

四川盆地大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组 储层特征及其主控因素

何 莹¹ 胡东风² 张 箭¹ 黎 平^{1,3} 盘昌林⁴ 王 岩¹ 刘大成¹

(1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610081;

2. 中国石化勘探南方分公司勘探处, 四川 成都 610041; 3. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059;

4. 中国石化勘探南方分公司川东北勘探前线指挥部, 四川 达州 635000)

摘要: 21 世纪是中国海相碳酸盐岩油气勘探开发的一个大发展期, 目前中国海相碳酸盐岩油气田多数为埋深达 4000 m 以下的深部古生界层系。如何在深层碳酸盐岩地层中寻找优质储层已成为油气勘探家们关心的焦点; 近期发现的普光气田是中国目前发现的碳酸盐岩储层次生孔隙最为发育的气藏, 并严格受控于沉积微相的分布及白云岩化、埋藏溶蚀作用等成岩相的控制。本文以“相控论”理论为指导, 对川东北普光外围大湾—毛坝—铁山坡地区下三叠统飞仙关组优质储层形成与演化起主控作用的“储集相”——有利的沉积相、成岩相进行详细研究和解剖。通过露头剖面、钻井、测井和地震等资料的研究, 结合单因素分析、多因素综合图法, 认为大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组主要发育斜坡、台缘浅滩、开阔台地和局限台地 4 个沉积相单位。结合岩心详描和室内大量岩心、岩屑薄片以及铸体薄片的观察和研究, 认为控制储层形成的关键是白云岩化、埋藏溶蚀作用等成岩相。根据铸体薄片鉴定、扫描电镜分析、物性分析及压汞分析等手段, 研究认为优质储层以大套溶孔粉—细晶残余鲕粒白云岩为特征, 岩石中溶孔极为发育, 以大孔粗喉型、中孔中喉型为主; 物性较好, 以高孔高渗和中孔中渗为主, 孔渗相关性明显。相控储层作用明显, 纵向上主要分布于飞二段至飞一段顶部, 横向上台缘浅滩为有利储层的分布区。台缘浅滩相带控制了本区优质储层的岩性及大致空间分布范围, 白云岩化及埋藏溶蚀作用则决定了优质储层的最终分布范围和储集性能。通过对大湾—毛坝—铁山坡地区台地边缘浅滩储层“相控论”的探讨, 以期对中国深层海相碳酸盐岩的勘探起到抛砖引玉的作用。

关键词: 深层碳酸盐岩; 相控论; 储集相; 台缘浅滩相; 成岩相; 优质储层; 飞仙关组; 四川盆地

中图分类号: P588.24*5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)05-0922-18

过去的半个多世纪以陆相油气理论所支撑的中国石油工业, 伴随着陆相中浅层油气田勘探开发程度的不断提高, 深层海相层系已成为中国油气勘探的主要接替领域。全球在海相地层中发现了高达 90% 的油气储量, 而中国探明率仅 10% 左右。中国海相地层与世界相比, 尤其是南方地区, 具有时代古老、多期改造、地表复杂、埋藏深及储层非均质性的特性^[1]。深部储层通常是指埋藏大于 4000 m 或 4500 m 的储层^[2], 本文所提的深层是指埋深在 4000 m 以下的地层。近年来, 中国在深层、超深层发现了一批台地边缘礁滩相孔隙较发育的优质碳酸盐岩储层, 找

到了川东北罗家寨、普光、YB 及 LG 等气田群^[3-6], 塔中 I 号坡折带油气田等^[7,8], 更增加了对中国深层海相碳酸盐岩油气勘探的信心及决心。

针对中国目前油气勘探遇到的实际情况, 邹才能等^[9]在 2005 年提出了以储集相为核心的“相控论”观点。其内涵强调含油气盆地勘探达到一定程度后对油气富集规律性的认识和总结, 在存在有效烃源岩、构造背景及输导体系等前提下, 油气的分布与富集受有利储集相带的控制, 主要是各种有利的沉积相和成岩相等, 这是决定有效储集体形成和分布的基础和关键。该观点将确定沉积相、成岩相等主导的

收稿日期: 2008-04-02; 改回日期: 2008-08-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB202304)与中石化重点攻关项目(PK0758)联合资助。

作者简介: 何莹, 男, 1979 年生, 硕士, 工程师, 主要从事川东北碳酸盐岩地质综合研究工作; E-mail: heywz@126.com。

储集相作为研究与勘探的重点和核心,揭示了新的勘探阶段油气成藏及富集规律,具有一定的理论与实践意义。本次笔者以海相碳酸盐岩沉积学、成岩作用研究及储层地质学为基础、以“相控论”理论为指导,以川东北普光外围大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组为例开展储层形成与演化起主控作用的“储集相”——有利的沉积相、成岩相的详细研究和解剖,以期对中国深层海相碳酸盐岩的勘探起到抛砖引玉的作用。

1 概况

大湾—毛坝—铁山坡气田位于四川省宣汉县及万源市境内,其中大湾—毛坝气田为中石化矿权、铁山坡气田为中石油矿权,区域构造位置隶属四川盆地川东断褶带东北段中隆高陡构造区双石庙构造群的西北部,为大湾—雷音铺 NE 向构造带、毛坝—双

庙场 NE 向构造带北段的 3 个主体构造(图 1)。地面出露侏罗系沙溪庙组砂泥岩地层。

研究区飞仙关组天然气勘探始于 1999 年中石油铁山坡构造上坡 1 井,飞仙关组完井测试天然气产量达 $26.72 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}^{[9]}$,从而发现了铁山坡气田下三叠统飞仙关组鲕滩气藏。随后中石油加快了勘探评价的步伐,相继部署了坡 2、3、4、5 井和坡西 1 井,除坡 3 井外,其余井均在飞仙关组获工业性气流。其中 2004 年完钻的坡 5 井,飞仙关组完井测试天然气无阻流量超过 $1550 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,创造了当时产量居四川盆地 1000 多口气井之首的记录。截止 2005 年底,铁山坡构造提交探明天然气地质储量 $373.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ [10]。中石化在大湾—毛坝区块针对飞仙关组天然气勘探始于 2001 年开钻的毛坝 1 井,完井测试飞仙关组获气 $33.02 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}^{[1]}$,但随后部署的毛坝 2、3 井及毛开 1 井在飞仙关组钻探中相继失利,直到 2005—2006

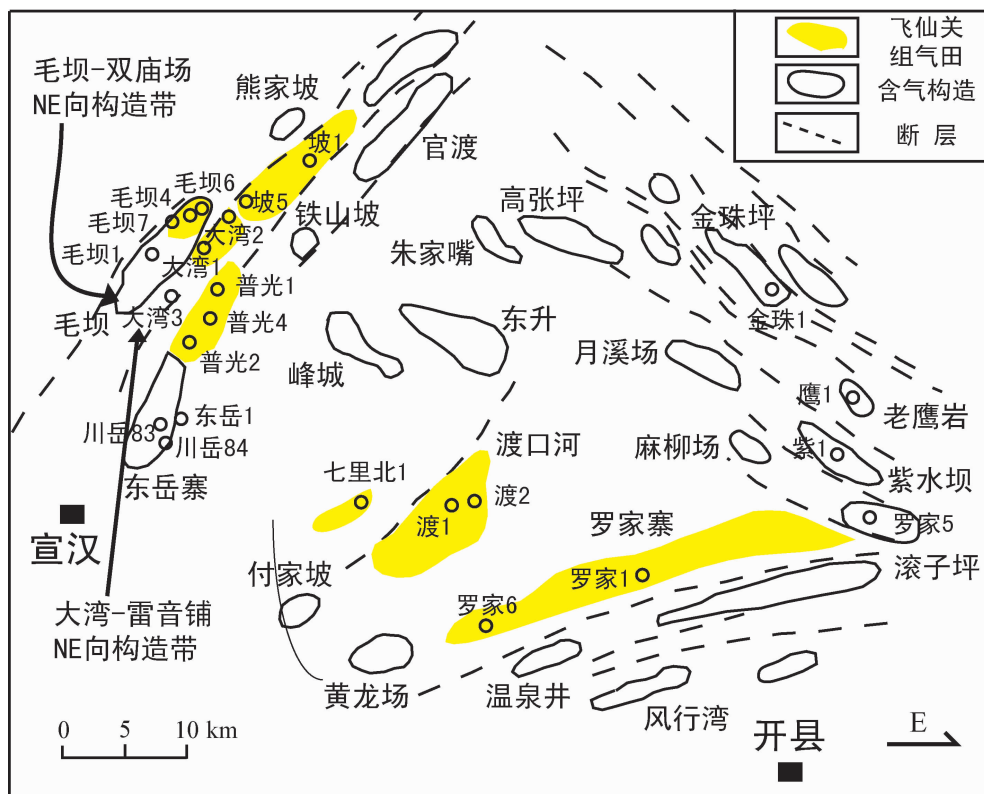


图 1 川东北达县—宣汉地区地理位置及构造分布示意图
Fig.1 Location map of the Daxian-Xuanhan area, northeastern Sichuan, showing distribution of the structure

①姚清国,吕志洲,周文英,等.川东北区块宣汉—达县地区毛坝 1 井单井评价与钻井动态跟踪研究(内部报告).中国石化南方勘探开发分公司,2004.

新一轮“以长兴组—飞仙关组礁、滩孔隙型白云岩储层为主的构造—岩性复合圈闭为勘探对象”^[4,5,12]所部署的普光外围大湾—毛坝区块大湾1、2井及毛坝4、6井均在飞仙关组鲕滩孔隙型白云岩储层中获得高产工业气流,其中2007年完井测试的大湾1井飞仙关组二段采用常规测试,喜获 $88.4876 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,创造了迄今2007年底川东北采用常规测试获得的单井、单层最高产量的新记录。截止2007年底,大湾—毛坝区块气藏的储量规模基本探明,大湾区块提交探明天然气地质储量 $777.77 \times 10^8 \text{ m}^3$,毛坝北区块预计毛坝4、6井新增探明天然气地质储量 $312.20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。上述勘探成果展示了研究区飞仙关组广阔的勘探开发前景。

2 储层特征

中国海相碳酸盐岩储层非均质性强,孔隙系统复杂,主要受沉积作用、成岩作用及构造作用的控制形成生物礁滩、岩溶风化壳、白云岩和颗粒滩四大类型储层^[13,14]。在川东北罗家寨、普光、渡口河等多个探明储量的气田中,90%以上的天然气储层来自于下三叠统飞仙关组的白云岩地层^[5]。业已证明,白云岩是一种优质的沉积与成岩综合作用的层状碳酸盐岩储层,各类次生孔隙被认为是潜在的油气有效储集空间^[14,16]。大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组发育具特色的台地边缘浅滩白云岩储层,根据岩心详描、铸体薄片鉴定、扫描电镜分析、物性分析及压汞分析等手段,结合地震、测井等资料,对该区下三叠统飞仙关组鲕滩储层特征研究如下。

2.1 主要储层岩石类型及物性

大湾—毛坝—铁山坡地区钻井取心段的宏观详描、微观观察及物性分析表明,飞仙关组岩性对储层储集性能的好坏起着明显的控制。其中储集性能以溶孔晶粒残余鲕粒白云岩最好,以下依次为含砾屑鲕粒细晶白云岩、鲕粒中—细晶白云岩、残余鲕粒白云岩、结晶白云岩及含砂屑粉—泥晶白云岩,其他岩类多属于非储集岩类。

溶孔粉—细晶残余(砂屑)鲕粒白云岩的原岩为台缘鲕粒滩坝、砂屑滩坝中分布的鲕粒、砂屑灰岩,呈环带状分布于梁平—开江陆棚或台盆^[17,18]北东侧的孤立台地边缘,分布较连片、厚度大。其残余鲕粒、砂屑主要由半自形—自形的粉—细晶白云石组成,部分仍残存了具有多个同心纹层结构的真鲕形态特征(图版

I-1)。一般晶间孔、晶间溶孔及粒间溶孔等十分发育,部分充填有大量的残余沥青(有机质)(图版I-2)或方解石胶结物。宏观上溶孔、溶洞分布不均,局部呈“炭渣”、“蜂窝”状^[19](图版I-3),面孔率为4%~18%。物性以高孔高渗为主,储集性能好。平均孔隙度可高达10.97%;连通性较好,渗透率以大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu \text{ m}^2$ 占绝对优势,占样品总数的83.80%。岩石孔隙度与渗透率之间呈较明显的指数相关关系(图2),随着孔隙度的增加,其渗透率也迅速均匀增加。该类岩性属于区内飞仙关组最佳储集岩。

结晶白云岩的原岩为开阔台地滩间海或局限台地泻湖中发育的泥晶或微晶灰岩,常由于白云石化作用不彻底而形成含灰质结晶白云岩(图版I-4),在研究区各井的飞一段顶—飞二段地层中有一定数量的分布。此类白云岩与前述的颗粒白云岩最大的区别在于其原始沉积环境的不同,沉积相控特征明显。其晶间孔和晶间溶孔较为发育,面孔率为1%~5%。物性以中孔中渗为主,储集性能较好。平均孔隙度为3.88%,渗透率多在 $0.5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu \text{ m}^2$ 。

其他岩类基本无可见孔隙,孔隙度值集中在1%~1.5%,渗透率极低,多属于非储集岩类。

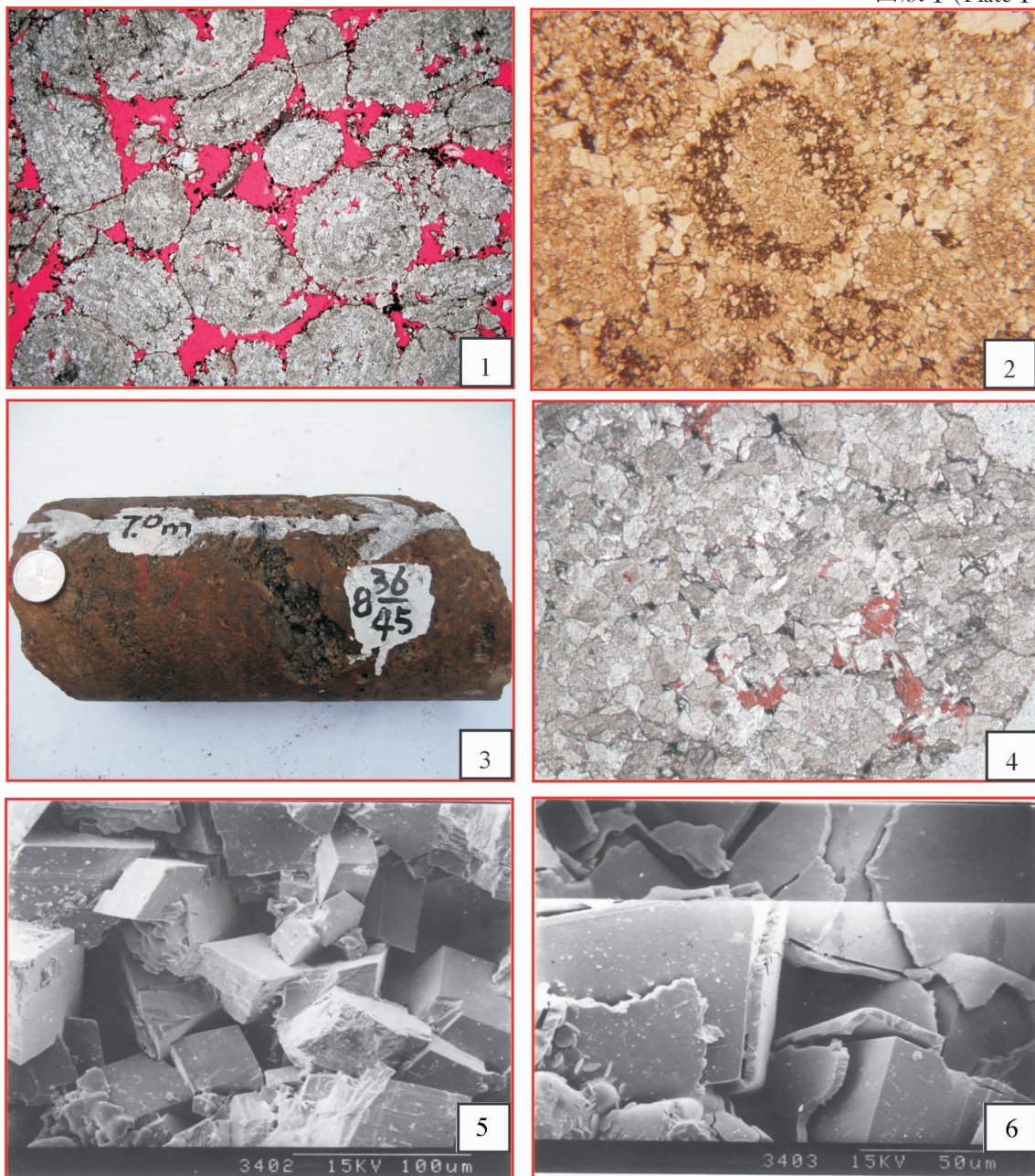
2.2 主要储集空间类型及特征

研究区飞仙关组储层孔隙、溶洞较发育,孔隙类型多,储集空间类型总体上可以分为孔(洞)、缝两大类八亚类,以次生成因的孔隙为主(表1)。主要有以下类型。

(1)晶间孔。狭义上定义的晶间孔指白云石晶体生长形成的晶体之间的孔隙,孔径在 $10 \sim 100 \mu \text{ m}$,按孔径的大小可进一步细分为小孔($10 \sim 50 \mu \text{ m}$)和中孔($50 \sim 100 \mu \text{ m}$)两类,以前者为主。此类孔隙分布密度较高,外形上大多呈近等轴的规则多面体状(图版I-5)。孔内充填物一般很少,见有胶状碳化沥青(图版I-5,6),偶见次生石英晶体。此类型孔隙在岩性相对较疏松的粉—细晶白云岩中较为发育(图版II-1)。晶间孔常常被溶蚀作用改造成为其他孔隙,区内以单一晶间孔为储集空间的储层很少见。

(2)晶间溶孔。主要分布在结晶白云岩、鲕粒白云岩中,是在上述晶间孔的基础上因溶蚀和溶蚀扩大而形成的次生孔,其孔隙边缘具明显溶蚀的港湾状、孤岛状痕迹,与晶间孔密切共生。孔径大于晶间孔,一般为 $10 \sim 200 \mu \text{ m}$ 。按孔径的大小,也可进一步细分为小孔($10 \sim 50 \mu \text{ m}$)、中孔($50 \sim 100 \mu \text{ m}$)和大

图版 I (Plate I)



1—溶孔粉—细晶鲕粒白云岩。鲕粒含量高,显残余结构,大多鲕粒内部见同心圆结构,鲕径 1~1.5mm。白云石晶间镶嵌较紧密。孔隙发育,均匀分布于鲕间,鲕内少见,粒间溶孔为主,孔壁见半圆或圆形沥青。毛坝 4 井, T_f , 3892.67m, 铸体, 单偏光;
 2—溶孔残余亮晶砂屑鲕粒白云岩, 砂屑、鲕粒组成, 由于鲕粒重结晶、白云化和砂屑重结晶, 均略显残余状。鲕粒见残余方解石, 晶间不同程度充填残余沥青或有机质, 胶结物为马牙状栉壳和半—自形细晶白云石。大湾 2 井, T_f , 4815.50m, 单偏光;
 3—8 次心 36—45 块, 褐灰色溶孔鲕粒白云岩。岩性疏松, 溶蚀空洞分布不均匀, 局部呈蜂窝状, 内为黑色沥青不完全充填。毛坝 4 井, T_f , 3851.52 m; 4—含灰质细—粉晶白云岩。交代及重结晶白云石形成晶间孔和晶间溶孔, 部分为后期方解石全充填, 局部溶孔内见残余沥青。大湾 1 井, T_f , 5073.50 m, 单偏光; 5—粉—细晶碎屑状白云岩。溶蚀碎屑内的自形晶白云石呈点线接触, 晶间孔非常发育, 小孔为主, 内充填有少量碳化沥青, 孔间以点状细短型喉道为主, 连通性较好。坡×井, T_f , SEM, P02—5856—粉—细晶碎屑状白云岩。晶间孔孔壁被胶状碳化沥青薄膜覆盖, 部分碳化沥青将晶间孔之间的吼道强烈堵塞。坡×井, T_f , SEM, P02—585

1—Vuggy very finely to finely crystalline oolitic dolostone. High content of ooids, residual structure and concentric laminations can be seen in most ooids. Diameter: 1~1.5mm. The fine dolomite crystals are tightly packed. The well-developed pore is distributed among the ooids uniformly but little inside of the ooids. Major pores in the oolitic dolostones are granular vuggy Bitumen occurs in the external laminations of some ooids with either semicircle or roundness shape. well Maoba 4, T_f , 3892.67m body of casting, single polar;

2-Vuggy residual sparry detritus oolitic dolostone, is composed of detritus and ooids. It shows residual fabric Structure in most ooids due to dolomitization and recrystallization. Residual calcite can be seen in the ooids. Intragranular pores are filled by residual bitumen or organic matter. The cement are bladed rinds and finer, subhedral to euhedral dolomite crystals. well Dawan 2, T₁^f, 4815.50m, single polar; 3-Brown-grey vuggy oolite dolostone. It is the Eight and thirty-six over forty-five from a well core. Its lithology is loose and the vugs are distributed non-uniformly. partly vugs are like honeycombs inside of which are filled with black bitumen incompletely. Well Maba 4 T₁^f, 3851.52 m; 4-Calcareous finely to very finely crystalline oolitic dolostone. The inter-crystalline pores and vugs which is formed by the replacement and recrystallization replacement, partly filled by the late stage of calcite. Residual bitumen can be seen in some vugs. well Dawan1, T₁^f, 5073.50m, single polar; 5-Very finely to finely crystalline chipping dolostone. The euhedral dolomite crystals in the dissolution chippings is in dotted line touch. The well-developed inter-crystalline pores are mainly little pores in which are filled with scantling carbonization bitumen. Dotted thinness short type throat are in priority and are well connected. Well Po×, T₁^f, SEM, P02-585; 6-Very finely to finely crystalline chipping dolostone. the wall of the inter-crystalline pores are covered by the membrane of carbonization bitumen. The inter-crystalline is jammed partly by the carbonization bitumen. Well Po×, T₁^f, SEM, P02-585

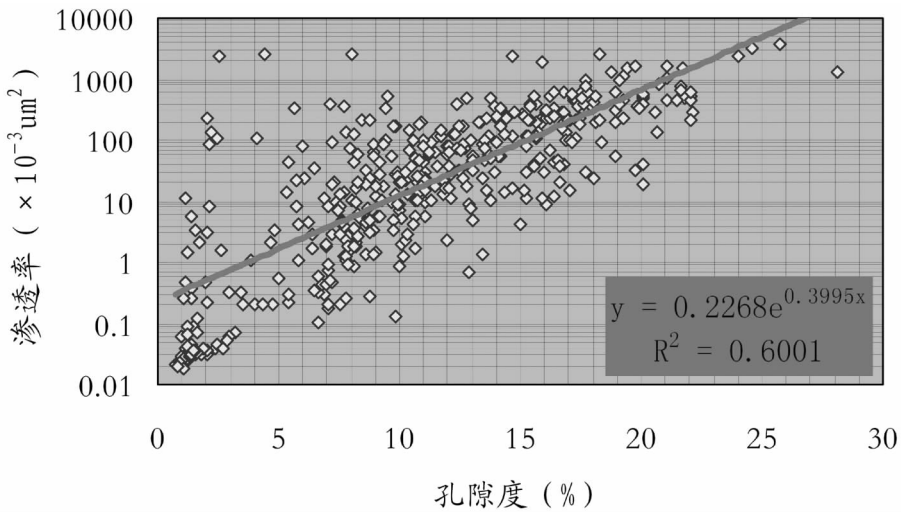


图2 毛坝4井飞二段鲕粒白云岩类储层孔渗相关图
Fig.2 Relationships between the porosity and permeability of the oolitedolomite in phase 2 of the Feixianguan Formation of well Maoba 4

孔(100~200 μm)三类,主体以发育中孔为主。此类孔隙的分布亦较密集,外形大多呈不规则的多面体状(图版II-1),孔内充填物较丰富,常见的次生矿物为石英和伊利石(图版II-2)和胶状碳化沥青,充填作用不完全。此类型孔隙亦主要发育于相对较疏松的粉-细晶白云岩、残余鲕粒白云岩中,由于孔间连通性好,因此为区内飞仙关组储层最重要的储集空间类型。

(3) 粒间溶孔。多见于具残余结构的颗粒白云岩中。孔径较大,为0.1~0.3 mm,最大可达1mm以上,以大孔为主。它的形成是溶蚀作用对颗粒间第一期和第二期亮晶方解石或白云石胶结物选择性溶蚀的结果,其溶蚀港湾状环边或参差不齐的残余亮晶充填物明显可见(图版I-1)。粒间溶孔明显大于白云

石晶粒,甚至大于由白云石晶粒组成的岩石颗粒而成为超大溶蚀孔洞,多发育在残余砂屑、鲕粒白云岩中。该类孔隙分布均匀而密集,外形大多呈不规则多面体状,除孔壁普遍见沥青充填物(图版II-3)及发育有残留的环边亮晶胶结物和向心生长的白云石晶簇外(图版II-4),一般无充填物,因而连通性好,为区内飞仙关组储层最好的一类储集空间类型。

2.3 储层分类评价及分布特征

2.3.1 储层分类评价

根据川东北地区飞仙关组储层的分类研究,结合研究区内储层实测岩心物性分析的孔隙度、渗透率以及压汞分析测得的中值喉道等孔隙结构特征参数^[9],参照表2标准对区内飞仙关组储层作如下分类与综合评价。

表 1 大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组储层储集空间类型及特征
Table 1 Reservoir space feature in the Feixianguan Formation in Dawan-Maoba-Tieshanpo area

成因类型		特 征	岩 性
类	亚 类		
孔 隙	铸模孔	鲕粒、砂屑和少量生屑全部被溶蚀形成的铸模孔隙	鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、含砾屑鲕粒白云岩
	粒内溶孔	晶粒或颗粒内部被溶蚀	鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、含砾屑鲕粒白云岩
	粒间溶孔、粒间溶蚀扩大孔	粒间孔被溶蚀扩大	鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、砾屑白云岩、含砂屑白云岩
	晶间孔	分布于白云石和次生方解石晶粒间	糖粒状残余鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、鲕粒白云岩、结晶白云岩、含生屑白云岩
	晶间溶孔、晶间溶蚀扩大孔	晶粒被溶掉或溶蚀扩大	糖粒状残余鲕粒白云岩、鲕粒白云岩、结晶云岩、含生屑云岩
	超大溶孔、溶洞	超颗粒、角砾、晶粒的不规则溶孔	砾屑白云岩、鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、结晶白云岩
裂 缝	微裂缝	主要为早期构造作用或干化失水收缩而成,缝宽小于 0.5mm 的网状缝	砾屑白云岩、鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、结晶白云岩
	构造缝	受局部构造张性力,形状不规则,有的被溶蚀扩大,半充填或未充填	砾屑白云岩、鲕粒白云岩、残余鲕粒白云岩、结晶白云岩

表 2 川东北地区碳酸盐岩储层评价标准^①

Table 2 Criteria used in judging the carbonate reservoir in northeastern Sichuan^①

储层类型	I	II	III	IV
孔隙度 (%)	>10	5~10	2~5	<2
渗透率 ($\times 10^{-3} \mu m^2$)	>1	0.25~1	0.002~0.25	<0.002
中值喉道宽度 (μm)	>1	0.2~1	0.024~0.2	<0.024
孔隙结构类型	大孔粗中喉型	大孔中粗喉 中孔中粗喉	中孔细喉型 小孔细喉型	微孔微喉型
孔隙空间类型	粒内、粒间、晶间溶孔、超大溶孔、溶缝	粒内溶孔、粒间溶孔、晶间溶孔、溶孔	粒内孔、粒间孔、晶间孔、溶孔	晶间隙
储层评价	好至极好	中等至较好	较差	差

研究区储层压汞资料分析表明,该套储层孔喉分布频带较宽,孔喉半径为 0.001~75 μm ,说明其溶蚀作用具明显的不均质性,以粗孔喉分布为主。储层后期改造作用明显,溶蚀作用强烈的储层一般具有低的排驱压力、中值压力,反映具有较好的物性与孔隙结构。

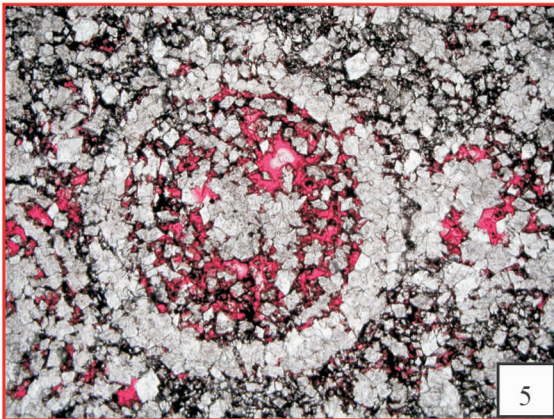
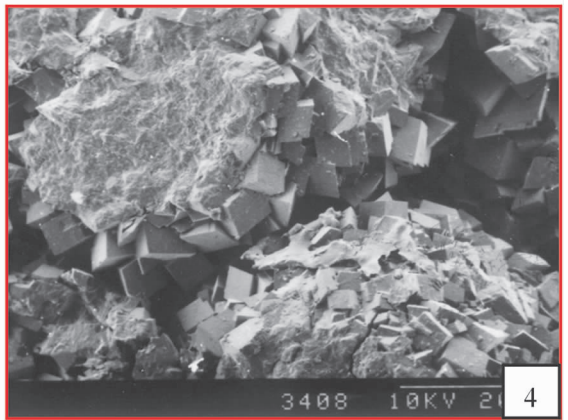
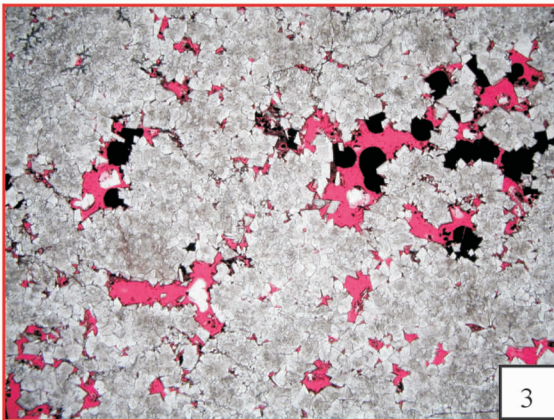
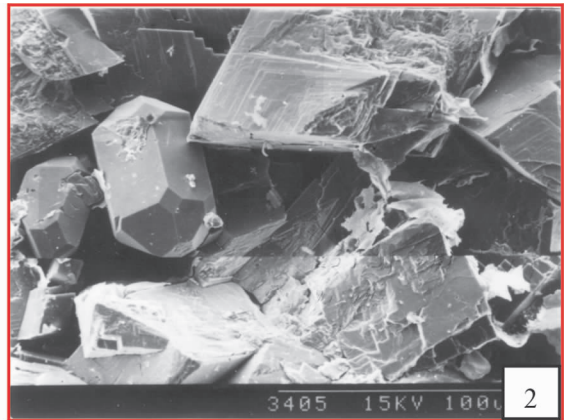
(1) I 类储集岩特征。孔隙结构为大孔粗中喉型。其孔隙度 >10%,渗透率 >1 $\times 10^{-3} \mu m^2$,喉道中值

半径 (R_{50}) >1.0 μm ,门槛压力值在 0.005~0.16 MPa,最大进汞饱和度多大于 95%。岩性主要为强烈溶蚀改造的颗粒白云岩。毛管压力曲线表现出粗歪度,分选中等,储集性能极佳(如毛坝 4 井,图 3-a)。

(2) II 类储集岩特征。孔隙结构为大(中)孔中粗喉型。其孔隙度为 5%~10%,渗透率 $0.25 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu m^2$,喉道中值半径 (R_{50}) 为 0.2~1.0 μm ,门槛压力值在 0.005~0.75 MPa,最大进汞饱和度为 88%~

① 李国雄等.普光气田普光 2 井区飞仙关组—长兴组气藏新增天然气探明储量报告(内部报告).中国石化南方勘探开发分公司,2006.

图版 II



1—粉-细晶白云岩。晶间孔和晶间溶孔均匀分布,两类型孔隙的大小及形态差异较大,较小的晶间孔呈规则多面体状,较大的晶间溶孔呈不规则状。大多孔隙中充填有碳化沥青,将孔隙和孔隙间的喉道严重堵塞。坡×井, T_f,铸体,单偏光;2—粉-细晶白云岩。晶间溶孔中充填几颗次生自形石英晶体和少量伊利石,伊利石也有再受溶蚀破坏的现象。坡×井, T_f,SEM,P02-1405;3—溶孔粉-细晶残余藻屑白云岩。藻屑含量高,不规则边界。白云石晶形较好,为他形-半自形晶,晶间镶嵌接触。孔隙发育,以溶蚀孔隙为主。沥青质含量高,少部分粒间溶孔被沥青质全充填,大部分见少量沥青呈圆状或半圆状沿孔壁分布。毛坝4井, T_f,3875.81m,铸体,单偏光,4—溶孔亮晶鲕粒白云岩。由自形白云石粉晶体组成的鲕粒和粒间孔、粒间溶孔,孔壁发育有向心生长的白云石晶簇,孔间发育点状粗短型和片状粗长型喉道,连通性极好。坡×井, T_f,SEM,L2-197;5—溶孔细晶残余鲕粒白云岩。显残余鲕粒结构,圈层较发育,部分为豆粒。白云石晶形较好,半自形晶为主,晶间镶嵌紧密。晶间孔、溶蚀孔为主,部分溶孔及大多晶间孔见沥青质、泥质充填。毛坝4井, T_f,3926.46m,铸体,单偏光,;6—泥晶灰岩。新鲜断面内见充填在裂缝内的自然硫。罗家1井, T_f(?),3539.57-3539.71m

1—very finely to finely crystalline dolostone. The inter- crystalline pores and vugs are distributed uniformly. two kinds of dolomite are different in the size of pore and the shape of it. The smaller inter- crystalline pores take on polyhedron. The shape of the bigger inter- crystalline pores is in abnormity. Most of the pores are filled with carbonization bitumen and the throat of the pores are jammed severiously. Well Po×, T_f, body of casting, single polar, ×25;

2—Very finely to finely crystalline dolostone. There are several granule euhedral quartz crystals and scantling illites, the illites are also re-dissolved. Well Po×, T₁^f, SEM, P02-1405; 3—Vuggy very finely to finely crystalline residual algal dolostone. They have high content of algal and abnormal boundary. The shape of the dolomites is better. The dolomite is subhedral to anhedral and has inter-crystalline inlaid touch. The pore is well-developed and is mainly vugs, high content of bitumen. Few vugs are filled with bitumen. Mostly, Sphericity and semicircle bitumen distributed among the wall of the pore. Well Maoba 4, T₁^f, 3875.81m, body of casting, single polar; 4—Vuggy sparry oolitic dolostone. The ooids and the inter-crystalline pores and vugs are consist of euhedral dolomite crystals. The cluster crystal grow entand in the wall of the pore. The type of dotted, wide and short thoat and the type of flakiness, wide and long thoat are well connected. Well Po×, T₁^f, SEM, L2-197; 5—The laminations are well developed, partly of which are pisolites. The shape of dolostone is better and the dolomites are mainly consist of subhedral crystals. The inter-crystalline inlaid intensely. The inter-crystalline pores and vugs is in priority and some of them are filled with bitumen and mud. Well Maoba 4, T₁^f, 3926.46m, body of casting, single polar, ×25; 6—Micritic limestone. The fracture is filled with the native sulphur in the fresh section. Well Luojia 1, T₁^f(?), 3539.57-3539.71m

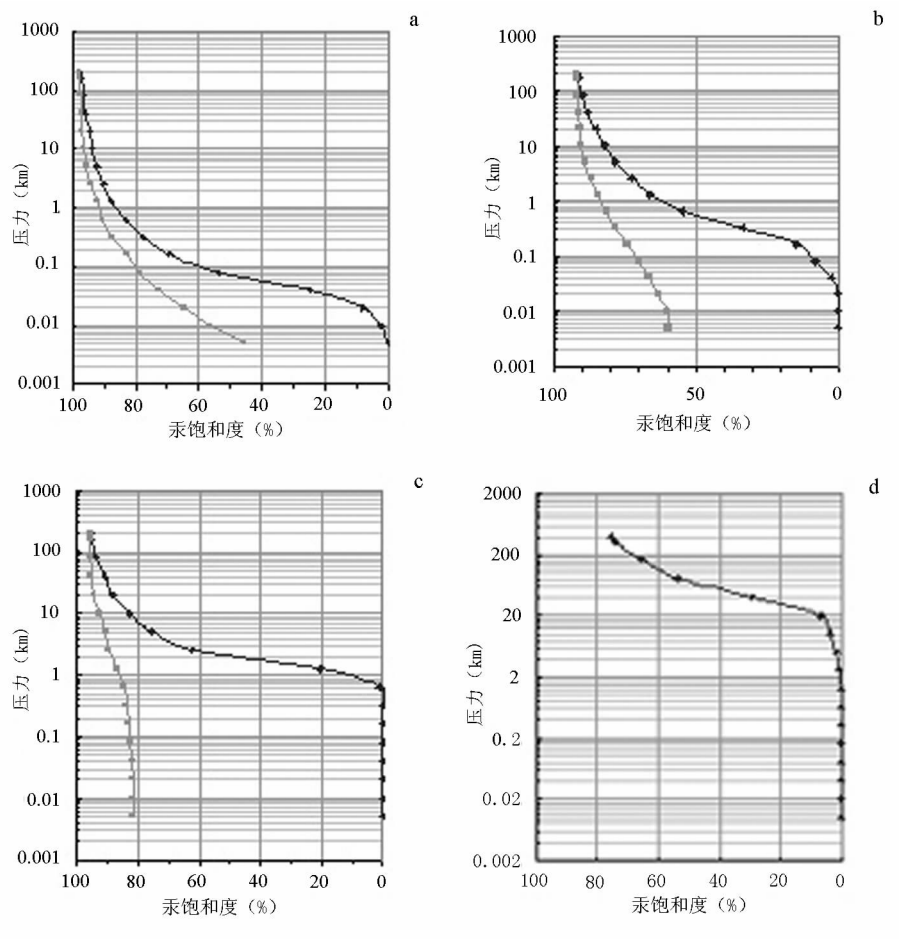


图 3 毛坝 4 井飞仙关组孔隙型储层典型压汞曲线图

- a— I 类储集岩, 样品深度: 3817.90 m, 孔隙度 15.45%, 岩性: 溶孔细晶残余鲕粒白云岩;
- b— II 类储集岩, 样品深度: 3893.47 m, 孔隙度 9.29%, 岩性: 溶孔粉—细晶残余藻屑白云岩;
- c— III 类储集岩, 样品深度: 3820.55 m, 孔隙度 4.35%, 岩性: 残余亮晶鲕粒含灰质白云岩;
- d— IV 类储集岩, 样品深度: 3696.59 m, 孔隙度 1.58%, 岩性: 泥—粉晶残余藻屑白云岩

Fig.3 Plot of the representative mercury injection curve of the pore-type reservoir in the Feixianguan Formation of well Maoba 4

a—Type I reservoir rocks: sample depth: 3817.90 m; porosity: 15.45%; lithology: porous, residual oolitic, finely crystalline dolostone; b—Type II reservoir rocks: sample depth: 3893.47 m; porosity: 9.29%; lithology: porous, residual algal detritus, very finely to finely crystalline dolostone; c—Type III reservoir rocks; sample depth: 3820.55 m; porosity: 4.35%; lithology: residual sparry calcareous oolitic dolostone; d—Type IV reservoir rocks: sample depth: 3696.59 m; porosity: 1.58%; lithology: residual algal detritus micritic dolostone

96%。岩性主要为较弱—中等溶蚀程度改造的颗粒白云岩。毛管压力曲线显示出中—细歪度的特征,分选中等,储集性能良好(如毛坝4井,图3-b)。

(3) III类储集岩特征。孔隙结构为小(中)孔细喉型。其孔隙度为2%~5%,渗透率在 $0.002 \times 10^{-3} \sim 0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,喉道中值半径(R_{50})为 $0.024 \sim 0.2 \mu\text{m}$,门槛压力值在0.04~4 MPa,最大进汞饱和度为80%~90%。主要发育在缺乏溶蚀作用改造的微—粉晶白云岩或颗粒白云岩中。毛管压力曲线显示出中—细歪度,分选中等—差,储集性能较差(如毛坝4井,图3-c)。

(4) IV类储集岩特征。孔隙结构为微孔微喉型。其孔隙度 $< 2\%$,渗透率 $< 0.002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,喉道中值半径(R_{50}) $< 0.024 \mu\text{m}$,门槛压力值在0.16~10 MPa,最大进汞饱和度为72%~80%。主要发育在缺乏溶蚀作用改造的含膏质粉—微晶白云岩和隐藻白云岩中。毛管压力曲线显示出细—极歪度,分选差—极差,储集性能差(如毛坝4井,图3-d)。

统计表明,大湾—毛坝北—铁山坡南地区飞一段顶—飞二段台地边缘鲕滩白云岩储层以 I、II类储层为主,储集性能优越,是川东北地区目前所发现

的最好的储层类型之一。

2.3.2 储层分布特征

纵向上,研究区飞仙关组储层主要集中分布在飞一段顶—飞二段的鲕粒白云岩中,多个储渗段与致密层相间分布,其中大湾1、2井,毛坝4、6井及坡5井连续性较好,单层厚度多为10~30 m,最厚可达100多米。

横向上, I、II、III类储层在大湾—毛坝北—铁山坡南地区最为发育(图4),如毛坝4井、坡5井的 I、II、III类储层总厚度分别达250 m及230 m,发育程度(与地层钻厚的比)分别为43.85%及61.25%^[10]。向毛坝构造南端及铁山坡构造北端储层逐渐变差甚至不发育(图4),如坡4井 II、III类储层总厚仅29.14 m,且无 I类储层发育^[10]。

平面上,储层主要沿梁平—开江陆棚或台盆北东侧的大湾1井—大湾2井—坡2井—坡5井—毛坝6井—毛坝4井一线呈带状展布(图5~7)。

3 储集相分析

“相”属于指示沉积环境、岩石成分和成因意义的范畴^[20,21]。依据“相控论”观点,川东北大湾—毛坝—铁

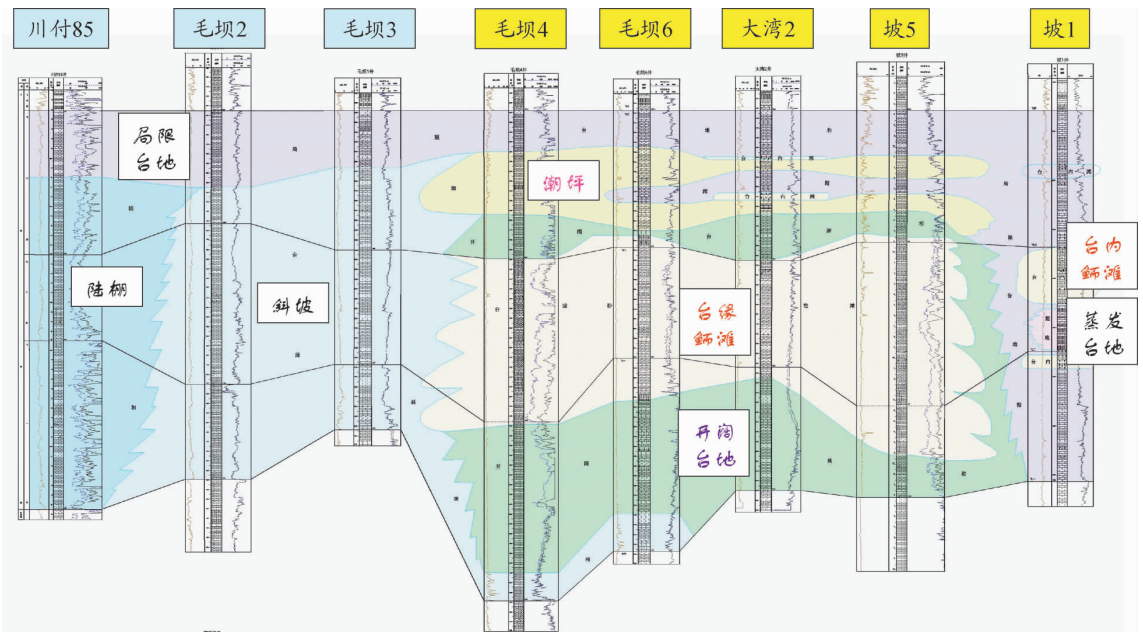


图4 川东北毛坝—大湾—铁山坡地区飞仙关组沉积相及储层横向分布图(SW-NE)

Fig.4 Lateral distribution of sedimentary facies and reservoir of the Feixianguan Formation in the Maoba-Dawan-Tieshanpo area, northeastern Sichuan

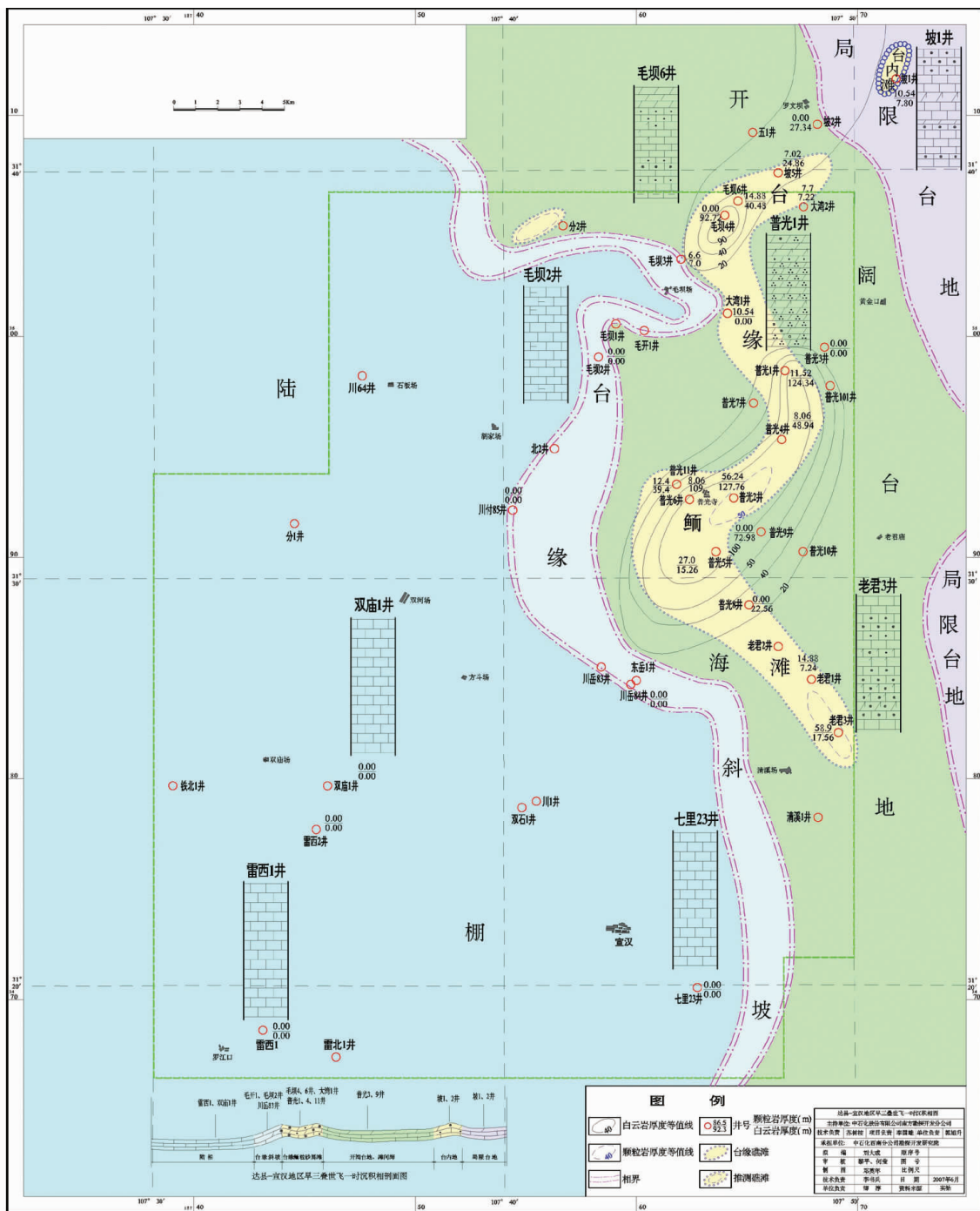


图 5 川东北达县—宣汉地区早三叠世飞一时平面沉积相图

Fig.5 Distribution of sedimentary facies of the Daxian-Xuanhan area, northeastern Sichuan, during deposition of the First Member of the Early Triassic Feixianguan Formation

山坡地区飞仙关组储层发育的主导控制因素为有利储集相带,主要是有利构造背景下的各种有利的沉积相和成岩相等。其中,沉积相不仅决定了该套储层的大致空间分布范围,还影响着后期成岩作用的类型、

强度、特征及储层内部的孔隙结构等^[18,22];成岩相则决定了储层的最终分布范围和储集性能的优劣^[2]。

3.1 有利沉积相特征

沉积相是一定的沉积环境(地理、气候、构造、介

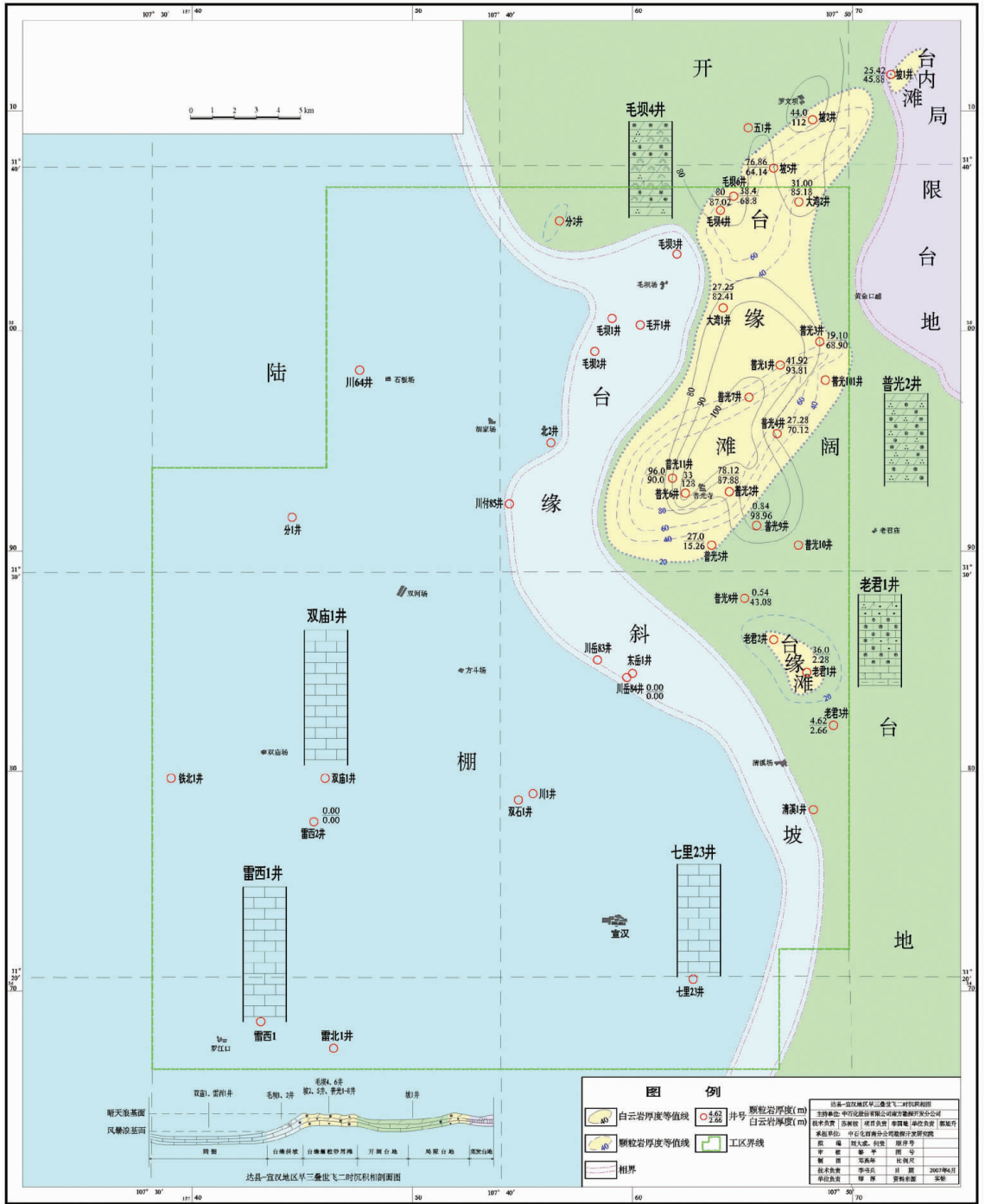


图 6 川东北达县—宣汉地区早三叠世飞二时平面沉积相图
 Fig.6 Distribution of sedimentary facies of the Daxian-Xuanhan area, northeastern Sichuan, during deposition of the Second Member of the Early Triassic Feixianguan Formation

质条件等)及在该环境中形成的沉积岩特征(岩性、古生物、地化特征等)的综合表现^[2]。

通过露头剖面、钻井、测井和地震等资料的研究,

结合单因素分析多因素综合作图法,认为大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组主要发育碳酸盐岩台地沉积体系,可划分为斜坡、台地边缘浅滩、开阔台地

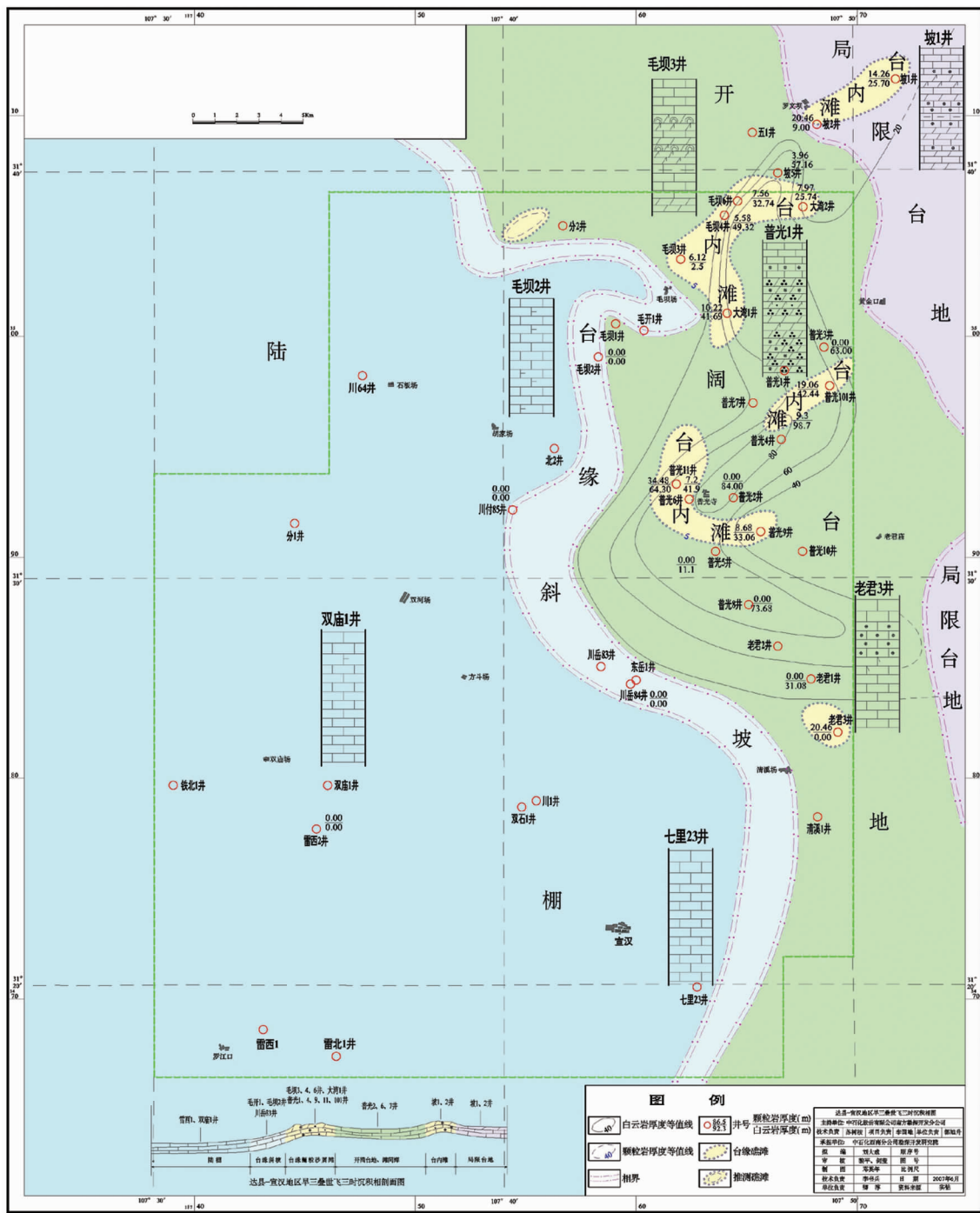


图 7 川东北达县—宣汉地区早三叠世飞三时平面沉积相图

Fig.7 Distribution of sedimentary facies of the Daxian—Xuanhan area, northeastern Sichuan, during deposition of the Third Member of the Early Triassic Feixianguan Formation

和局限台地 4 个沉积相单位(图 5~7)。其中研究区飞仙关期处于梁平—开江陆棚或台盆北东侧、城口—鄂西海槽西侧的孤立台地环境^[23],该时期属于一次三级海平面下降阶段^[24],储层发育的有利沉积

相带为台地边缘浅滩相。

台地边缘浅滩相位于碳酸盐开阔台地与台缘斜坡相带之间(图 5~7),是形成于浪基面附近,受波浪和潮汐作用改造强烈的地形障壁、堤状海滩的高

能地带。由于位于台地边缘,水体能量高,受持续、稳定的波浪、潮汐水流或沿岸流的簸选,分选较好,形成鲕粒的堆积和灰泥的带出,产生了沿台地边缘分布的带状鲕粒滩,其鲕粒圈层较发育(图版 II-5)、颗粒含量高(图版 I-1),滩体内部原生粒间孔极为发育。沉积厚度较大,一般可达 20~100 m(毛坝 4 井厚约 200 m),分布稳定,常呈堤状堡滩带状分布。此外,台地边缘鲕粒滩体原始沉积堆积时水体较浅,加之地处梁平—开江陆棚或台盆生烃凹陷区北东侧,有利于与蒸发作用相关的准同生白云石化和埋藏期溶蚀作用的进行。图 8 表明毛坝 4 井飞一段顶—飞二段台地边缘浅滩相地层格架内多发育 I、II 类储层,台地边缘浅滩是最有利于飞仙关组储层形成与演化的沉积相带。图 5~7 均展示大湾—毛坝北—铁山坡南地区全位于该相带内。

据前人研究^[24,25],随着飞仙关期三级海平面的下降及对应的碳酸盐台地沉积的发展,鲕粒滩坝在台地上的沉积场所也在不断发生着变化。随台地边缘带的向外海迁移而迁移,分布范围越来越大,分布层位也由台地内部逐渐向外海方向抬升,这些滩体呈多层叠置状,具有明显的穿时性^[26]。研究区飞仙关组鲕粒滩的迁移性及穿时性导致了前述储层的分布特征。

3.2 有利成岩作用分析

成岩相是一定成岩环境及其所形成的岩石矿物及其结构类型组合特征的综合反映^[27]。按主要物源成分、成岩作用类型等进行划分,可分为胶结相、溶蚀相、白云岩化相等。其中溶蚀相、白云岩化相等对碳酸盐岩储层扩容增孔具有建设性作用。可见,碳酸盐岩储层形成的核心控制因素是成岩相。

研究区储层在沉积后埋藏的过程中不断经历着各种复杂的成岩作用,对碳酸盐岩储层而言早期的压实、压溶和方解石胶结作用及自生矿物沉淀的充填作用对鲕粒滩体原生粒间孔产生了毁灭性的影响^[28],次生孔隙几乎成为了碳酸盐岩储层的惟一储集空间,其发育主要受后期埋藏过程中白云岩化相、埋藏溶蚀相的控制。

3.2.1 白云岩化相

一般认为,灰质沉积物的强烈白云石化可较大幅度地提高储层质量^[29]。一方面,按分子对分子交代的理论,从灰岩交代形成白云岩将会增加 12.5%的孔隙^[16,22];另一方面,交代形成的白云石较方解石具有更粗大和自形的晶体,从而可提高岩石的有效孔

隙度与渗透率。从图 9 可以看出,当白云石含量小于 80%时,样品的孔隙度几乎都在 2%以下,低于储层下限标准,岩石孔隙度大小与白云石含量关系不太明显,储层主要发育在白云石含量大于 80%的岩石类型中。也就是说,并不是所有的白云岩化作用都有利于储层的发育。

白云岩化相主要从两方面控制储层次生孔隙的发育。一是交代和重结晶作用,该作用在一定范围内是促进孔隙的发育,当地层孔隙水中 CO_3^{2-} 浓度较小时,2 mol 方解石被交代形成 1 mol 白云石,白云石比重较大,在该过程中会形成一定的晶间孔,使原岩的孔隙度增大;二是溶蚀作用,次生溶蚀孔隙随机的分布在残余的白云岩颗粒中,并非局限在颗粒中心(图版 I-1, II-5)。

研究区飞仙关期处于孤立台地环境,水体浅,盐度高。有利于储层形成与演化的台地边缘浅滩堆积的水体更浅,在四、五级海平面升降过程中频繁暴露于水体之上,十分有利于蒸发、混合水白云石化作用,从而导致研究区台地边缘浅滩早期沉积的鲕粒灰岩几乎全部转变成了鲕粒白云岩,随后在埋藏过程中由于白云岩是地层中孔、渗相对较高的部位,有利于各种地层水的流通,为继续的埋藏期白云石化和溶解作用奠定了基础。

3.2.2 埋藏溶蚀相

研究区飞仙关组鲕滩白云岩储层沉积后至少经历三期溶蚀作用^[29],其中准同生—早成岩期一次,埋藏期两次^[30]。埋藏溶蚀相是飞仙关组优质储层中次生孔隙形成的关键,与梁平—开江陆棚或台盆烃源岩向油气转化和孤立台地内硫酸盐热化学还原反应(TSR)密切相关。

(1) 第一期埋藏溶蚀相

区域资料表明,研究区飞仙关组鲕滩气藏的烃源岩主要为梁平—开江陆棚或台盆内部上二叠统的灰黑色泥页岩、黑灰色泥晶灰岩等及部分为志留系的黑色泥岩、页岩。在三叠纪末—中侏罗世末,梁平—开江陆棚或台盆相中的上二叠统烃源岩埋深达 2000~4500 m,开始大量生油,在这一转化过程中会释放出大量的有机酸和酸性地层水。当这些具有强烈溶蚀能力的有机酸性水沿着梁平—开江陆棚或台盆相与北东侧孤立台地边缘之间发育的同生断层向上运移到已发生早期白云石化和大气淡水溶蚀作用的飞仙关组台地边缘鲕滩时,产生大规模的溶解作

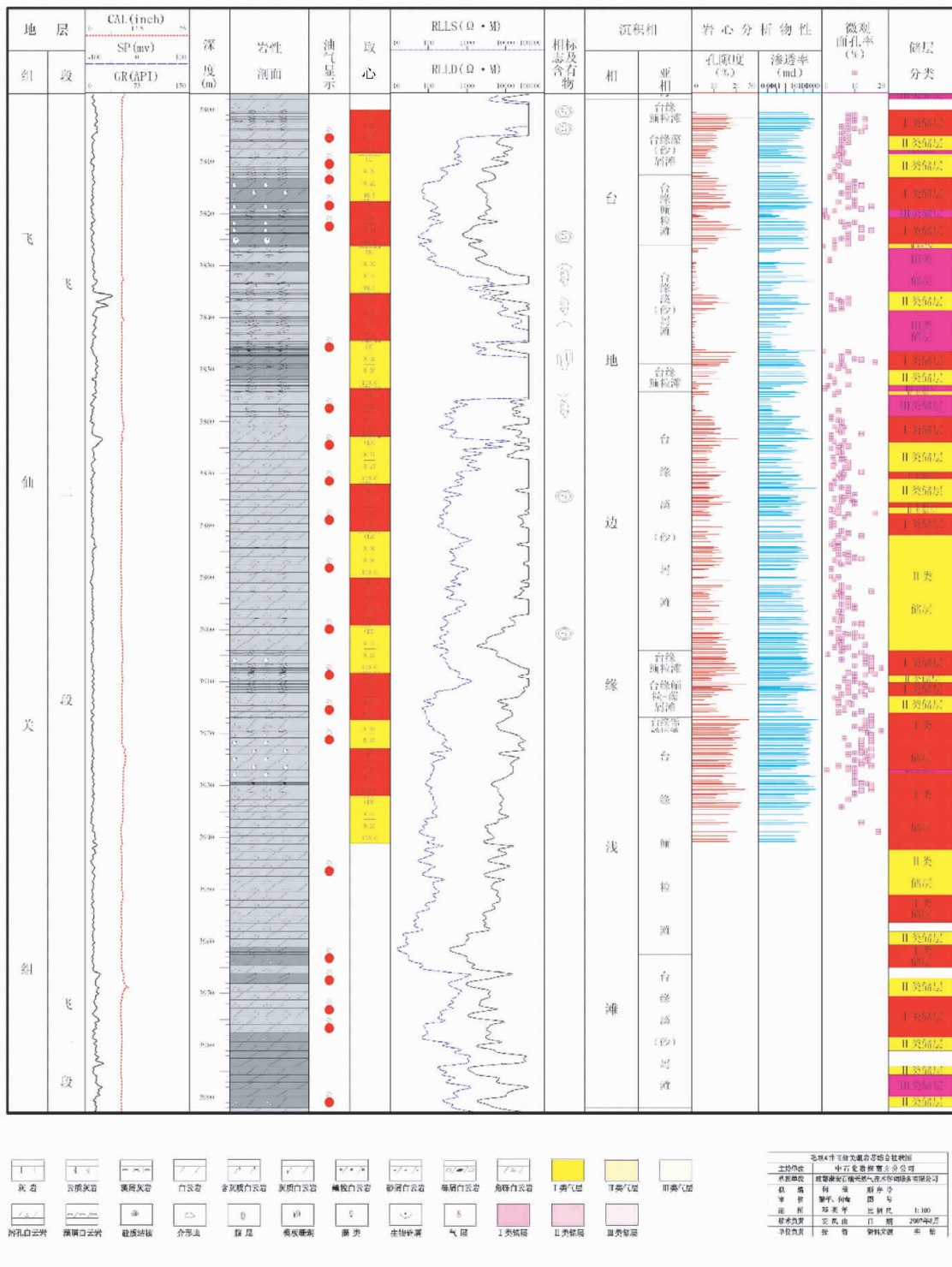


图 8 飞仙关组台地边缘浅滩相与优质储层纵向分布关系(毛坝 4 井)

Fig.8 Relation of vertical distribution between the platform-margin shoal facies and the favorable reservoir in the Feixianguan Formation (well Maoba 4)

用,形成大量的粒间溶孔和白云石晶间溶孔。溶孔中普遍见沥青充填物半充填,薄片观察揭示沥青充填物分布产状与孔隙结构有关,沿鲕粒圈层溶蚀孔

分布而形成被沥青污染的黑色环圈(图版 I-2, II-5)或沿白云石晶间孔分布(图版 I-6)。沥青含量与孔隙度有较好的正相关关系(图 10),表明曾为液态

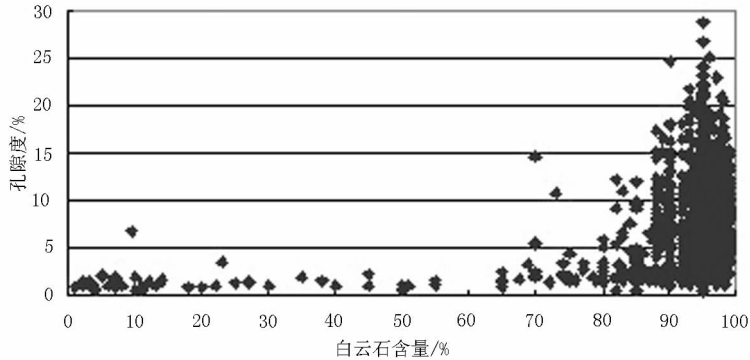


图9 普光1、2、6等井飞仙关组储层孔隙度与白云石含量关系^①

Fig.9 Graph of relation between the porosity and content of dolomite in the reservoir of Feixianguan Formation of wells 1, 2 and 6 in the Puguang gas field^①

烃充填的孔隙与今孔隙之间有着良好的正相关^[31],也说明液态烃充填抑制了成岩胶结作用^[28],有利于优质储层的形成。

这种液态烃及其伴生的有机酸对储层的溶蚀作用,是中国大多数叠合盆地碳酸盐岩含烃储层普遍都经历的岩溶事件。

(2) 第二期埋藏溶蚀相

该期埋藏溶蚀作用与硫酸盐热化学还原反应(TSR)有关,其产生的 H_2S 是碳酸盐岩溶蚀作用的一种重要营力^[32,33],这是川东北地区高含 H_2S 储层经历独特而重要的深埋岩溶事件。

川东北大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组是富含石膏岩的地层,地层水中含大量的 SO_4^{2-} 离子,在深埋、高温阶段,烃类与 SO_4^{2-} 反应生成大量的 H_2S 。

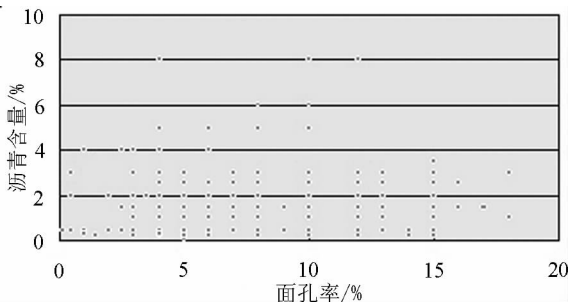


图10 飞仙关组沥青与面孔率关系
(毛坝4井,3800.94~3938.92m)

Fig.10 Relation between the bitumen content and porosity of thin sections in Tlf ooid reservoir rocks (well Maoba 4, at 3800.94~3938.92 m depth)

飞仙关组气藏中 H_2S 含量高达10%~15%,前人大量的研究证实飞仙关组确实存在广泛、强烈的硫酸盐热化学还原反应(TSR)。另外,储层孔隙中普遍含0.2%~1.0%的铁质充填物,坡1井甚至达5%,金属自然硫的析出常与 H_2S 的溶蚀作用有关(图版II-6)。该期埋藏溶蚀作用时间大致在中侏罗世后,地层埋深达4500 m以上,即主要为大量生气阶段。溶蚀孔隙中常充填有石英、白云石(图版II-2)及粗晶方解石等。在研究区该期埋藏溶蚀作用主要表现为改造第一期埋藏溶蚀作用形成的粒间溶孔和白云石晶间溶孔。这些孔隙中充填有沥青,但沥青并不是全都分布在孔隙边缘,而是呈圆环形或圆珠状分布于孔隙中央(图版II-3),可以推测沥青圆环以内的孔隙为第一期埋藏溶蚀作用形成,沥青圆环以外的孔隙是第二期埋藏溶蚀作用形成的产物。

研究区飞仙关组鲕粒白云岩在具有较高孔隙度的同时也具有较高的 H_2S 含量^[33],两者成正比,说明TSR作用造成的溶蚀作用控制了孔隙的发育。黄思静等^[34]最新研究认为川东北硫酸盐热化学还原反应作用(TSR)与广泛的白云石化之间可能存在联系,也正是溶蚀相、白云岩化相等构成的成岩相是碳酸盐岩储层形成的核心控制因素的体现。

4 结 语

(1)通过对四川盆地大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组深层海相优质碳酸盐岩储层“相控论”的探讨,表明在有利构造背景下与蒸发岩有关的台地边

①李国雄等.普光气田普光2井区飞仙关组—长兴组气藏新增天然气探明储量报告(内部报告).中国石化南方勘探开发分公司,2006.

缘礁滩型白云岩储层其形成与演化主要受控于有利的沉积相带、白云岩化相及与有机质热演化有关的 TSR 作用的埋藏溶蚀相等为主导的“储集相”。

(2) 每个地区深层优质碳酸盐岩储层的发育都是多种因素共同作用的结果。针对各种具体勘探情况,应加强高分辨率三维地震和储层预测关键技术,重视岩相古地理编图的基础工作,研究成岩作用主控因素,预测有利的沉积相带和成岩相带,最终以寻找有利“储集相”为目标。

参考文献(References):

- [1] 金之均. 中国海相碳酸盐岩层系油气勘探特殊性问题 [J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 15-22.
Jin Zhijun. Particularity of petroleum exploration on marine carbonate strata in China sedimentary basins [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 15-22(in Chinese with English abstract).
- [2] 史斗, 刘文汇, 郑军卫. 深层气理论分析和深层气潜势研究[J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 168-181.
Shi Dou, Liu Wenhui, Zheng Junwei. Theory analysis on deep seated gas and its potential study [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(2): 168-181(in Chinese with English abstract).
- [3] 冉隆辉, 陈更生, 徐人芬. 中国海相油气田勘探实例(之一)四川盆地罗家寨大型气田的发现和探明[J]. 海相油气地质, 2005, 10(1): 43-47.
Ran Longhui, Chen Gengsheng, Xu Renfen. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 1): discovery and exploration of Luojiashai Gas Field, Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10 (1): 43-47 (in Chinese with English abstract).
- [4] 马永生, 郭旭升, 郭彤楼, 等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. 地质论评, 2005, 51(4): 477-480.
Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. Discovery of the Large-scale Puguang gas field in the Sichuan Basin and its enlightenent for hydrocarbon prospecting. Geological Review, 2005, 51(4): 477-480(in Chinese with English abstract).
- [5] 马永生. 中国海相油气田勘探实例(之六)四川盆地普光大气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 35-40.
Ma Yongsheng. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 6): Puguang Gas Field in Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11 (2): 35-40 (in Chinese with English abstract).
- [6] 牟传龙, 马永生, 谭钦银, 等. 四川通江—南江—巴中地区长兴组—飞仙关组沉积模式[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 820-826.
Mou Chuanlong, Ma Yongsheng, Tan Qinyin, et al. Sedimentary model of the Changxing -Feixianguan Formations in the Tongjiang -Nanjiang -Bazhong Area, Sichuan [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 820-826(in Chinese with English abstract).
- [7] 周新源, 王招明, 杨海军, 等. 塔中奥陶系大型凝析气田的勘探和发现[J]. 海相油气地质, 2006, 11(1): 45-51.
Zhou Xinyuan, Wang Zhaoming, Yang Haijun, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 5): Tazhong Ordovician Condensate Field in Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11 (1): 45-51 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王招明, 赵宽志, 郭光辉, 等. 塔中 I 号坡折带上奥陶统礁滩型储层发育特征及其主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 797-801.
Wang Zhaoming, Zhao Kuanzhi, Wu Guanghui, et al. Characteristics and main controlling factors of the Upper Ordovician reef-bank reservoir development in the Tazhong I slope-break zone [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 797-801(in Chinese with English abstract).
- [9] 邹才能, 陶士振, 薛叔浩. “相控论”的内涵及其勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 7-12.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Xue Shuhao. Connotation of “Facies Control Theory” and its significance for exploration [J]. Petrol Eumexpi Oration and Development, 2005, 32(6): 7-12(in Chinese with English abstract).
- [10] 饶雷. 川东北铁山坡构造飞仙关组气藏特征 [J]. 天然气工业, 2007, 27(5): 32-35.
Rao Lei. Characteristics of Feixianguan Formation gas pool in Tieshanpostructure, northeast Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(5): 32-35(in Chinese with English abstract).
- [11] 张水昌, 朱光有. 四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探潜力[J]. 石油学报, 2006, 27(5): 1-8.
Zhang Shuichang, Zhu Guangyou. Gas accumulation characteristics and exploration potential of marine sediments in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(5): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [12] 马永生. 四川盆地普光超大型气田的形成机制[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 9-14
Ma Yongsheng. Generation mechanism of Puguang Gas Field in Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinice, 2007, 28 (2): 9-14 (in Chinese with English abstract).
- [13] 范嘉松. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 23-30.
Fan Jiasong. Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential controlling factors for their formation [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12 (3): 23-30 (in Chinese with English abstract).
- [14] 罗平, 张静, 刘伟, 等. 中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 36-50.
Luo Ping, Zhang Jing, Liu Wei, et al. Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 23-30(in Chinese with English abstract).
- [15] 王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地三叠系飞仙关组气藏储层成岩作用研究[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 831-839.
Wang Yigang, Wen Yingchu, Hong Haitao, et al. Diagenesis of

- Triassic Feixianguan Formation in Sichuan Basin, Southwest China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6):831-839(in Chinese with English abstract).
- [16] 何莹, 鲍志东, 沈安江, 等. 塔里木盆地牙哈-英买力地区寒武系-下奥陶统白云岩形成机理[J]. *沉积学报*, 2006, 24(6):806-818.
He Ying, Bao Zhidong, Shen Anjiang, et al. The genetic mechanism of dolostones of the Cambrian-Lower Ordovician in Yaha-Yingmaili Region, Tarim Basin: dolomitization through deep buried hydrothermal fluid [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(6):806-818(in Chinese with English abstract).
- [17] 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, 27(3):326-331.
Ma Yongsheng, Mou Chuanlong, Tan Qinyin, et al. A discussion on Kaijiang-Liangping ocean trough[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3):326-331(in Chinese with English abstract).
- [18] 倪新锋, 陈洪德, 田景春, 等. 川东北地区长兴组-飞仙关组沉积格局及成藏控制意义[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(4):458-465.
Ni Xinfeng, Chen Hongde, Tian Jingchun, et al. Sedimentary framework of Changxing-Feixianguan Formations and its control on reservoiring in northeastern Sichuan basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(4):458-465(in Chinese with English abstract).
- [19] 蔡勋育, 马永生, 李国雄, 等. 普光气田下三叠统飞仙关组储层特征[J]. *石油天然气学报*, 2005, 27(1):43-45.
Cai Xunyu, Ma Yongsheng, Li Guoxiong, et al. Characteristics of carbonate reservoirs of Feixianguan Formation of Lower Triassic in PuGuang gas field[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2005, 27(1):43-45(in Chinese with English abstract).
- [20] 薛叔浩, 刘雯林, 薛良清, 等. 湖盆沉积地质与油气勘探 [M]. 北京:石油工业出版社, 2002:1-20.
Xue Shuhao, Liu Wenjin, Xue Liangqing, et al. *Sedimentary Geology and Oil-gas Exploration in Lake Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002:1-20(in Chinese).
- [21] 王留奇, 赵澄林, 刘孟慧, 等. 油区构造沉积成岩相带研究[J]. *石油勘探与开发*, 1992, 19(5):26-31.
Wang Liuqi, Zhao Chenglin, Liu Menghui, et al. A study on the structural sedimentary diagenetic zone in an oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1992, 19(5):26-31(in Chinese with English abstract).
- [22] 王兴志, 张帆, 蒋志斌, 等. 四川盆地东北部飞仙关组储层研究 [J]. *地质前缘*, 2008, 15(1):117-122.
Wang Xingzhi, Zhang Fan, Jiang Zhibin, et al. A study of Feixianguan reservoir in northeast Sichuan basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(1):117-122(in Chinese with English abstract).
- [23] 冯增昭主编. *沉积岩石学* [M]. 北京:石油工业出版社, 1993:74-76.
Feng Zengzhao. *Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993:74-76(in Chinese).
- [24] 王兴志, 张帆, 马青, 等. 四川盆地东部晚二叠世-早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化[J]. *沉积学报*, 2002, 20(2):249-254.
Wang Xingzhi, Zhang Fan, Ma Qing, et al. The characteristics of reef and bank and the fluctuation of Sea level in Feixianguan Period of Late Permian -Early Triassic, East Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20 (2):249-254 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杨雨, 文应初. 川东北开江-梁平海槽发育对 T₁f 鲕粒岩分布的预测[J]. *天然气工业*, 2002, 22(增刊):30-32.
Yang Yu, Wen Yingchu. Control of Kaijiang-Liangping trough growing on T₁f oolite distribution in Northeast Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22 (Supp.):30-32 (in Chinese with English abstract).
- [26] 魏国齐, 陈更生, 杨威, 等. 川北下三叠统飞仙关组“槽台”沉积体系及演化[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2):254-260.
Wei Guoqi, Chen Gengshen, Yang Wei, et al. Sedimentary system of platformal trough of Feixianguan Formation of Lower Triassic in Northern Sichuan Basin and its evolution [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2):254-260(in Chinese with English abstract).
- [27] 裘亦楠, 薛叔浩, 应凤祥. 中国陆相油气储集层 [M]. 北京:石油工业出版社, 1997:102-108.
Qiu Yanan, Xue Shuhao, Ying Fengxiang. *Oil-gas Reservoir of Continental Facies in China* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:102-108(in Chinese).
- [28] 赵雪凤, 朱光有, 刘钦甫, 等. 深部海相碳酸盐岩储层孔隙发育的主控因素研究[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4):514-521.
Zhao Xuefeng, Zhu Guangyou, Liu Qinfu, et al. Main control factors of pore development in deep marine carbonate reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18 (4):514-521 (in Chinese with English abstract).
- [29] 何莹, 郭旭升, 张克银, 等. 川东北飞仙关组优质储层形成研究 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(1):12-16.
He Ying, Guo Xusheng, Zhang Keyin, et al. Diagnosis of excellent reservoirs in feixianguan formation in northeastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(1):12-16(in Chinese with English abstract).
- [30] 曾伟, 黄先平, 杨雨, 等. 川东北地区飞仙关组储层中的埋藏溶蚀作用[J]. *天然气工业*, 2006, 26(11):4-6.
Zeng Wei, Huang Xianping, Yang Yu, et al. Burial dissolution of Feixianguan Formation reservoirs Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(11):4-6(in Chinese with English abstract).
- [31] 赵文智, 汪泽成, 王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理[J]. *地质论评*, 2006, 52(5):708-717.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Wang Yigang. Formation mechanism of highly effective gas pools in the Feixianguan Formation in the NE Sichuan Basin [J]. *Geological Review*, 2006, 52(5):708-717(in Chinese with English abstract).
- [32] Mazzullo S J, Harris P M. Mesogenetic dissolution: Its role in porosity development in carbonate reservoir [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(5):607-620.
- [33] 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):822-828(in Chinese with English abstract).

[34] 黄思静, 王春梅, 黄培培, 等. 碳酸盐成岩作用的研究前沿和值得思考的问题[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 35(1):1-7.

Huang Sijing, Wang Chunmei, Huang Peipei, et al. Scientific research frontiers and considerable questions of carbonate diagenesis [J]. *Journal of Chengdu University of Technology:Sci & Technol Ed*, 2008, 35(1):1-7(in Chinese with English abstract).

Reservoir rock characteristics and main controlling factors of the Feixianguan Formation in the Maoba–Dawan–Tieshanpo area, Sichuan basin

HE Ying¹, HU Dong-feng², ZHANG Jian¹, LI Ping^{1,3},
PAN Chang-lin⁴, WANG Yan¹, LIU Da-cheng¹

(1. *Exploration & Production Research Institute, SWPB SINOPEC, Chengdu 610081, Sichuan, China*;
2. *Southern E&P Company, SINOPEC, Chengdu 610041, Sichuan, China*; 3. *College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*; 4. *Northeast Sichuan Exploration Frontier Commanding Headquarters, Southern E&P Company, SINOPEC, Dazhou 635000, Sichuan, China*)

Abstract: The 21st century is a great development period of China's oil and gas exploration and development of marine carbonate rocks. For the moment, the majority of China's marine carbonate oil and gas fields are buried below 4000 m depth in the Paleozoic sequence. How to look for favorable reservoirs in deep carbonate rocks has become the focus of attention of petroleum geologists. The Puguang gas field discovered recently is a gas accumulation with the best developed secondary pores among carbonate reservoirs discovered in China at present and is strictly controlled by the distribution of sedimentary facies, dolomitization and buried dissolution. In this paper, a detailed study and anatomy of the "reservoir facies"—favorable sedimentary facies and diagenetic facies—is conducted under the guidance of the "facies control theory", which controls the formation and evolution of the reservoir of the Lower Triassic Feixianguan Formation in the Dawan – Maoba – Tieshanpo area in the surroundings of Puguang. According to the outcrop section, drilling, logging and seismic data, combined with the "single-factor analysis and multifactor comprehensive mapping method", four sedimentary units are proved to be developed in the Feixianguan Formation in the Dawan – Maoba – Tieshanpo area; they are platform slope, platform shoal, open platform and restricted platform. Based on the detailed description of cores and indoor observations and studies of large numbers of core and cutting thin sections and casting slices, the authors think that the key factors which control the reservoir formation are dolomitization, buried dissolution, and so on. According to casting slice identification, scanning electron microscopy, analysis of mercury and other means of analysis, it is found that the favorable reservoir is characterized by large sets of porous finely and very finely crystalline residual oolitic dolostone. Solution pores in rocks are very well developed, consisting dominantly of the large pore and coarse throat type, medium pores and medium throat type. The physical properties of the gas reservoir are better, marked mainly by high porosity and permeability and medium porosity and permeability. The correlation of porosity and permeability is obvious. The role of "facies control" is pronounced in this reservoir. Vertically, the reservoir is mainly distributed from the Second Member to the top of the First Member of the Early Triassic Feixianguan Formation. Laterally, the favorable area for reservoir distribution is the platform–margin shoal. The platform–margin shoal facies zone controls the lithology and distribution of the favorable reservoir, while dolomitization and buried dissolution control the final distribution limits and performance of the favorable reservoir. Through a study of the "facies control theory" in the reservoir of the platform–margin shoal in the Dawan – Maoba – Tieshanpo area.

Key words: deep carbonates; facies control theory; reservoir facies; platform–margin shoal facies; diagenetic facies; high-quality reservoir rocks; Feixianguan Formation; Sichuan basin

About the first author: HE Ying, male, born in 1979, master and engineer; mainly engages in the integrated geological study of carbonate rocks in northeastern Sichuan; E-mail: heywz@126.com.