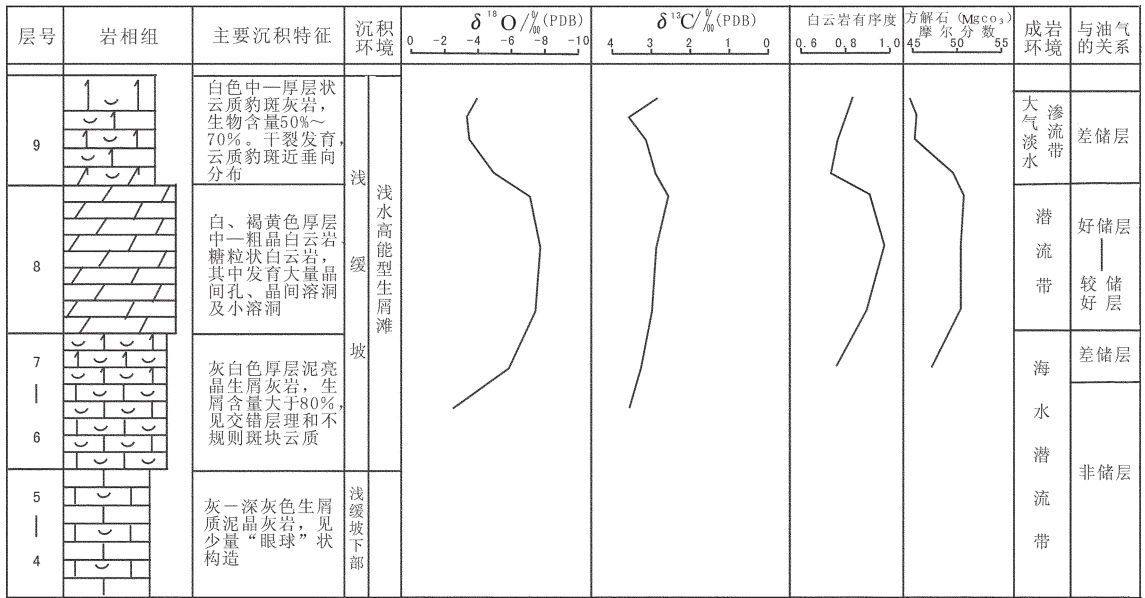


图3 广元长江沟剖面栖霞组地球化学剖面特征简图  
Fig.3 Sketch geochemical characteristic profile of the Qixia Formation of Guangyuan section of Yangtze River ditch

见图4。川西北地区栖霞组的浅水高能滩受此种溶蚀作用的改造较强, 其余相带受此种成岩作用的影响微弱。

(3)与储集空间关系

由于这种溶蚀作用持续时间短, 分布局限, 沉积物处于一种塑性到半塑性状态, 所产生的小规模溶孔、溶沟、溶洞等, 不是被随后的海侵沉积物所充填就是被后来的压实、胶结作用破坏殆尽。因此, 这种岩溶作用所形成的储集空间在目前已无储集意义。

2.3.2 埋藏期溶解作用

埋藏期溶解发生于中—深埋藏阶段, 该种作用的发生与烃源岩成熟期释放出有机酸及液态烃向气态烃转化过程中释放出大量的腐蚀性组分有关<sup>[10,11]</sup>。近几年的研究表明四川寒武系、石炭系、上二叠统等碳酸盐岩天然气储集层中都有丰富的埋藏溶解孔发育<sup>[1,2,3,7]</sup>。栖霞组白云岩储层中的埋藏溶解作用明显, 其溶解产生的孔隙是现今该套储层的主要储集空间之一。

(1)特征

①溶解作用沿地层中的薄弱部位进行。地层中的薄弱部位易于各种地层水的流动, 从而在这些部位产生较多的次生溶蚀孔隙。区内栖霞组地层中的薄弱部位主要有3处, 即受云化改造较强的浅水高能型滩体部位、断裂附近及裂缝发育部位和缝合线

及周围。这些部位晶间孔、晶间溶孔、裂缝等较为发育, 为埋藏期溶解作用的产生奠定了基础; ②形成大量的晶间溶孔和溶洞。栖霞组栖二段中—粗晶白云岩是经过中—深埋藏期重结晶作用的改造而成, 因此, 其中的溶解作用只能形成于重结晶之后, 即中—深埋藏期。埋藏溶解作用可在其中形成较多的晶间溶孔和溶洞(图2-F)。③在缝合线及附近的形成溶蚀孔隙。缝合线是中—深埋藏阶段的产物, 缝合线及周围的次生溶孔仅能形成于缝合线形成之后, 只能属于埋藏溶解作用的产物; ④晚期胶结物的溶解。区内栖霞组溶洞中常充填有深埋藏期的粗—巨晶方解石, 其内部和边缘的溶蚀作用应属于埋藏溶解作用的结果。⑤埋藏溶解作用形成的缝、洞中有少量中—巨晶方解石和自形石英, 其碳、氧同位素值更为偏负,  $\delta^{13}\text{C}$  为  $-1.23\text{‰}$ (PDB),  $\delta^{18}\text{O}$  为  $-8.65\text{‰}$ (PDB), 有机包裹体中含有较多的气态烃和少量沥青, 均一温度一般在  $150\text{°C}$  以上, 最高可达  $230\text{°C}$  左右。

(2)成因及模式

从区内下志留统一—二叠统烃源岩的演化来看, 该套地层的成油高峰期一般为中志留世, 气态烃大量形成于晚侏罗世。由此, 将与地层有机质热演化有关的埋藏溶蚀作用分为两期。第一期发生在中侏罗世前后, 二叠系储层埋至  $3000\sim 5000\text{ m}$  的深度, 在

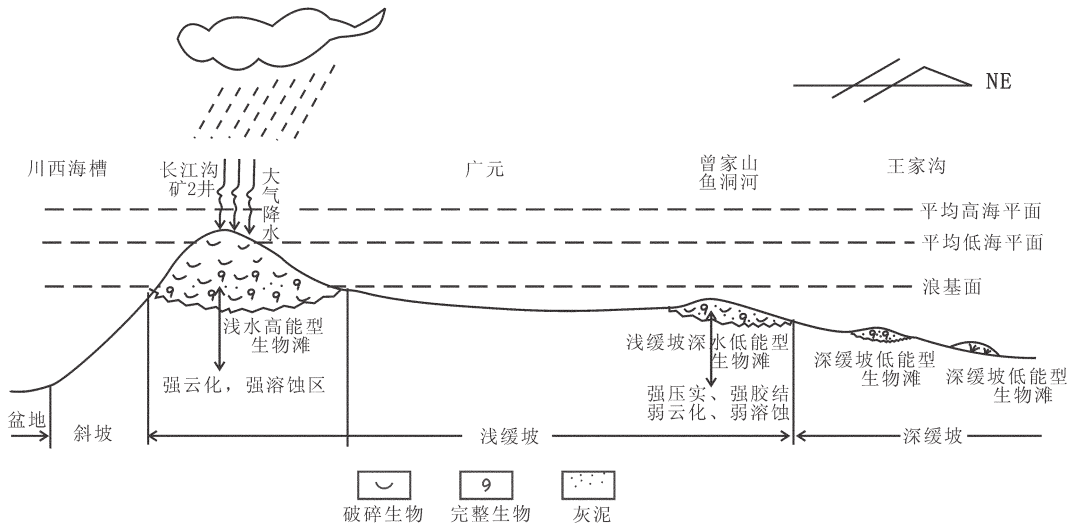


图 4 川西北地区栖霞组沉积环境及成岩作用模式简图

Fig.4 Sedimentary environment and sketch diagenetic model of the Qixia Formation in northwest Sichuan Basin

温度和压力差的驱动下,来自于志留系和二叠系中的有机酸和  $\text{CO}_2$  与压释地层水,沿地层薄弱部位,如白云岩和裂缝发育处运移时发生溶解,并在其中形成较多的晶间溶孔、粒间和粒内溶孔等。随着地层水中有机酸的消耗和 PH 值的增加,方解石和白云石发生沉淀,充填部分孔隙。第二期在晚侏罗世前后,该段时间中,研究层段埋藏深度大于 5000 m,地层中的液态烃向气态烃转化过程中也会释放出大量的腐蚀性组分,如有机酸、 $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  等,当含有这些腐蚀性组分的地层水沿层状和块状白云岩地层和裂缝运移时,势必导致早期孔隙的进一步溶解扩大和形成一定数量的新孔隙;与此同时,达到过饱和状态的地层水沉淀出少量中—巨晶方解石和自形石英。根据沉积相、构造分布、烃源岩热演化史和溶蚀孔隙的分布规律等,可总结出区内研究层段埋藏溶解作用的形成模式(图 5)。栖霞期,龙门山后山和广元—旺苍一带分别为川西海槽和广旺海槽,海槽与浅缓坡之间存在同生断层,浅缓坡堆积的是一套滩相沉积体。中—深埋藏期,海槽志留系和二叠系烃源岩在热演化过程中形成的富含  $\text{CO}_2$  和有机酸等腐蚀性的酸性地层水侧向运移至海槽边缘的同生断层,再沿同生断层向上运移至栖霞组,从而发生多期埋藏溶解作用。

(3)与储集空间关系

埋藏期溶解作用可形成较多的晶间溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔和晶体内溶孔以及沿缝合线及其附近的溶孔、溶洞等。宏观上局部呈蜂窝状(图 2-G),其面孔率一般在 5%~10%。埋藏期溶解过程中的溶解作用和溶解产物的重新沉淀作用是在同一个封闭体系中进行的,因此,中—深埋藏期的化学充填物的数量就大致代表了埋藏溶蚀作用所形成的次生孔隙数量。根据对岩心和薄片的统计,代表中—深埋藏期化学充填物的数量一般为 0.5%~5%,局部可高达 7%左右,因此,可推测埋藏溶蚀作用所产生的次生孔隙数量为 0.5%~7%。

2.3.3 构造抬升期溶解作用

(1)特征

构造抬升使得该套地层中发育高角度裂缝,此种溶解作用沿这些裂缝周围溶解并发育少量的溶缝和溶洞(图 2-H)。该期溶蚀规模小,并多被后期方解石和石英等充填,其中见少量气态烃和沥青包裹体,均一温度一般为 108~158℃。

(2)成因

影响四川盆地碳酸盐地层抬升幅度最大的是喜山运动<sup>[2,3,5,6]</sup>。白垩纪末的喜山运动导致该套地层由埋深 5000~6000 m 变至 3000 m 左右,使地层褶皱并在该套地层中形成高角度裂缝,这也造成地下水重新分布和调整,不同  $\text{H}_2\text{S}$  浓度的地下水在裂缝处

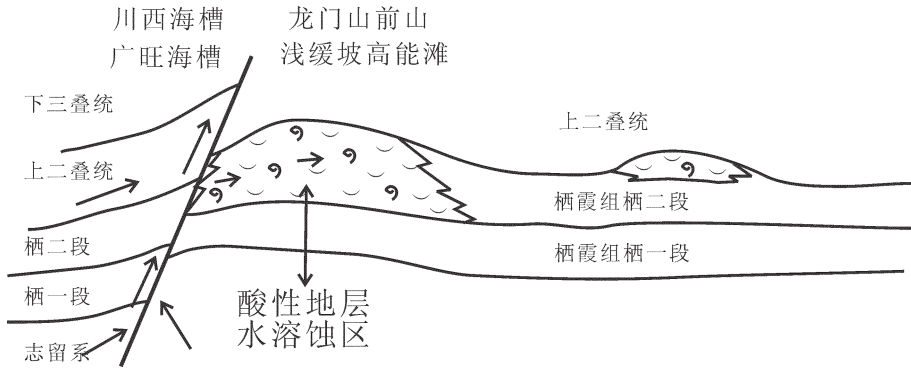


图 5 川西北地区栖霞组储层中埋藏溶解作用模式图

Fig.5 Buried dissolved model of the Qixia Formation in northwest Sichuan Basin

汇合,从而产生溶蚀作用,形成溶蚀缝、洞。

### (3)与储集空间关系

由于栖霞组受该种溶蚀作用强度低,其所贡献的孔隙度一般小于1%。但对该区储集段的渗透率有一定程度的改善。

## 3 结 论

1)控制川西北下二叠统栖霞组储层段孔隙发育的主要建设性成岩作用有各种溶解、白云石化及重结晶作用。其中埋藏期溶蚀和埋藏白云石化作用对储集层的储集空间贡献最大,其产生的晶间孔、晶间溶孔、洞、缝等是现今该层段主要的储集空间;

2)重结晶作用对储集空间的直接贡献不大,但重结晶作用提高了岩石的有效孔隙度和渗透率从而为后期的溶蚀作用提供了条件;而同生期的溶解作用形成的孔隙由于后期的压实、胶结等作用破坏而几乎消失殆尽。

3)栖霞组有两种类型不同的白云岩,根据现有资料研究认为上伏的云质“豹斑”为混合水成因,而其下覆的晶粒白云岩为埋藏成岩环境下的产物。

4)除成岩作用外控制该套地层储层发育的因素还有沉积相和构造,因此要弄清该套地层储层的纵、横向及平面上的展布必须把沉积、成岩及构造综合起来考虑。

## 参考文献(References):

[1] 郭正吾. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社, 1996: 48-118.  
Guo Zhengwu. Sichuan Basin Formation and Development [M]. Beijing: Geological Publishing House, 48-118 (in Chinese with

English abstract).

- [2] 童崇光. 四川盆地构造演化与油气聚集 [M]. 北京:地质出版社, 1992:14-48.  
Tong Chongguang. Tectonic Evolution and Oil and Gas Accumulation in Sichuan Basin [M], Beijing: Geological Publishing House, 1992:14-48 (in Chinese with English abstract).
- [3] 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎. 中国南方二叠纪岩相古地理 [M]. 山东东营:石油大学出版社, 1992:1-228  
Feng Zengzhao, Yang Yuqing, Jin Zhenkui. Permian Lithofacies Paleogeography in South China [M]. Shandong Dongying: Petroleum University Press, 1992:1-228 (in Chinese with English abstract).
- [4] 宋章强, 王兴志, 曾德铭. 川西北二叠纪栖霞组沉积相及其与氧气的关系[J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(6):20-24.  
Song Zhangqiang, Wang Xingzhi, Zeng Deming. Sedimentary facies and its relationship with petroleum-gas of the Qixia formation of Permian in the northwest of Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(6):20-24(in Chinese with English abstract).
- [5] 黄先平, 杨天泉, 张红梅. 四川盆地地下二叠统沉积相及其勘探潜力区研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(1):10-12.  
Huang Xianping, Yang Tianquan, Zhang Hongmei. Research on the sedimentary facies and exploration potential areas of lower Permian in Sichuan basin[J]. 2004, 24(1):10-12, (in Chinese with English abstract).
- [6] 杨玉卿, 冯增昭. 中国南方二叠纪沉积体系[J]. 古地理学报, 2000, 2(1):11-18.  
Yang Yuqing, Feng Zengzhao. Permian depositional systems in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(1):11-18.
- [7] 雷卞军, 唐楷, 邓超, 等. 四川广安市响水飞仙关组剖面特征及地质意义[J]. 中国地质, 2007, 34(1):66-72.  
Lei Bianjun, Tang Kai, Deng Chao, et al. Characteristics of the section of the Feixianguan formation at Xiangshui village, Guang'an, Sichuan, and its geological significance [J]. Geology in China, 2007, 34(1):66-72(in Chinese with English abstract).
- [8] 杨威, 魏国齐, 金惠, 等. 川东北飞仙关组鲕滩储层成岩作用和孔



- 隙演化[J]. 中国地质, 2007, 34(5):822-828.
- Yang Wei, Wei Guoqi, Jin Hui, et al. Diagenesis and pore evolution of the oolitic shoal reservoir in the Feixianguan Formation in northeastern Sichuan [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5):815-821 (in Chinese with English abstract).
- [9] Rick Wierzbicki, Jeffrey J Dravis, Ihsan Al -Aasm. Burial dolomitization and dissolution of Upper Jurassic Abenaki platform carbonates, Deep Panuke reservoir, Nova Scotia, Canada [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 63,32- 41.
- [10] Dravis J J. Deep-burial microporosity in Upper Jurassic Haynesville oolitic grainstones, east Texas [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 63, 325-341.
- [11] Dravis J J, Muir I D. Dolomite reservoirs created by burial dolomite dissolution: The Keg River case study, Comet Platform area, Rainbow Basin, NW Alberta [C]//Packard J and Davies G (eds.). *Dolomites, the Spectrum: Mechanisms, Models, Reservoir Development*; Canadian Society of Petroleum Geology Core Conference, CD volume, Calgary, 2004:58.
- [12] Esteban M, Taberner C. Secondary porosity development during late burial in carbonate reservoirs as a result of mixing and/or cooling of brines[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78/79:355-359.
- [13] Allan J R, Wiggins W D. Dolomite reservoirs; geochemical techniques for evaluating origin and distribution. American Association of Petroleum Geologists, Continuing Education Course Note Series 36. 1993:129.
- [14] Lohmann K C, Walker J C G. The  $\delta O^{18}$  record of Phanerozoic abiogenic marine calcite cements. *Geophys. Res. Lett.*16, 1989:319-322.
- [15] Land L S. The application of stable isotopes to the studies of the origin of dolomite and to problems of diagenesis in clastic sediments [C]//Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, (eds.). *Stable Isotopes in Sedimentary geology*; SEPM Short Course 10, 1983:4.1- 4.22.
- [16] Kyger C, Lohmann R, Kevin Given. Derivation of the original isotopic composition of Permian marine cements [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1985, 55.

## Constructive diagenesis and porosity evolution in the Lower Permian Qixia Formation of Northwest Sichuan

JIANG Zhi-bin, WANG Xing-zhi,

ZENG De-ming, LU Tie-mei, WANG Bao-quan, ZHANG Jin-you

(College of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

**Abstract:** According to a comprehensive analysis of the macroscopic, microscopic and geochemical characteristics of the Qixia Formation reservoir, the major constructive diagenesis has syndepositional periods of dissolution, buried dissolution, tectonic uplift dissolution, mixed water dolomitization, buried dolomitization and recrystallization, of which the buried dissolution and the buried dolomitization seem to have made the greatest contribution to the reservoir space in that the intercrystalline pores, intercrystalline dissolution pores, dissolved holes and slits in them constitute the main reservoir space. Recrystallization possesses the second importance. Recrystallization did not make much contribution to the reservoir space, but it enhanced the effective porosity and permeability of the rocks, thus provided conditions for later dissolution. Nevertheless, the syndepositional dissolution pores have almost completely disappeared due to subsequent pore compaction, cementation and other damages.

**Key words:** diagenesis; dolomite; Qixia Formation; pore evolution; northwestern Sichuan basin

**About the first author:** JIANG Zhi-bin, male, born in 1981, master candidate, engages in the study of reservoir geology; E-mail: ltmjzb@qq.com.