

# 川西中二叠统栖霞组岩石学特征及沉积相研究

韩月卿<sup>1</sup>, 韩文彪<sup>2</sup>, 金振奎<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国石化石油勘探开发研究院, 北京

<sup>2</sup>中国石化油田部, 北京

<sup>3</sup>中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京

收稿日期: 2022年4月1日; 录用日期: 2022年4月29日; 发布日期: 2022年5月7日

## 摘要

近期四川盆地二叠系栖霞组获得多项油气勘探突破, 如川西北双鱼石区块已发现大型油气藏。然而在实际勘探开发过程中, 栖霞组储层段在不同钻井上的气测显示差别很大, 且部分井发生失利的情况, 说明储层具有很强的非均质性, 沉积相作为优质储层的关键控制因素尚需深入研究。针对这一问题, 本次研究通过详实的野外露头和大量的薄片鉴定分析, 系统梳理了栖霞组不同类型的岩石特征和沉积相类型。本次研究认为, 川西地区栖霞组碳酸盐岩按照岩石形态可划分为四种岩石类型: 层状灰岩、云斑灰岩、砂糖状白云岩、生物礁灰岩。根据结构分类方案, 川西地区栖霞组碳酸盐岩可分为石灰岩和白云岩, 其中石灰岩可细分为灰泥石灰岩类、颗粒石灰岩类、礁石灰岩和钙华石灰岩, 白云岩可细分为泥粉晶白云岩、细晶白云岩、中粗晶白云岩和白云石胶结物。川西栖霞组主要为一套的弱镶边台地相沉积, 包括滩、礁、台洼三种亚相。栖霞组滩相以薄-中层灰泥-亮晶颗粒滩和灰泥颗粒滩为主, 在台缘和台内均有发育, 高能滩较为少见, 以中低能滩为主, 且滩体不是连片发育, 非均质性较强。台洼是栖霞组最为主要的沉积相类型, 其中开阔台洼分布范围最广, 岩性以生屑质灰泥石灰岩为主。因滩体分隔使得水体相对局限, Mg/Ca比值升高, 使其具有发生中等盐度回流渗透白云岩化作用的条件, 从而促进了局限台洼和周缘滩体中的石灰岩发生白云岩化而形成优质储层。

## 关键词

四川盆地西部, 中二叠统, 栖霞组, 岩石学, 沉积相, 特征

## Lithological Characteristics and Sedimentary Facies of Middle Permian Qixia Formation in Western Sichuan Basin

Yueqing Han<sup>1</sup>, Wenbiao Han<sup>2</sup>, Zhenkui Jin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing

<sup>2</sup>Oil-Field Department, SINOPEC, Beijing

<sup>3</sup>College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing

## Abstract

Recently, a number of breakthroughs in oil and gas exploration have been made in the Permian Qixia Formation in the Sichuan Basin, such as the discovery of large oil and gas reservoirs in Shuangyushi area in the northwest Sichuan Basin. However, during the actual exploration and development process, different well test production of Qixia Formation reservoirs varied greatly, and some wells experienced failures, indicating that the reservoir has strong heterogeneity and the sedimentary facies as a key control factor for high-quality reservoir needs to be further studied. To address this issue, this study systematically sorted out the different types of rock features and sedimentary facies of the Qixia Formation through detailed field outcrops and extensive thin section identification analysis. In this study, the carbonates of the Qixia Formation in the western Sichuan area can be classified into four rock types according to their rock morphology: laminated limestone, porphyritic limestone, sugary dolomites, and reef limestone. According to the structural classification scheme, the carbonate rocks of Qixia Formation in western Sichuan can be divided into limestone and dolomite, of which the limestone can be subdivided into lime mudstone group, grain limestone group, reefstone group and calcareous limestone, and the dolomite can be subdivided into micrite dolomite, fine crystalline dolomite, medium coarse crystalline dolomite and dolomite cement. The Qixia Formation in western Sichuan is mainly composed of a set of weakly bound platform facies, including three subfacies of shoal, reef and platform sag. The beach facies of Qixia Formation is dominated by thin to medium limudy-sparry grain beaches and limudy grain beaches, which are developed both at the platform margin and within the platform. High-energy beaches are rare, with medium to low-energy beaches predominating, and the beaches are not contiguous and have strong heterogeneity. The platform sag is the most important sedimentary facies type of Qixia Formation, among which open platform sag is the most widely distributed, and lithology is dominated by bioclastic lime mudstone. The relatively restricted water bodies and elevated Mg/Ca ratios due to the separation of the beaches provide conditions for medium salinity reflux seepage dolomitization, which promotes dolomitization of limestone in restricted platform sag and surrounding beaches to form high quality reservoirs.

## Keywords

Western Sichuan Basin, Middle Permian, Qixia Formation, Lithology, Sedimentary Facies, Characteristics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近期四川盆地二叠系栖霞组获得多项油气勘探突破, 如川西北双鱼石区块已发现大型油气藏, 多口钻井在此区块获高产, 证实了栖霞组的勘探潜力[1] [2] [3]。双鱼石构造带优质储层深度超过 7000 米[4]。然而在实际勘探开发过程中, 栖霞组白云岩储层段在不同钻井上的气测显示差别很大, 同时风险勘探井位部署时部分井发生失利的情况, 说明栖霞组沉积相发育规律和白云化成因都比较复杂, 优质储层具有很强的非均质性, 制约了该地区油气勘探进展[5]。因此, 栖霞组沉积相发育特征的深入研究显得尤为重要。

前人曾对川西地区栖霞组的野外露头进行过详细的观察研究，主要集中在层序地层划分和沉积相演化特征研究，将栖霞组划分为两个三级层序(SQ1 和 SQ2)，其中 SQ2 的高位体系域期海平面最低[6]，在川西地区发育大片高能生屑滩，尤其是栖二段发育典型镶边碳酸盐岩台地相特征，具台地边缘高能滩相沉积背景，有利于孔隙较好的灰岩发生白云化作用形成优质储层，沉积相是栖霞组白云岩储层最主要的控制因素[7] [8] [9] [10]。然而，栖霞组的主要岩石类型为灰泥颗粒石灰岩，代表滩相的亮晶颗粒石灰岩并不多见，前人对于滩相的定义比较笼统，栖霞组的岩性特征并不能反映栖霞组具备发育连片滩相的条件。

为了更为准确和详细地研究栖霞组的沉积特征，本次研究根据详实的野外观察和大量的岩石薄片鉴定分析，结合区域的沉积背景，采用沉积学和岩相学中典型的划分方法，系统梳理和明确了川西地区栖霞组地层岩石类型及沉积相展布特征，以期为该区域栖霞组的油气勘探提供有益的地质理论依据。

## 2. 区域地质背景

本次研究的工区范围在四川盆地西部(图 1)。四川盆地(台坳)的大地构造位置，位于扬子准地台上偏西北一侧，是扬子准地台的一个次一级构造单元。印支期已具盆地雏形，后经喜山运动全面褶皱形成现今构造面貌。盆地内部不同组系的构造，以华蓥山、龙泉山两个背斜带为界可以划分为三个构造区，进一步又分为六个次一级构造区[11]，与本次研究相关的是龙泉山以西的川西北构造区，地表主要为白垩系分布，包括川北低平褶皱带和川西低陡褶皱带，除北侧构造平缓，为一区域性大向斜外，仍以北东向构造为主，断裂比较发育。龙门山台缘断褶带与大巴山断褶带、米仓山凸起同属扬子准地台向外围地槽区逐渐变化的台缘过渡带。西以龙门山断裂与松潘—甘孜地槽褶皱系为界，东以彭灌断裂与四川盆地分壤，东北端止于广元中子铺附近，西南端阻于康滇隆起，呈长条形北东向延伸，构成四川盆地西北侧的边缘山地。区内构造活动频繁，变化较大。海西期，龙门山断裂带东侧下降，形成一北东向的槽型坳陷，沉积了厚达数千米的泥盆、石炭系。以后，随着扬子准地台下沉沦为广海，直到中三叠世早印支运动以前，一直保持着以海相碳酸盐沉积为主[12]。发生在早、晚二叠世之间的东吴运动，使扬子准地台在经历了早二叠世海盆沉积以后再次抬升成陆，中、上二叠统在广大地区内呈假整合接触[13]。

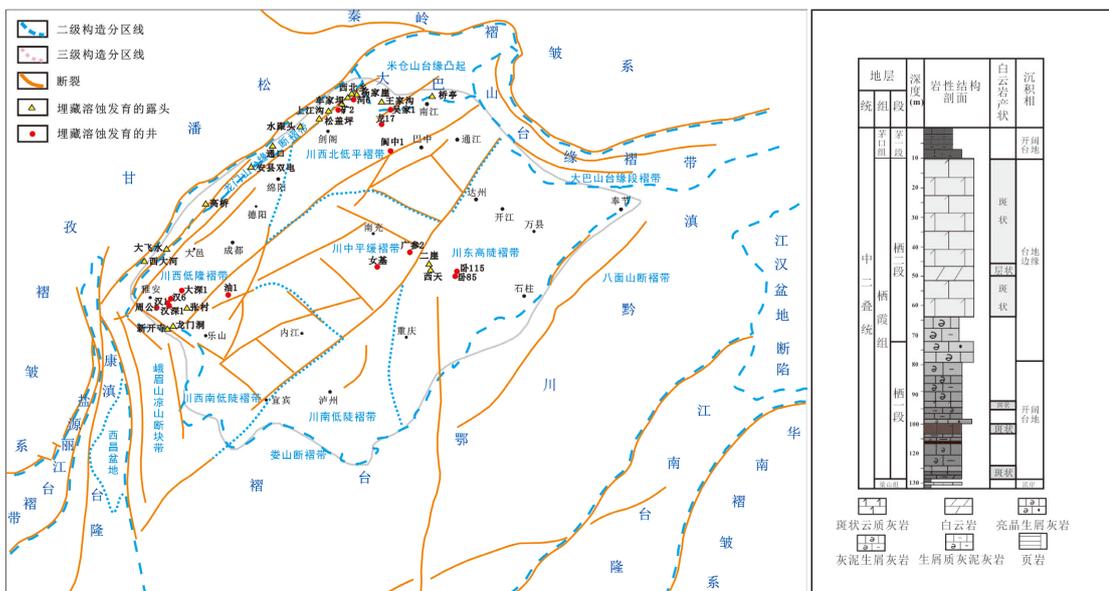


Figure 1. Tectonic units map of Sichuan Basin and Comprehensive histogram of Qixia Formation  
图 1. 四川盆地区域构造划分图及栖霞组综合柱状图

川西地区内栖霞组厚度平均 125 m 左右, 自下而上可分为栖霞一段和栖霞二段。栖霞一段沉积时期为二叠纪第一个沉积旋回的海侵期, 岩石颜色普遍较深, 泥质含量比较高。栖霞二段为海退期沉积的产物, 此时沉积速率已经大于等于海平面上升速率, 水体普遍变浅, 水体能量大, 阳光和氧气充足, 生物生长迅速, 大量的生物碎片快速堆积, 在原先局部生屑滩发育的地带开始逐渐发育较大型的台缘或台内生屑滩, 局部地区在地质历史时期遭受了强烈的白云化作用, 是四川盆地中二叠统白云岩的主要发育层段[14]。

### 3. 岩石学特征

#### 3.1. 宏观特征

按照岩石形态, 川西地区栖霞组碳酸盐岩可划分为四种岩石类型: 层状灰岩、云斑灰岩、砂糖状白云岩、生物礁灰岩。

##### 3.1.1. 层状灰岩

层状灰岩是川西地区栖霞组最为常见的岩石类型, 常见于栖霞一段中上部及栖霞二段下部地层, 厚度在 30 cm~50 cm 左右, 层面波状起伏, 偶见灰泥灰岩薄夹层。层状灰岩颜色较浅, 常呈浅灰色-灰色, 岩石表面见珊瑚及海百合化石发育, 局部见水平虫孔构造(图 2), 这类岩石形成于水动力较强的浅水环境。

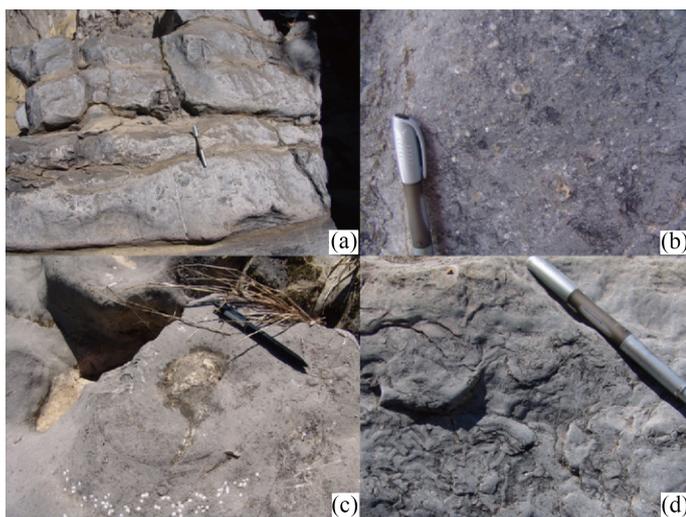


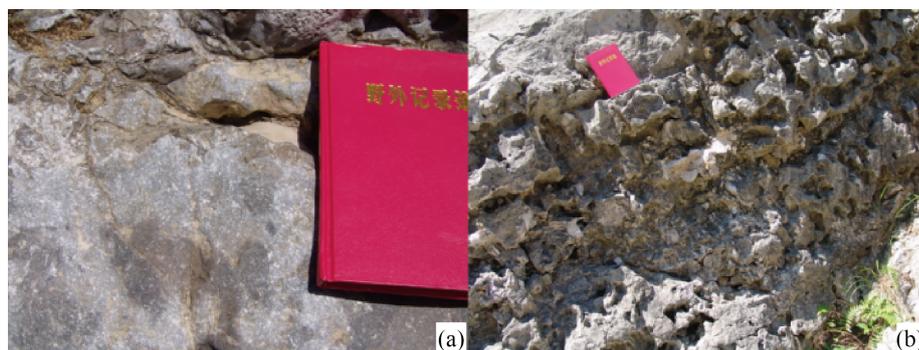
Figure 2. Laminated limestone of Qixia Formation in Sichuan Basin  
图 2. 川西地区栖霞组层状灰岩

##### 3.1.2. 云斑灰岩

云斑灰岩常见于栖霞一段中上部与栖霞二段上部地层, 由于灰岩不完全云化作用形成斑块状的白云质灰岩。云斑常呈拉长状, 比基质灰岩的颜色稍暗, 可能是由于白云质比灰质更易风化, 岩石表面氧化而变暗。在露头上, 云斑多被溶蚀, 而灰质多被保留下来, 形成凹凸不平的墙面(图 3), 说明云斑灰岩可能是由溶孔较多的灰岩发育而来。

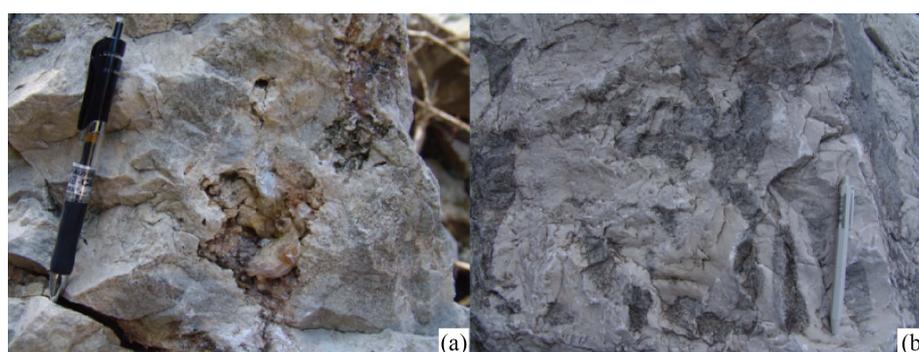
##### 3.1.3. 砂糖状白云岩

砂糖状白云岩在川西地区常发育在栖霞二段中上部地层, 因其主要组成矿物为中粗晶的白云石晶体, 颗粒较粗, 孔隙发育, 形似砂糖状, 故有此称。砂糖状白云岩内常见大量溶孔溶洞, 部分被鞍状白云石和巨晶方解石充填。另外, 砂糖状白云岩表面偶见形似“云斑”的现象, 暗色的云斑实为早期的细晶白云岩, 颜色较深, 晚期的中粗晶白云岩颜色较浅(图 4)。



**Figure 3.** Porphyritic limestone of Qixia Formation in Sichuan basin

**图 3.** 川西地区栖霞组云斑灰岩

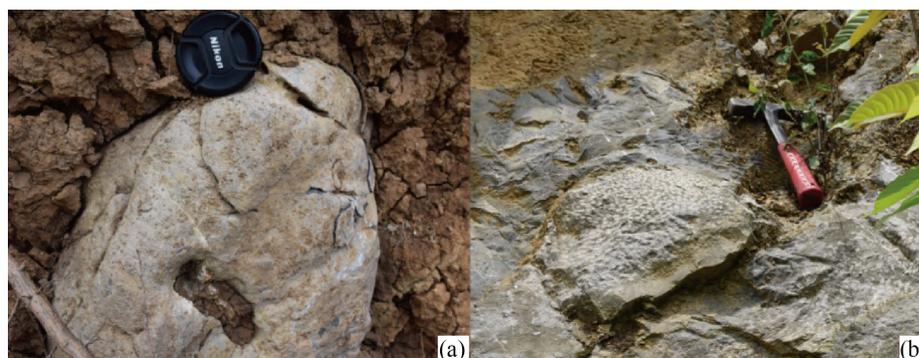


**Figure 4.** Sugary dolomites of Qixia Formation in Sichuan Basin

**图 4.** 川西地区栖霞组砂糖状白云岩

#### 3.1.4. 生物礁灰岩

生物礁灰岩在常发育于栖霞组中上部地层，底部偶见珊瑚礁。礁是造礁生物原地生长、埋藏形成的地形上隆起并具抗浪能力的碳酸盐岩沉积体[15]。生物礁在川西地区的栖霞组并不常见，仅在安县双电、北川永庆、北川茶坪上等剖面见珊瑚格架和蜓灰岩，珊瑚格架非常完整(图 5)。



**Figure 5.** Reef limestone of Qixia formation in western Sichuan Basin

**图 5.** 川西栖霞组生物礁灰岩

### 3.2. 微观特征

本次研究根据碳酸盐岩的结构分类方案，对川西地区栖霞组的石灰岩和白云岩分别进行详细描述。

### 3.2.1. 石灰岩

根据石灰岩的结构分类标准，川西地区栖霞组石灰岩可划分为灰泥石灰岩类、颗粒石灰岩类、礁石灰岩和钙华石灰岩[16]。

#### 1) 灰泥石灰岩类

灰泥石灰岩类指颗粒含量小于 50%、以灰泥为主的石灰岩，总体上形成于低能的沉积水体，主要发育在栖霞组中薄层灰岩地层中。根据颗粒含量，灰泥石灰岩类可划分为灰泥石灰岩、含颗粒灰泥石灰岩和颗粒质灰泥石灰岩(图 6)。灰泥石灰岩指颗粒含量小于 10%、以灰泥为主的石灰岩，代表的能量最低，处于安静低能的沉积环境。由于栖霞组富含生物化石，纯的灰泥石灰岩并不常见。含颗粒灰泥石灰岩指颗粒含量为 10%~25%、以灰泥为主的石灰岩。颗粒质灰泥石灰岩指颗粒含量为 25%~50%、以灰泥为主的石灰岩。栖霞组的颗粒一般为生物碎屑或砂屑颗粒，是异地搬运而来，代表间歇动荡环境。



(a) 灰泥石灰岩，栖霞一段，南江桥亭，单偏光(-)；(b) 含颗粒灰泥石灰岩，栖霞一段，旺苍双汇，单偏光(-)；(c) 颗粒质灰泥石灰岩，栖霞一段，广元上江沟，单偏光(-)

Figure 6. Lime mudstone group of Qixia formation in western Sichuan Basin

图 6. 川西栖霞组灰泥石灰岩类

#### 2) 颗粒石灰岩类

颗粒石灰岩类指颗粒含量  $\geq 50\%$  或颗粒支撑的石灰岩。根据填隙物的类型，可以划分为灰泥颗粒石灰岩、亮晶颗粒石灰岩(图 7(a), 图 7(b))。栖霞组的碳酸盐岩颗粒以生物碎屑、砂屑颗粒为主。灰泥颗粒石灰岩通常呈灰色 - 深灰色，灰泥基质的含量大于亮晶的含量。亮晶颗粒石灰岩指填隙物以亮晶为主的颗粒石灰岩，亮晶的含量大于灰泥基质，通常呈浅灰色、灰色。

#### 3) 礁石灰岩

礁石灰岩指造礁生物格架含量  $\geq 30\%$  且以原地埋藏为主的石灰岩。生物格架间可充填颗粒、胶结物或灰泥基质(图 7(c))。根据填隙物的类型，栖霞组的礁石灰岩主要为灰泥礁石灰岩。

#### 4) 钙华石灰岩

钙华石灰岩指从泉水或溶洞中沉淀出来的碳酸钙形成的石灰岩，属于化学岩(图 7(d))。川西地区栖霞组沉积末期曾遭受短暂剥蚀暴露，局部地区发育溶洞，充填钙华石灰岩。

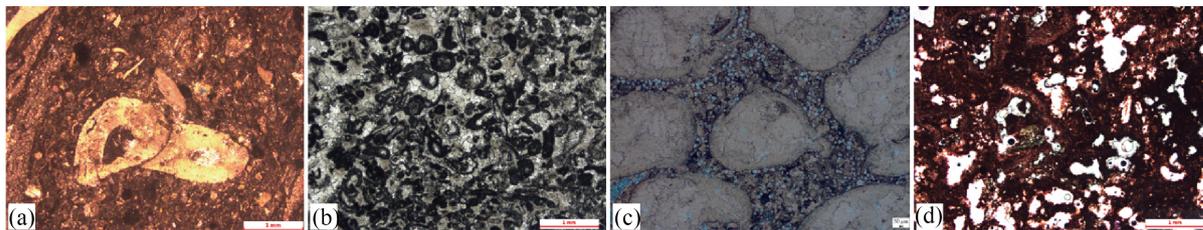
### 3.2.2. 白云岩

白云岩通常基于晶粒大小进行分类，栖霞组白云岩可分为：泥粉晶白云岩、细晶白云岩、中粗晶白云岩和白云石胶结物。

#### 1) 泥粉晶白云岩

泥粉晶白云岩指以泥粉晶为主( $\geq 50\%$ )的白云岩，又称微晶白云岩，结构细腻，晶粒不明显。泥粉晶白云岩主要发育在栖霞组地层，为半自形 - 它形结构，厚度为几十厘米左右，常见与黄铁矿和有机质伴

生(图 8(a))。



(a) 灰泥颗粒石灰岩, 栖霞二段, 乐山沙湾, 单偏光(-); (b) 亮晶颗粒石灰岩, 栖霞二段, 安县双电, 单偏光(-); (c) 礁石灰岩, 栖霞一段, 安县双电, 单偏光(-); (d) 钙华石灰岩, 栖霞二段, 安县双电, 单偏光(-)

**Figure 7.** Grain limestone group of Qixia formation in western Sichuan Basin

**图 7.** 川西栖霞组颗粒石灰岩

## 2) 细晶白云岩

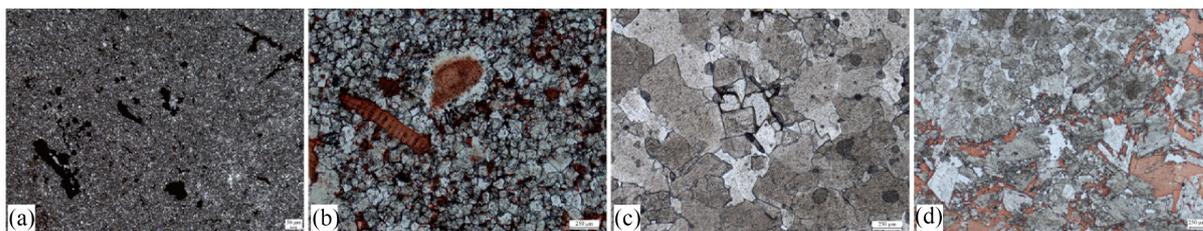
细晶白云岩指以细晶白云石为主( $\geq 50\%$ )的白云岩, 在栖霞一段和栖霞二段均有分布, 呈云斑或层状分布, 厚度变化较大, 细晶白云石为自形-半自形晶, 具平直晶面, 可见颗粒幻影和雾心亮边特征(图 8(b))。

## 3) 中粗晶白云岩

中粗晶白云岩指以中粗晶白云石为主( $\geq 50\%$ )的白云岩, 一般发育在栖霞二段地层, 呈层状或似云斑发育在细晶白云岩上。中粗晶白云石晶体为半自形-它形晶, 晶面弯曲, 晶间孔较为发育(图 8(c))。

## 4) 白云石胶结物

白云石胶结物指在孔隙缝洞中充填的后期胶结作用形成的白云石, 常见于中粗晶白云岩的孔隙内。白云石胶结物常与巨晶方解石伴生, 具波状消光特征, 部分受到后期流体作用而破裂(图 8(d))。



(a) 泥粉晶白云岩; (b) 细晶白云岩; (c) 中粗晶白云岩; (d) 白云石胶结物

**Figure 8.** Dolomites of Qixia formation in western Sichuan Basin

**图 8.** 川西栖霞组白云岩

## 4. 沉积相类型

根据野外露头实测以及大量的薄片鉴定, 结合区域沉积背景和相序配置关系, 本次研究认为川西地区栖霞组整体为一套弱镶边台地相, 水深在最大风暴浪基面之上, 阳光较充足, 生物较繁盛, 进一步可划分为滩、生物礁和台洼, 其具体特征如下。

### 4.1. 滩

滩指碳酸盐岩台地中以颗粒沉积为主的浅水动荡环境, 其沉积的主要岩性为颗粒石灰岩, 其中浅水指最大风暴浪基面之上的水域。栖霞组的滩体常呈薄-中层席状分布, 多口钻井钻遇的滩相储层也反映了这一特征[17]。

根据填隙物类型, 栖霞组地层中的滩可划分为三类: 亮晶颗粒滩、灰泥-亮晶颗粒滩、灰泥颗粒滩, 其中亮晶颗粒滩少见, 后两种较为常见。亮晶颗粒滩的沉积水体处于正常浪基面之上, 水体持续动荡, 水动力强, 灰泥难以沉积。灰泥-亮晶颗粒滩指填隙物中灰泥和亮晶含量相近的颗粒石灰岩, 其沉积水体间歇性动荡。动荡时颗粒被搬运、簸洗, 安静时悬浮在水中的灰泥沉积下来, 充填于粒间孔中。由于安静的时间较短, 沉积的灰泥较少, 动荡时水体又会冲走部分灰泥。这类滩常形成于正常浪基面附近, 水体能量中等。灰泥颗粒滩以灰泥颗粒石灰岩为主, 水体总体安静, 偶尔动荡。这类滩是风暴等阵发性水流将颗粒搬运到低能环境中沉积形成的, 粒间的灰泥是水体恢复平静后从悬浮状态沉积形成的。这类滩的水体能量较低, 形成于正常浪基面与风暴浪基面之间。前人认为白云岩皆形成于水体循环好、颗粒间孔隙发育的高能滩, 但经原岩恢复后发现原始岩性中均存在一定含量的灰泥, 并不是典型的滩相特征, 应属于中等能量的灰泥-亮晶颗粒滩和低能的灰泥颗粒滩。

根据栖霞组滩在台地上的位置, 可以划分为台缘滩和台内滩。台缘滩指位于开阔台洼和斜坡之间台地边缘的滩, 水体能量高, 滩体规模大。有些情况下, 台缘滩可起障壁滩的作用, 使其内侧的台地水体循环受限, 变为局限台洼。台内滩指发育在台地内部的滩坝, 多呈孤立状, 也可连片, 主要在水下隆起上形成, 受控于沉积速度差异、构造升降差异以及基岩剥蚀残留厚度。总体来说, 台缘滩形成的水体能量高于台内滩, 岩石中颗粒和亮晶的含量更高。

## 4.2. 生物礁

生物礁是造礁生物原地生长形成的、地形上隆起的碳酸盐岩沉积体, 具有抗浪能力[18]。礁体中, 造礁生物形成骨架, 含量通常在 30%以上。栖霞组造礁生物主要是珊瑚类、苔藓虫、海绵类等。根据填隙物类型, 栖霞组的生物礁主要为灰泥礁, 填隙物为灰泥, 沉积于正常浪基面之下, 以安静环境为主。根据位置和形态, 栖霞组生物礁主要为台缘礁, 发育在台缘滩向海一侧, 发育规模较小。

## 4.3. 台洼

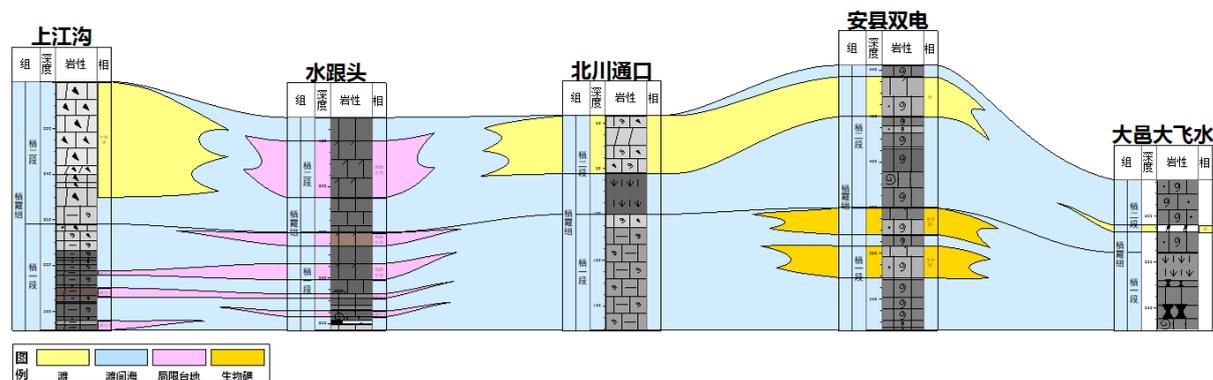
台洼指位于台地内部、地形低洼、水深在正常浪基面之下、风暴浪基面之上的水下低能环境, 根据水体循环程度, 台洼可进一步分为开阔台洼和局限台洼[16]。开阔台洼指水体循环良好、水底富氧的台洼, 其沉积多为含有较多原地底栖生物化石的生屑质灰泥石灰岩、含生屑灰泥石灰岩、灰泥生屑石灰岩。局限台洼指水体循环受限的台洼, 水体盐度比开阔台地高。栖霞组的局限台洼的成因主要有两种: 滩体阻碍和较浅的海平面。如果浅而开阔的台地上发育多个台内滩, 这些滩会阻碍水体循环, 使其间的台地变为局限台洼。如果台地非常广阔, 其上的水体又非常浅, 即使没有滩的阻碍, 其中央区域的水体与广海之间的交换也会受限, 从而变为局限台洼, 盐度升高; 而台地外部区域可仍为开阔台洼, 盐度基本正常。滩体分隔的水体环境局部受限后, Mg/Ca 比值升高, 使其具有发生中等盐度回流渗透白云岩化作用的条件, 从而促进了局限台洼和周缘滩体中的石灰岩发生白云岩化而形成优质储层。

## 5. 沉积相展布特征

基于以上对于栖霞组不同类型岩石特征分析, 利用川西地区野外剖面特征现象(图 9), 结合岩石的颜色、沉积构造、岩性和生物化石等相标志, 认为川西地区栖霞组自西向东一次发育台地边缘相和开阔台洼相, 整体为一套弱镶边台地相, 各时期沉积相具有如下的展布特征。

### 5.1. 栖一段沉积相展布特征

二叠系沉积早期, 四川盆地西部遭受广泛海侵, 海平面较高, 整体水体能量较低, 以中厚层灰色-深灰色含颗粒灰泥石灰岩和颗粒质灰泥石灰岩为主, 偶夹灰泥石灰岩, 层面波状起伏, 是开阔台洼相的



**Figure 9.** Outcrops sedimentary faces correlation map of Qixia formation in western Sichuan basin  
**图 9.** 川西地区栖霞组野外剖面沉积相对比图

典型岩石特征，从大邑到广元一带广泛发育。灰泥沉积于安静水体，颗粒沉积于动荡的环境，颗粒含量越高，代表沉积水体的能量越高。含颗粒灰泥石灰岩和颗粒质灰泥石灰岩沉积于持续动荡的浅滩区和持续安静低能的灰泥沉积区之间的过渡地带，但以安静为主，例如水深在正常浪基面与风暴浪基面之间的开阔台洼或局限台洼。在安县双电等地，野外露头见完整的四射珊瑚礁灰岩，填隙物类型以灰泥基质为主，也见有胶结物，反映礁体水深在正常浪基面附近，是间歇动荡环境。局部地区发育局限台洼相，水体循环受限，盐度升高，发生中等盐度回流渗透白云化作用，发育泥粉晶-细晶云质灰岩，如上江沟、水根头等地。

## 5.2. 栖霞二段沉积相展布特征

栖霞二段地层继承了栖霞一段沉积古地貌格局，海平面较栖霞一段下降，水体能量较强，阳光充足，生物繁盛，沉积速率较快，地层厚度较大，岩性以灰泥颗粒石灰岩、亮晶颗粒石灰岩为主，局部地区发育细-中粗晶白云岩，见蜓类、介壳类、腕足类、苔藓虫等生物碎屑。灰泥颗粒石灰岩的成因包括两种：浅水间歇动荡环境沉积与深水重力流沉积。栖霞组并没有深水重力流沉积的典型现象，浅水间歇动荡环境沉积应该为灰泥颗粒石灰岩主要沉积背景，包括潮坪和位于正常浪基面与风暴浪基面之间的间歇动荡环境。潮汐流或风暴流等将颗粒搬运到潮坪上，水位较高时，海水较为平静，悬浮于水中的灰泥沉积下来，充填于颗粒之间，发育灰泥颗粒石灰岩。亮晶颗粒石灰岩主要为浅水持续动荡环境沉积，水深在正常浪基面之上，水体持续动荡，可能是高能浅滩或潮汐水道。栖霞组的亮晶颗粒石灰岩并不太常见，仅在栖霞二段部分地区发育，如安县双电等野外剖面。在其它高部位，如北川通口等地，沉积了一套巨厚层的浅灰色颗粒石灰岩，反映了水体浅能量强的特征。在大邑大飞水等地栖霞二段沉积厚度较薄，剖面上可见受断裂热液改造的斑马状白云岩，因强烈改造作用在裂缝中发育鞍形白云石和巨晶方解石。在广元长江沟等剖面上，这种热液改造作用更为强烈，发育厚层中粗晶白云岩，但经原岩恢复后仍可见颗粒间灰泥沉积，其原始沉积相并不具有典型的台缘滩相特征。栖霞组礁石灰岩的钙华石灰岩的发育表明栖霞组顶部存在溶洞，在大邑大飞水和安县双电剖面的栖霞组顶部均见有溶洞沉积。整体来说，川西地区并不发育大片台缘滩，仅在局部高部位见台缘滩相特征，如上江沟、北川通口、安县双电、大邑大飞水等地，且非均质性比较强。同时，局部地区栖霞二段白云岩的原始结构为泥质含量较高的生屑质灰泥灰岩，表明原始沉积相并不具有典型的高能台缘滩特征，反映了水体环境较为局限，促使白云岩化过程的发生。

## 6. 结论

- 1) 川西地区栖霞组碳酸盐岩按照岩石形态可划分为四种岩石类型：层状灰岩、云斑灰岩、砂糖状白

云岩、生物礁灰岩。根据碳酸盐岩的结构分类方案,川西地区栖霞组可分为石灰岩和白云岩,其中石灰岩可细分为灰泥石灰岩类、颗粒石灰岩类、礁石灰岩和钙华石灰岩,白云岩可细分为泥粉晶白云岩、细晶白云岩、中粗晶白云岩和白云石胶结物。

2) 川西栖霞组主要为一套的弱镶边台地相沉积,可细分为滩、礁、台洼三种亚相。栖霞组滩相以薄-中层灰泥-亮晶颗粒滩和灰泥颗粒滩为主,在台缘和台内均有发育,高能滩较为少见,以中低能滩为主,且台缘滩不是连片发育,非均质性较强。

3) 台洼是栖霞组最为主要的沉积相类型,其中开阔台洼分布范围最广,岩性以生屑质灰泥石灰岩为主。因滩体分隔使得水体相对局限,Mg/Ca 比值升高,使其具有发生中等盐度回流渗透白云岩化作用的条件,从而促进了局限台洼和周缘滩体中的石灰岩发生白云岩化而形成优质储层。

## 基金项目

国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003);中国科学院 A 类战略性先导项目(XDA14010201)。

## 参考文献

- [1] 彭先,彭军,张连进,林攀,兰雪梅. 双鱼石构造栖霞组白云岩储层特征及主控因素[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 1-12.
- [2] 高国辉,曹剑,罗冰,肖笛,张亚,陈聪. 四川盆地西北部中二叠统海相混合型烃源岩的证据及对双鱼石大气藏的成藏贡献[J]. 石油学报, 2020, 41(4): 433-445.
- [3] 赵金. 川西北部双鱼石地区中二叠统栖霞组中-粗晶白云石成因[J]. 云南化工, 2020, 47(10): 160-161.
- [4] 李荣容,杨迅,张亚,曾琪,王旭丽,尹宏,胡欣,谢忱,孙志昀. 川西北地区双鱼石区块二叠系栖霞组气藏储层特征及高产模式[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(4): 19-27.
- [5] 刘文栋,钟大康,尹宏,孙海涛,梁雪祺,李荣容,卓骏驰,曾鑫耀,彭思桥. 川西北栖霞组超深层白云岩储层特征及主控因素[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 342-362.
- [6] 胡笙,谭秀成,罗冰,张本健,张亚,苏成鹏,芦飞凡,李明隆. 四川盆地西北部二叠系栖霞阶序地层特征及地质意义[J]. 古地理学报, 2020, 22(6): 1109-1126.
- [7] 裴森奇,王兴志,李荣容,杨迅,龙虹宇,胡欣,汪晓星. 台地边缘滩相埋藏白云石化作用及其油气地质意义——论四川盆地西北部中二叠统栖霞组白云岩的成因[J]. 天然气工业, 2021, 41(4): 22-29.
- [8] 田景春,林小兵,张翔,彭顺风,杨辰雨,罗寿兵,徐亮. 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.
- [9] 李明隆,谭秀成,罗冰,张亚,张本健,芦飞凡,苏成鹏,肖笛,钟原. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组相控早期高频暴露岩溶特征及启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 66-82.
- [10] 李明隆,谭秀成,苏成鹏,芦飞凡,张本健,潘政屹,肖笛. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组砂糖状白云岩特征及成因机制——以广元上寺剖面为例[J]. 地质论评, 2020, 66(3): 591-610.
- [11] 王宓君,包茨,肖明德. 中国石油地质志(卷十)四川油气区[M]. 北京:石油工业出版社, 1989.
- [12] 郝子文,姚冬生,谢贻谋,等. 四川省区域地质志[M]. 北京:北京地质出版社, 1982.
- [13] 胡昊,许国明,高峰,宋晓波,隆珂. 四川盆地西部茅口组多类型储集层成因与启示[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(5): 512-518.
- [14] 刘文栋,钟大康,孙海涛,曾鑫耀,梁雪祺,胡欣,李荣容,彭思桥,宋雨佳. 川西北中二叠统栖霞组沉积特征及古地貌响应[J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1275-1291.
- [15] 金振奎,石良,高白水,余宽宏. 碳酸盐岩沉积相及相模式[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 965-979.
- [16] 金振奎,王金艺,梁婷,等. 沉积地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 2021.
- [17] 胡安平,潘立银,郝毅,沈安江,谷明峰. 四川盆地二叠系栖霞组、茅口组白云岩储层特征、成因和分布[J]. 海相油气地质, 2018, 23(2): 39-52.
- [18] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 2008.