

川东南寒武系娄山关群白云岩成岩作用特征

江文剑¹, 侯明才^{1,2}, 邢凤存^{1,2}, 徐胜林¹, 林良彪^{1,2}

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;

2. 油气藏地质与开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059)

摘要:通过对川东南寒武系娄山关群两剖面(京竹和中坝)的白云岩及后期充填物的岩石学、碳氧同位素和阴极发光特征综合研究,系统分析了娄山关群白云岩成岩作用类型及特征,其主要的成岩作用类型包括白云岩化作用、溶蚀作用、胶结作用和硅化作用等,认为白云岩成因有4种:准同生、回流渗透、埋藏和热液白云岩化作用。并将成岩作用阶段划分为准同生、早成岩、晚成岩和表生成岩等4个阶段。同时,分析了成岩演化的影响因素及其对孔隙发育的影响,其成岩演化主要受到沉积环境、沉积物原始结构特征和沉积旋回等因素的影响。形成于潮坪潟湖环境的泥微晶白云岩,原始孔隙不发育,受后期成岩流体改造较弱,孔隙不发育;形成于滩相环境的颗粒白云岩和晶粒白云岩,原始孔隙较发育,后期成岩流体改造较强,孔隙发育,可以作为良好的油气储集层。

关键词:成岩作用;白云岩;娄山关群;寒武系;川东南地区

中图分类号: TE122.2⁺3

文献标识码: A

Diagenetic characteristics of dolomites in the Cambrian Loushanguan Group in southeastern Sichuan Basin

Jiang Wenjian¹, Hou Mingcai^{1,2}, Xing Fengcun^{1,2}, Xu Shenglin¹, Ling Liangbiao^{1,2}

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Based on the comprehensive studies of petrology, carbon and oxygen isotopes, and cathodoluminescence characteristics, it has been shown that dolomites from the Jingzhu and Zhongba outcrop sections of the Cambrian Loushanguan Group have experienced multiple diagenetic effects such as dolomitization, dissolution, cementation and silicification. There are four types of dolomite: penecontemporaneous, seepage refluxing, buried, and hydrothermal. Four diagenetic stages were divided into penecontemporaneous, early, late and epidiagenetic. The influencing factors of diagenetic evolution and pore development were analyzed. Diagenetic evolution was mainly affected by the sedimentary environment, the original structure of sediments and sedimentary cycles. Micrite dolomites formed in tidal flat and lagoon environments have a poor original porosity, and the late diagenetic fluid alteration was weak. Grain dolomites and crystalline dolomites formed in a beach environment have lots of primary pores, and their porosity was further improved by late diagenetic fluid alteration. As a result, they are more favorable reservoirs for oil and gas.

Keywords: diagenetic effect; dolomite; Loushanguan Group; Cambrian; southeastern Sichuan Basin

众所周知,白云岩可以形成良好油气储集层,尤其是在深层古老碳酸盐岩储层中占有重要地位。据前人统计,在埋深超过4 500 m或者时代早于志留纪的46个碳酸盐岩油气田中,除了4个是以灰岩为储集层外,其余全部为白云岩储集层^[1-4]。而白云岩储层中大部分孔隙是后期成岩作用过程形成的次生孔隙,成岩作用对孔隙演化起

着很重要的控制作用^[5-10]。四川盆地东南地区下古生界寒武系娄山关群发育厚层白云岩,具有良好油气勘探前景^[11-15],但是前人对该区影响储层孔隙发育的成岩作用研究较少。本文通过对川东南地区京竹和中坝两剖面寒武系娄山关群白云岩成岩作用的研究,以期为该区寻找有利油气储集层提供依据。

收稿日期: 2015-07-01; 修订日期: 2016-04-08。

作者简介: 江文剑(1984—),男,在读博士研究生,从事储层沉积学方面研究。E-mail: jiangwj2014@qq.com。

通信作者: 侯明才(1968—),男,教授,博士生导师,从事大地构造沉积学和层序岩相古地理学的教学和科研工作。E-mail: houmc@cdut.edu.cn。

基金项目: 中国地质调查局项目(212011220758)和中央财政支持地方高校发展专项资金项目(11000-13z00701)资助。

1 地质背景

研究区位于四川盆地东南部(图 1),构造上包括川东高陡构造带和川南低陡构造带。娄山关群属于寒武系第三统上部—芙蓉统,底界和顶界分别与寒武系第三统高台组和奥陶系桐梓组呈整合接触。该区主要发育一套厚层白云岩,夹少量灰岩,整体呈现“西北薄、东南厚”的特点,总厚度在 343~900 m 之间,前人研究成果表明,其沉积环境总体上为碳酸盐岩局限台地^[16-17]。

2 岩石类型和充填物特征

川东南地区中坝和京竹露头剖面寒武系娄山关群主要发育白云岩,同时还有少量灰岩及其过渡岩石类型。综合野外剖面宏观和镜下微观特征,根据岩石结构—成因特征,将白云岩主要分为 3 种类型,即:泥微晶白云岩(图 2e)、颗粒白云岩(图 2c)和晶粒白云岩(图 2g)等;少量灰岩则分为泥微晶灰岩(图 2f)和颗粒灰岩(图 2h)。同时,在裂缝孔隙中还发育后期充填矿物,主要为斑点状鞍形白云石(图 2a)和方解石脉/晶簇(图 2i),局部有硅质脉(图 2j,2k)。

2.1 碳酸盐岩岩石类型

(1)泥微晶灰岩(图 2f)。两剖面中发育的泥晶灰岩很少,剖面中占比小于 4%,晶体较小,岩石致密,孔隙不发育,薄片可见少量裂缝被方解石脉充填。

(2)颗粒灰岩(图 2h)。主要为保持原始结构的鲕粒灰岩,亮晶方解石胶结物发育,孔隙不发育,

部分方解石胶结物可见世代结构,第一世代呈纤维状垂直于颗粒表面排列,构成等厚环边栉壳状结构,第二世代呈粒状结构。该类岩石在剖面中岩石占比小于 6%,主要发育于水动力较强的台内滩或台地边缘浅滩环境。

(3)泥微晶白云岩。显微镜下,晶体较小,通常小于 50 μm,晶体结构和晶体形态较难识别,孔隙不发育,部分可见藻纹层结构(图 2e)。剖面中多呈灰色中薄层,可见叠层石构造(图 2d)、水平层理、窗格及鸟眼构造。这类白云岩主要发育在干旱潮坪环境中。该类岩石在剖面中岩石占比约为 27%。

(4)颗粒白云岩。保持有原始颗粒结构的鲕粒(图 2c)或砂屑白云岩。显微镜下,填隙物可为微晶基质,也可以是亮晶胶结物,亮晶胶结物晶体较粗,以粉细晶为主。鲕粒可见同心鲕和放射鲕,砂屑颗粒分选较好,呈圆状或次圆状,部分白云石重结晶明显。剖面中多呈浅灰色中厚层状,可见波状层理,中小型交错层理。在纵向剖面上,这类白云岩主要发育于向上变浅旋回顶部台内滩或台地边缘浅滩环境。该类岩石在剖面中岩石占比约为 21%。

(5)晶粒白云岩。晶体较粗,晶体大小多在细晶及以上(图 2g),晶粒结构;显微镜下晶体多呈半自形—他形,常见雾心亮边结构、环带结构和颗粒幻影结构,晶体大小较均匀,呈镶嵌式接触,孔隙主要以晶间孔、晶间溶孔为主。剖面中以浅灰色为主,呈中厚层状。该类岩石在剖面中岩石占比约为 38%。

2.2 后期充填矿物类型

(1)斑点状鞍形白云石,显微镜下此类白云石常沿缝壁产出,晶体粗大,多呈粗晶、甚至巨晶;晶

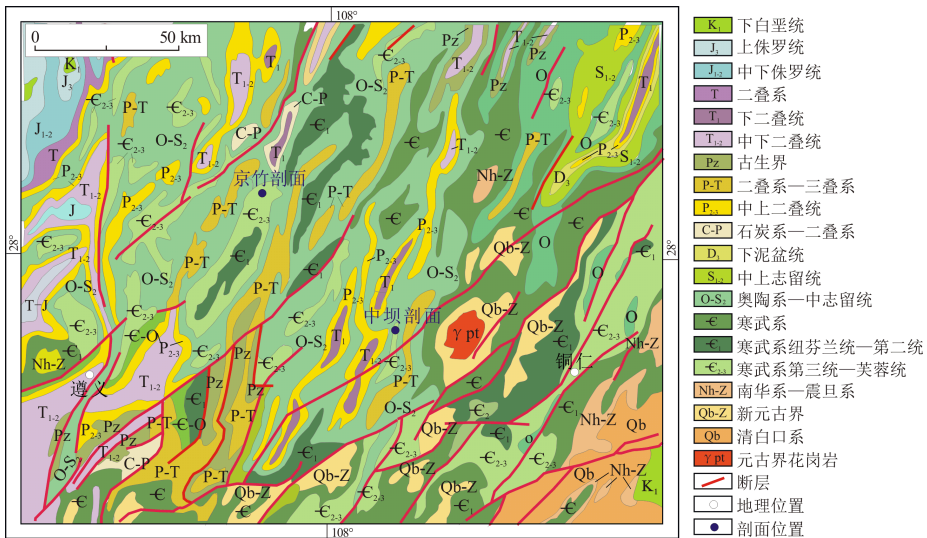


图 1 川东南地区地质图及剖面位置

Fig.1 Geological map and outcrop section locations of the southeastern Sichuan Basin

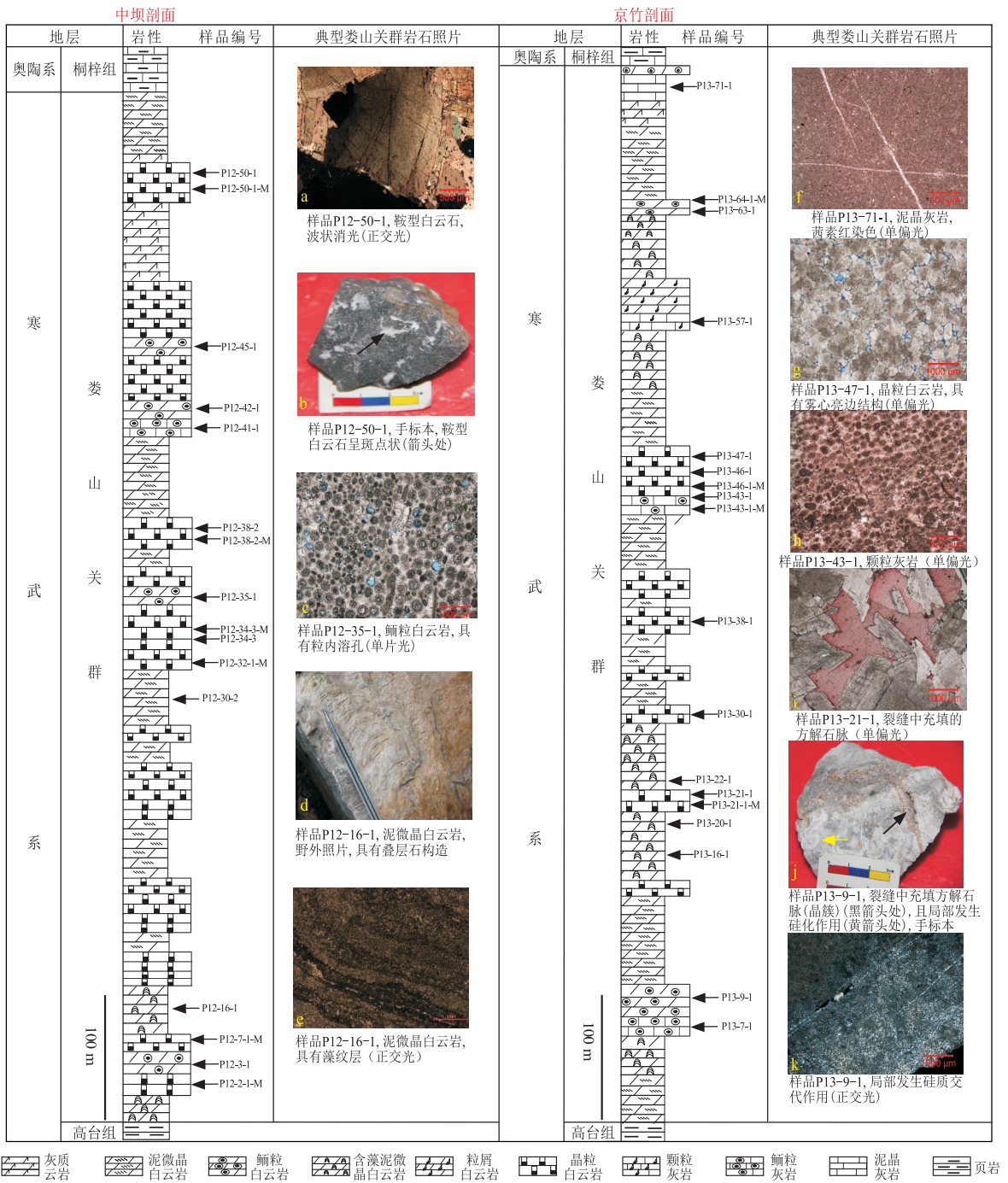


图2 川东南寒武系娄山关群剖面综合柱状图及取样位置

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Cambrian Loushanguan Group and sampling locations along two sections in the southeastern Sichuan Basin

体中微裂隙发育,晶面弯曲,呈阶梯状或镰刀状,正交光下呈波状消光(图 2a);手标本上呈白色斑点状(图 2b)。

(2)方解石脉/晶簇,在裂缝中呈脉状充填,在孔洞中呈方解石晶簇产出(图 2j),显微镜下,方解石呈片状(图 2i)。

3 主要成岩作用及地球化学特征

研究区白云岩经历多期次、多种类型成岩作用

改造,其主要成岩作用类型包括白云岩化作用、胶结充填作用、溶蚀作用和硅质交代作用等。

3.1 白云岩化作用

白云岩化作用是研究区最重要的成岩作用类型,可以有效地改善储层的储集性能。一方面,白云岩化作用可以增加晶体间喉道半径,使喉道边缘变得光滑而不粗糙,提高储层渗透性;另一方面,在较深埋藏条件下,白云岩比灰岩具有更好的溶解性,易溶解形成次生孔隙,提高储层的孔隙度^[18]。

本文通过对不同类型的白云岩进行碳氧同位素和阴极发光特征的研究,探讨研究区白云岩化作用发生的机理。

3.1.1 碳氧同位素及阴极发光特征

(1) 碳氧同位素特征

研究区泥微晶白云岩具有最高的氧同位素平均值(-6.701‰),碳同位素平均值为-1.619‰;颗粒白云岩氧同位素平均值为-7.498‰,碳同位素平均值为-1.229‰;晶粒白云岩氧同位素平均值为-7.728‰,碳同位素平均值为-1.428‰(表 1),3 种类型白云岩碳同位素平均值基本相近,氧同位素逐渐偏负。碳同位素相似,说明了其白云岩化流体性质具有一定相似性和继承性,而氧同位素逐渐偏负,这可能与白云岩化时埋深增加造成温度效应有关,即随着埋深增加,其温度增高,氧同位素分馏减

弱,造成 $\delta^{18}\text{O}$ 降低^[19-21]。后期充填物鞍形白云石具有最低的氧同位素平均值(-10.959‰),碳同位素平均值为-1.772‰(表 1)。

(2) 阴极发光特征

研究区白云岩阴极发光特征如图 3,作为对比,本文选取部分泥晶灰岩和颗粒灰岩也进行阴极发光测试。其中白云岩中,泥微晶白云岩具有强的阴极发光特征,呈亮红色(图 3a);具有粒屑结构的颗粒白云岩具有较强的阴极发光,强度比泥微晶白云岩略弱(图 3b);晶粒白云岩具有较弱的阴极发光强度,是白云岩中最弱的,呈暗红色(图 3c);后期充填矿物鞍形白云石具有较强的阴极发光,且呈环带结构(图 3d)。灰岩中,泥晶灰岩具有较弱的阴极发光,呈暗橙色(图 3e);颗粒灰岩具有弱的阴极发光,呈暗褐色(图 3f);过渡岩石类型,云质鲕

表 1 川东南寒武系娄山关群碳酸盐岩碳氧同位素和微量元素(Fe 和 Mn)值

Table 1 Carbon and oxygen isotopes and trace elements (Fe and Mn) in carbonate rocks from the Cambrian Loushanguan Group in the southeastern Sichuan Basin

岩石类型	样品号	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	平均值	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	平均值	Mn 含量/ 10 ⁻⁶	平均值	Fe 含量/ %	平均值
泥晶灰岩	P13-71-1	-2.677	-2.677	-10.322	-10.322	40.22	40.20	0.15	0.15
颗粒灰岩	P13-57-1	-2.192		-11.227		48.46		0.05	
颗粒灰岩	P12-41-1	-1.600	-0.981	-10.301	-10.375	36.03	43.42	0.13	0.09
颗粒灰岩	P13-43-1	-0.813		-10.145		49.20		0.08	
颗粒灰岩	P13-7-1	0.682		-9.829		39.98		0.12	
泥微晶白云岩	P12-30-2	-2.899		-7.316		49.89		0.17	
泥微晶白云岩	P13-22-1	-2.082		-6.145		74.96		0.09	
泥微晶白云岩	P13-16-1	-1.009	-1.619	-6.920	-6.701	95.86	71.30	0.33	0.17
泥微晶白云岩	P13-20-1	-1.118		-6.065		84.25		0.17	
泥微晶白云岩	P12-16-1	-0.989		-7.058		51.52		0.07	
颗粒白云岩	P13-9-1	-1.211		-7.680		100.80		0.13	
颗粒白云岩	P13-63-1	-1.275		-7.592		45.60		0.06	
颗粒白云岩	P12-3-1	-0.486	-1.229	-8.122	-7.498	95.60	75.84	0.12	0.08
颗粒白云岩	P12-35-1	-2.196		-8.140		70.69		0.10	
颗粒白云岩	P12-45-1	-0.766		-6.958		67.42		0.05	
颗粒白云岩	P12-42-1	-1.440		-6.495		74.90		0.07	
晶粒白云岩	P13-46-1	-1.071		-6.829		50.33		0.10	
晶粒白云岩	P13-47-1	-2.823		-7.341		49.59		0.06	
晶粒白云岩	P13-38-1	-0.258		-8.021		50.77		0.16	
晶粒白云岩	P13-21-1	-0.576	-1.428	-8.000	-7.728	54.28	50.76	0.11	0.10
晶粒白云岩	P13-30-1	-1.04		-7.235		49.53		0.05	
晶粒白云岩	P12-38-2	-0.844		-7.603		42.34		0.05	
晶粒白云岩	P12-50-1	-1.555		-8.726		58.13		0.13	
晶粒白云岩	P12-34-3	-3.256		-8.066		52.55		0.14	
鞍形白云石脉	P13-46-1-M	-1.431		-9.469		76.46		0.05	
鞍形白云石脉	P13-43-1-M	-1.437	-1.772	-10.232	-10.959	58.68	62.01	0.01	0.03
鞍形白云石脉	P12-38-2-M	-1.583		-12.379		57.51		0.02	
鞍形白云石脉	P12-50-1-M	-2.637		-11.756		55.39		0.05	
方解石脉	P13-21-1-M	-5.913		-14.240		50.34		0.06	
方解石脉	P13-64-1-M	-3.777		-13.235		58.12		0.02	
方解石脉	P12-2-1-M	-7.557	-6.566	-14.634	-13.602	55.45	49.57	0.19	0.07
方解石脉	P12-32-1-M	-8.100		-11.846		38.28		0.04	
方解石晶簇	P12-7-1-M	-7.486		-14.064		45.66		0.05	

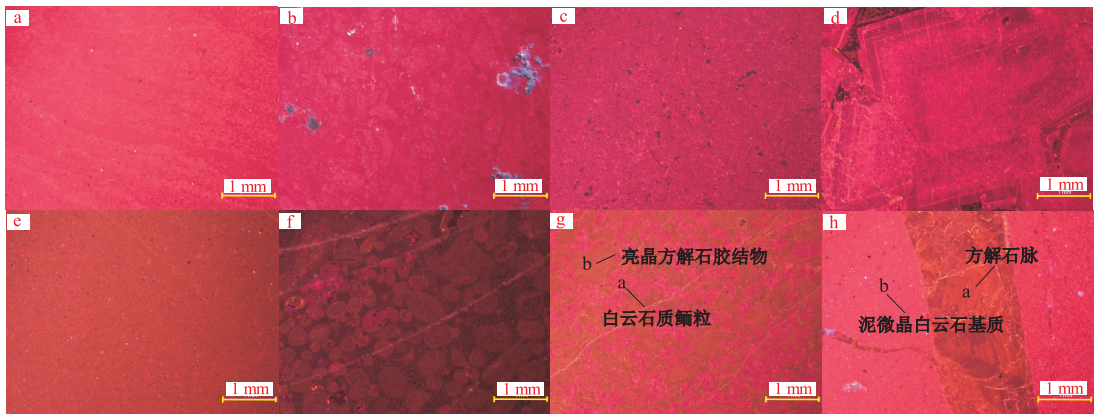


图3 川东南寒武系娄山关群碳酸盐岩及后期充填物阴极发光照片

a.含藻泥微晶白云岩(样品号 P12-16-1);b.鲕粒白云岩(样品号 P12-35-1);c.晶粒白云岩(样品号 P13-47-1);d.鞍形白云石(样品号 P12-50-1-M);e.泥晶灰岩(样品号 P13-71-1);f.颗粒灰岩(样品号 P13-43-1);g.云质颗粒灰岩(样品号 P12-41-1) h.泥微晶白云岩中方解石脉(样品号 P13-22-1)

Fig.3 Cathodoluminescence photomicrographs of carbonate rocks and fillings from the Cambrian Loushanguan Group in the southeastern Sichuan Basin

粒灰岩中,已白云岩化的鲕粒呈强的阴极发光,呈红色,与泥微晶白云岩相似,但是未白云岩化的亮晶方解石胶结物发光强度较弱,呈暗橙色,与泥晶灰岩相似(图3g)。后期充填矿物方解石脉具有较强的阴极发光,呈橙色,且具有环带结构(图3h)。前人研究表明,碳酸盐岩阴极发光强度与其铁锰含量有着密切关系(Mn作为激活剂,Fe作为猝灭剂),而锰含量则与非海相流体参与成岩作用程度有关^[22-23]。从表1中可以看出,研究区碳酸盐岩中铁含量低,大多数值小于0.3%,样品的阴极发光强度与其Mn含量有着较好的相关性(表2),Fe对其猝灭作用是有限的。

综合以上碳氧同位素、阴极发光特征和岩石学特征,根据其形成机理将研究区白云岩化作用划分为准同生白云岩化作用、回流渗透白云岩化作用、埋藏白云岩化作用、热液白云岩化作用等。

3.1.2 准同生白云岩化作用

准同生白云岩化作用主要形成泥微晶白云岩,

表2 川东南寒武系娄山关群碳酸盐岩Mn含量与阴极发光强度

Table 2 Relationship between Mn content and cathode luminescence intensity of carbonate rocks from the Cambrian Loushanguan Group in the southeastern Sichuan Basin

岩石类型	Mn 平均含量/ 10^{-6}	阴极发光强度
泥晶灰岩	40.20	较弱
颗粒灰岩	43.42	弱
方解石脉	49.57	较强
泥微晶白云岩	71.30	强
颗粒白云岩	75.84	较强
鞍形白云石	62.01	较强
晶粒白云岩	50.76	较弱

该类型白云岩中通常含有藻纹层结构,鸟眼构造,孔隙不发育,渗透性较差,岩石较致密。同时,在4类白云岩(石)中,其具有最高的氧同位素平均值(-6.701‰)(表1),符合准同生白云岩具有较高的氧同位素值特征^[16]。Fe(平均值0.17%)(表1)和Mn含量(平均值 71.3×10^{-6})相对高值,阴极发光强度强(表2),反映了受到一定非海相流体(大气淡水)影响,形成于近地表环境。岩石学特征和地球化学特征反映其形成于干旱的潮坪—潟湖环境下,由海水蒸发浓缩形成的高镁/钙比值的孔隙卤水交代泥晶灰岩形成的。

3.1.3 回流渗透白云岩化作用

回流渗透白云岩化作用主要形成颗粒白云岩。该类型白云岩通常保持原始颗粒结构,鲕粒同心纹层和胶结物仍清晰可见,表明其白云岩化作用发生在成岩早期,且受到后期成岩作用改造较弱。而残留的交代不彻底形成的云质鲕粒灰岩(图4a),表明具有更大的内表面积,鲕粒常优先被白云石化,胶结物白云石化时间较晚,但具有更高洁净度和结晶程度^[19](图4b)。同时,碳氧同位素和阴极发光特征与泥晶白云岩具有相似性和继承性,反映其白云岩化流体仍为海源性流体的卤水性质。氧同位素比泥微晶白云岩略低,反映其白云岩化时形成温度略高,有一定埋深。综合判断该类型白云岩为回流渗透白云岩化作用形成的。

3.1.4 埋藏白云岩化作用

埋藏白云岩化作用主要形成晶粒白云岩。此类白云岩中部分白云岩化程度较低的仍具有残余颗粒幻影结构,表明其是在颗粒白云岩的基础上,

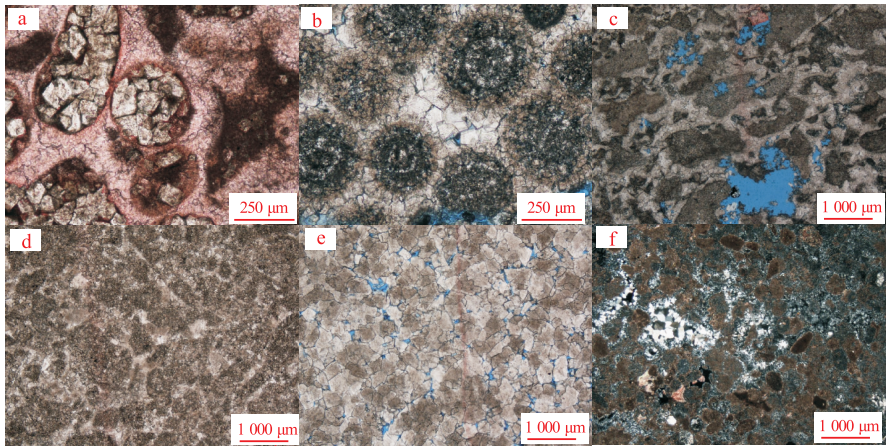


图 4 川东南寒武系娄山关群不同成岩作用特征典型显微照片

a. 云质鲕粒灰岩, 鲕粒优先被白云岩化, 样品号 P12-41-1; b. 鲕粒白云岩, 胶结物白云石晶体比鲕粒大, 样品号 P12-35-1; c. 残余鲕粒晶粒白云岩, 颗粒边界可见, 可见非选择性溶蚀作用形成超大溶孔, 样品号 P13-38-1; d. 晶粒白云岩, 具有颗粒幻影结构, 样品号 P12-38-2; e. 中晶白云岩, 具有雾心亮边, 晶间孔发育, 样品号 P13-47-1; f. 硅质鲕粒白云岩, 细微晶石英充填粒间孔隙, 样品号 P13-9-1

Fig.4 Typical photomicrographs of different diagenetic effects in the Cambrian Loushanguan Group in the southeastern Sichuan Basin

经过重结晶作用形成的。根据鲕粒结构被改造的程度, 从弱到强进一步分为 3 种类型。一种是鲕粒内部结构和等厚环边胶结结构已遭受破坏, 但颗粒边缘可见; 大多数鲕粒为粉晶白云石, 但晶体仍小于胶结物(图 4c)。第二种类型是鲕粒边界已经基本消失, 但仍可见颗粒幻影结构, 晶体大小变得较均一, 多数为粉细晶(图 4d)。第三种类型是颗粒结构已基本消失, 岩石类型主要为细中晶白云岩, 晶体大小较均一, 呈半自形—他形, 普遍具有雾心亮边结构; 晶体之间多呈镶嵌状接触, 晶间孔及晶间溶孔较发育, 部分晶体晶面弯曲, 显示其在较高温度下形成的(图 4e)。碳氧同位素显示其成岩流体性质仍与泥微晶白云岩和颗粒白云岩具有相似性和继承性, 仍为海源性流体。同时, 氧同位素值较低(平均值 $-7.728‰$), 表明其形成的温度较高, 埋藏深度较深。Mn 含量减少(平均值 50.76×10^{-6}) 和阴极发光较弱(表 2), 反映其成岩系统具有一定的封闭性。综合判断该类型白云岩为较深埋藏的、具有封闭环境下的埋藏白云岩化作用形成的。

3.1.5 热液白云岩化作用

热液白云岩化作用主要形成鞍形白云石。此类白云石主要沿裂缝或较大孔隙产出, 晶体粗, 呈阶梯状或镰刀状, 具有波状消光特征(图 2a), 在其周围还发现重晶石、石英等热液型矿物组合。在 4 种类型白云岩(石)中, 其具有最低 $\delta^{18}O$ 值, 表明形成温度较高(碳同位素与其他 3 类白云岩相近, 排除了大气淡水造成的原因)。同时, 具有较强的阴极发光和较高 Mn 含量, 这主要是由于外来热液流体带入 Mn 离子, 造成其 Mn 含量有所增加, 而环带

结构主要是由于其结晶速度不均一造成, 当结晶速度较快时, Mn 离子进入白云石晶体就少, 阴极发光就弱^[24]。综合判断其为热液白云岩化作用形成的, 即后期热液沿裂缝进入到白云岩地层中, 对原先形成的白云石进行溶蚀改造, 随后沉淀形成鞍形白云石。

3.2 胶结及充填作用

研究区中胶结充填作用可划分为等厚环边胶结作用和方解石脉充填作用 2 种类型。等厚环边胶结物主要形成于成岩作用早期海水潜流带环境中, 在颗粒碳酸盐岩的粒间孔隙中形成一系列胶结物, 常具有世代现象。第一世代常形成等厚环边栉壳状胶结物, 第二世代形成于孔隙中间, 呈片状粒状胶结物, 后期大多数被白云石化(图 4b)。方解石脉充填于裂缝或晶洞中, 在显微结构中, 呈片状充填在孔隙中(图 2i), 严重堵塞孔隙, 对储层发育造成不利影响。与灰岩相比(表 1), 方解石脉的碳氧同位素均明显负偏($\delta^{13}C_{\text{均值}}$ 为 $-6.566‰$, $\delta^{18}O_{\text{均值}}$ 为 $-13.602‰$), 表明成岩流体性质发生明显改变; Mn 含量有所增加(平均值 49.57×10^{-6}), 阴极发光强度变强(表 2), 反映其成岩系统具有一定开放性, 综合判断其形成于开放大气淡水环境中。

3.3 溶蚀作用

溶蚀作用是改善储层最有利的成岩作用。通过详细铸体薄片观察, 在研究区主要发育选择性和非选择性 2 期溶蚀作用。选择性溶蚀作用发生在成岩作用早期, 溶蚀作用具有组构选择性, 鲕粒核心常首先被溶蚀, 形成铸模孔或粒内孔(图 2c)。非选择性溶蚀作用常发生在成岩作用晚期, 溶蚀作

用不具有组构选择性,常形成超大孔隙(图4c)。

3.4 硅质交代作用

研究区可见硅质交代作用。从镜下岩石薄片中可以观察到(图4f),在硅质残余鲕粒白云岩中,硅化作用常沿着孔渗性较好的地方发育,反映其外来流体侵入特征。其形成微细石英晶体常充填孔隙和裂缝,对储层发育造成不利影响。

除上述成岩作用类型以外,研究区白云岩还经历压实压溶、重结晶、泥晶化、构造破裂等成岩作用。

4 成岩演化阶段及序列

4.1 成岩演化阶段特征

根据岩石结构特征,特别是原始鲕粒结构在白云岩化过程中遭受破坏程度^[25],形成一系列原始结构保存程度不同的鲕粒白云岩和晶粒白云岩,同时结合地球化学特征和孔隙充填物特征,将川东南寒武系娄山关群白云岩成岩作用划分为准同生成岩阶段、早成岩阶段、晚成岩阶段和表生成岩阶段。

4.1.1 准同生成岩阶段

准同生阶段主要发生准同生白云岩化作用,以形成泥微晶白云岩、具有藻纹层结构、可见鸟眼构造为主要特征,发育于强烈蒸发作用的萨勃哈环境。

4.1.2 早成岩阶段

早成岩阶段主要发生回流渗透白云岩化作用和选择性溶蚀作用,以形成仍保持原始颗粒结构和

等厚环边胶结结构的颗粒白云岩为主要特征。白云岩化作用具有选择性,鲕粒常优先被白云石化,胶结物白云石化时间稍晚,局部残余云质鲕粒灰岩中仍保持等厚环边的方解石胶结物。同时常发生选择性溶解作用,鲕粒优先被溶蚀,以形成铸模孔、粒内溶孔等为主要特征。

4.1.3 晚成岩阶段

晚成岩阶段主要发生埋藏白云石化、热液白云岩化、非选择性溶蚀和硅质交代等作用,以形成原始结构被破坏的细—中晶白云岩为主要特征,白云石常具有“雾心亮边”结构。非选择性溶蚀作用常形成超大孔隙。同时,由于后期热液流体侵入,沿着裂缝和较大孔隙,形成晶体粗大的鞍形白云石,局部发生硅质交代作用,形成石英充填物。

4.1.4 表生成岩阶段

表生成岩阶段以方解石脉充填作用为主要特征。由于受构造作用、地层抬升、岩石重返地表、遭受大气淡水淋滤作用,大气淡水成因的方解石脉充填于孔隙裂缝中。

各成岩阶段综合特征见表3。

4.2 成岩演化序列及影响因素

形成于干旱的潮坪—潟湖环境下的泥晶灰岩,处于向上变浅的沉积旋回顶部,在准同生期即发生白云岩化作用,形成泥微晶白云岩。随后由于上覆沉积物覆盖而进入埋藏环境,随着埋藏深度增加,

表3 川东南寒武系娄山关群白云岩化产物及后期充填物特征综合对比
Table 3 Characteristics of different dolomitic products and late fillings in the Cambrian Loushanguan Group in the southeastern Sichuan Basin

成岩演化阶段	形成主要岩石类型	显微特征	地球化学及阴极发光	成岩环境	成岩流体性质
准同生成岩阶段	泥微晶白云岩	晶体较小,多为粉晶以下,部分含有藻纹层	氧同位素值最高,Fe、Mn含量较高,阴极发光强	局限的近地表环境,常温	蒸发浓缩海水形成的高盐度卤水
早成岩阶段	云质颗粒灰岩	鲕粒选择性白云石化,胶结物仍为带壳状等厚环边方解石胶结物	阴极发光测试中,白云石化鲕粒发光强,胶结物发光弱	浅埋藏封闭环境,温度较低	海源性地层水
	颗粒白云岩	颗粒和胶结物均为完全白云石化,颗粒结构明显	碳氧同位素值和Fe、Mn含量与泥微晶白云岩相近,阴极发光较强		
晚成岩阶段	晶粒白云岩	仅颗粒边界明显可见,内部结构消失;呈幻影结构,颗粒边界消失;原岩结构消失,晶体大小较均一,晶体较粗	具有较低氧同位素值,Fe、Mn含量也较低,阴极发光较弱	中深埋藏封闭环境,温度较高	海源性地层水
	鞍形白云石	晶体粗,波状消光,晶面弯曲,呈阶梯状或镰刀状	具有最低的氧同位素值,Fe、Mn含量中等,阴极发光较强	中深埋藏环境,温度高	热液
表生成岩阶段	方解石脉	方解石脉充填裂缝或方解石晶簇在晶洞中沉淀	碳氧同位素值均明显负偏,Fe、Mn含量较高,阴极发光较强	地表环境,常温	大气淡水

温度和压力增大,会导致部分泥微晶白云岩发生重结晶作用,形成微粉晶白云岩,但由于其岩石致密,孔隙不发育,导致后期成岩流体难以进入而发生明显的成岩改造作用,故其成岩结构较单一。

形成于台内洼地的泥微晶灰岩,未经历海水蒸发浓缩形成的卤水环境,直接进入埋藏,孔隙不发育,后期发生的成岩蚀变较弱,岩石较好保持了原始沉积时一些地球化学特征。

形成于台内浅滩环境的颗粒灰岩,处于高频沉积旋回上部的岩石,由于处于近地表环境下,易暴露,遭受大气淡水影响,发生大气淡水选择性溶蚀作用,高镁方解石和文石矿物新生变形作用和粒状淡水方解石胶结作用,然后再进入埋藏成岩环境中,在浅埋藏的早成岩阶段,部分颗粒灰岩遭受上覆的蒸发海水形成的高 Mg/Ca 卤水的影响,发生回流渗透白云岩化作用。在深埋藏晚成岩阶段,发生白云石重结晶作用形成晶粒白云岩。而研究区中的颗粒灰岩往往处于沉积旋回的中下部,未暴露水面而免于遭受大气淡水的影响,直接进入埋藏环境。而且这类颗粒灰岩常常胶结物发育(其主要形成于靠海一侧边缘的滩相环境,水动力强,胶结作用强烈),孔隙不发育,后期成岩作用改造弱,原始颗粒结构保持较好,这也是其地球化学性质保持了原始海相沉积时特征的原因。

同时,研究区中断层附近的碳酸盐岩成岩作用晚期,遭受了热液的侵蚀和改造作用,并形成鞍形白云石充填孔隙,局部还发生硅化作用。到了表生成岩作用阶段,碳酸盐岩普遍遭受大气淡水的淋滤改造作用,在形成非选择性溶蚀孔隙裂缝的同时,伴随着淡水方解石脉(晶簇)充填作用,使得岩石形成各类次生孔隙大大减少。

5 结论

(1)川东南寒武系娄山关群白云岩经历多种类型的成岩作用,主要为白云岩化作用、胶结作用、溶蚀作用、硅质交代作用等,其中按照白云岩形成机理,划分为准同生、回流渗透、埋藏及热液白云岩化作用。

(2)根据岩石结构和地球化学特征,研究区白云岩成岩作用阶段可划分为准同生成岩阶段、早成岩阶段、晚成岩阶段和表生成岩阶段。

(3)不同类型的白云岩具有不同成岩演化序列。其中泥微晶白云岩成岩演化序列较简单,孔隙不发育;颗粒白云岩和晶粒白云岩成岩演化序列复杂,孔隙较发育,可以作为良好油气储集层。

参考文献:

- [1] Sun S Q. Dolomite reservoirs: Porosity evolution and reservoir characteristics [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186-204.
- [2] 马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制[J]. 中国科学(D辑 地球科学), 2007, 37(增刊III): 43-52.
Ma Yongsheng, Guo Tonglou, Zhao Xuefeng, et al. The formation mechanism of high-quality dolomite reservoir in the deep of Puguang Gas Field [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2008, 51(S1): 53-64.
- [3] 郑剑锋, 沈安江, 乔占峰, 等. 柯坪—巴楚露头区蓬莱坝组白云岩特征及孔隙成因[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 664-673.
Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, et al. Characteristics and pore genesis of dolomite in the Penglaiba Formation in Keping-Bachu outcrop area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 664-673.
- [4] 张静, 胡见义, 罗平, 等. 深埋优质白云岩储集层发育的主控因素与勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 203-210.
Zhang Jing, Hu Jianyi, Luo Ping, et al. Master control factors of deep high-quality dolomite reservoirs and the exploration significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 203-210.
- [5] 杜叶龙, 李双应, 王冰, 等. 安徽无为—巢湖地区中下二叠统碳酸盐岩成岩作用[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 543-556.
Du Yelong, Li Shuangying, Wang Bing, et al. Diagenesis of the Lower-Middle Permian carbonate in the Wuwei-Chaohui area, Anhui Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 543-556.
- [6] 陈强路, 钱一雄, 马红强, 等. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 729-735.
Chen Qianglu, Qian Yixiong, Ma Hongqing, et al. Diagenesis and porosity evolution of the Ordovician carbonate rocks in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(6): 729-735.
- [7] 蒋小琼, 管宏林, 郑和荣, 等. 四川盆地普光气田飞仙关组白云岩储层成因探讨[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3): 332-336.
Jiang Xiaoqiong, Guan Honglin, Zheng Herong, et al. Discussion on origin of dolomite reservoirs in Feixianguan Formation, Puguang Gas Field, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3): 332-336.
- [8] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统中—粗晶白云岩成因[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 503-510.
Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Genesis of medium-macro-crystalline dolomite in the Middle Permian of Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 503-510.
- [9] 费剑炜, 杨红彩, 周芳芳, 等. 塔里木盆地雅克拉断凸及周缘前中生界白云岩储层成因与勘探潜力[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 286-292.
Fei Jianwei, Yang Hongcai, Zhou Fangfang, et al. Genetic types and exploration potential of pre-Mesozoic dolomite reservoirs in Yakela fault arch and its surrounding areas, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(3): 286-292.
- [10] 黄擎宇, 张哨楠, 叶宁, 等. 玉北地区下奥陶统白云岩岩石

- 学、地球化学特征及成因[J].石油与天然气地质,2014,35(3):391-400.
- Huang Qingyu,Zhang Shaonan,Ye Ning,et al.Petrologic,geochemical characteristics and origin of the Lower Ordovician dolomite in Yubei area[J].Oil & Gas Geology,2014,35(3):391-400.
- [11] 袁玉松,孙冬胜,周雁,等.四川盆地川东南地区“源—盖”匹配关系研究[J].地质论评,2010,56(6):831-837.
- Yuan Yusong,Sun Dongsheng,Zhou Yan,et al.Relationship between hydrocarbon generation history of source rocks and sealing history of mudstone cap-rocks in the southeast Sichuan Basin[J].Geological Review,2010,56(6):831-837.
- [12] 彭勇民,高波,张荣强,等.四川盆地南缘寒武系膏溶角砾岩的识别标志及勘探意义[J].石油实验地质,2011,33(1):22-28.
- Peng Yongmin,Gao Bo,Zhang Rongqiang,et al.Distinguishing indicators and prospect significance of Cambrian dissolved gypseous breccias in southern Sichuan Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2011,33(1):22-28.
- [13] 徐美娥,张荣强,彭勇民,等.四川盆地东南部中、下寒武统膏岩盖层分布特征及封盖有效性[J].石油与天然气地质,2013,34(3):301-307.
- Xu Mei'e,Zhang Rongqiang,Peng Yongmin,et al.Distribution and sealing effectiveness of Middle-Lower Cambrian evaporite cap rocks in the southeastern Sichuan Basin[J].Oil & Gas Geology,2013,34(3):301-307.
- [14] 金民东,曾伟,谭秀成,等.四川磨溪—高石梯地区龙王庙组滩控岩溶型储集层特征及控制因素[J].石油勘探与开发,2014,41(6):650-661.
- Jin Mindong,Zeng Wei,Tan Xiucheng,et al.Characteristics and controlling factors of beach-controlled karst reservoirs in Cambrian Longwangmiao Formation, Moxi-Gaoshiti area, Sichuan Basin, NW China[J].Petroleum Exploration and Development,2014,41(6):650-661.
- [15] 蒋小琼,管宏林,刘光祥,等.四川盆地南川地区娄山关群碳酸盐岩成岩作用研究[J].石油实验地质,2015,37(3):314-319.
- Jiang Xiaoqiong,Guan Honglin,Liu Guangxiang,et al.Diagenesis of Middle and Upper Cambrian Loushanguan Group reservoirs in Nanchuan area, Sichuan Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(3):314-319.
- [16] 张满郎,谢增业,李熙喆,等.四川盆地寒武纪岩相古地理特征[J].沉积学报,2010,28(1):128-140.
- Zhang Manlang,Xie Zengye,Li Xizhe,et al.Characteristics of lithofacies paleogeography of Cambrian in Sichuan Basin[J].Acta Sedimentologica Sinica,2010,28(1):128-140.
- [17] 刘建锋,彭军,魏志红,等.川东南清虚洞组沉积特征及其对储层的控制[J].地学前缘,2012,19(4):239-246.
- Liu Jianfeng,Peng Jun,Wei Zhihong,et al.Sedimentary features of Qingxudong Formation in southeast Sichuan and their control on reservoirs[J].Earth Science Frontiers,2012,19(4):239-246.
- [18] 朱筱敏.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,2008:204-205.
- Zhu Xiaoming.Sedimentary petrology[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2008:204-205.
- [19] Loyd S J,Corsetti F.The origin of the millimeter-scale lamination in the Neoproterozoic lower beck spring dolomite: Implications for widespread, fine-scale, layep-parallel diagenesis Precambrian carbonates[J].Journal of Sedimentary Research,2010,80(7):678-687.
- [20] 郑荣才,党录瑞,郑超,等.川东—渝北黄龙组碳酸盐岩储层的成岩系统[J].石油学报,2010,31(2):237-245.
- Zheng Rongcai,Dang Lurui,Zheng Chao,et al.Diagenetic system of carbonate reservoir in Huanglong Formation from East Sichuan to North Chongqing area[J].Acta Petrolei Sinica,2010,31(2):237-245.
- [21] 郑荣才,刘合年,吴蕾,等.阿姆河盆地卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩储层地球化学特征和成岩流体分析[J].岩石学报,2012,28(3):961-970.
- Zheng Rongcai,Liu Henian,Wu Lei,et al.Geochemical characteristics and diagenetic fluid of the Callovian-Oxfordian carbonate reservoirs in Amu Darya Basin[J].Acta Petrologica Sinica,2012,28(3):961-970.
- [22] Pierson B J.The control of cathodoluminescence in dolomite by iron and manganese[J].Sedimentology,1981,28(5):601-610.
- [23] 黄思静,卿海若,胡作维,等.川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J].地球科学,2008,33(1):26-35.
- Huang Sijing,Qing Hairuo,Hu Zuwei,et al.Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianguan Formation of Triassic,Eastern Sichuan Basin of China[J].Earth Science,2008,33(1):26-35.
- [24] 黄思静,李小宁,兰叶芳,等.海水胶结作用对碳酸盐岩石组构的影响:以四川盆地东北部三叠系飞仙关组为例[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(12):5007-5019.
- Huang Sijing,Li Xiaoning,Lan Yefang,et al.Influences of marine cementation on carbonate textures: A case of Feixianguan carbonates of Triassic, NE Sichuan Basin[J].Journal of Central South University: Science and Technology,2013,44(12):5007-5019.
- [25] 郑荣才,耿威,郑超,等.川东北地区飞仙关组优质白云岩储层的成因[J].石油学报,2008,29(6):815-822.
- Zheng Rongcai,Geng Wei,Zheng Chao,et al.Genesis of dolostone reservoir of Feixianguan Formation in Lower Triassic of northeast Sichuan Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2008,29(6):815-822.

(编辑 徐文明)