

Genetic Mechanism and Main Control Factors of Carboniferous Carbonate Reservoirs in Eastern Sichuan Basin

Yuqi Zhang¹, Mengmeng Guo¹, Zhipeng Zhang¹, Zhe Zhao¹, Dongxi Liu², Yisha Liao², Zhonggui Hu^{1*}

¹School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan

²Petrochina Southwest Oil & Gasfield Company, Chongqing

Email: xgz1978127@tom.com

Received: Jun. 1st, 2014; revised: Jun. 29th, 2014; accepted: Jul. 10th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

The production of oil and gas generated from the carbonatite reservoirs makes up 60 percent of the total oil and gas production in the world. But the exploration degree of the carbonatite reservoir is relatively lower compared with that of the conventional sandstone reservoirs in China. So the research for the carbonatite reservoir rocks has a great significance. In this paper, the formation mechanism and the main control factors for the formation mechanism of the Carboniferous carbonate reservoir rocks in eastern Sichuan area have been studied. The research on the formation mechanism of the carbonatite reservoirs will be of benefit to the evaluation and prediction of the carbonatite reservoirs, and also will provide an important geological basis for the exploration of oil and gas in the study area. Based on the research of predecessors' research findings, we focused on the description of the main control factors, including sedimentary facies and lithology, dolomitization and palaeo-karstification. In addition, we also analyzed the dynamic for the influence of various diagenetic stages and main control factors on the formation mechanism of the Carboniferous carbonate reservoir rocks in eastern Sichuan area.

Keywords

Carbonate Reservoirs, Main Control Factors, Eastern Sichuan Area, Carboniferous, Huanglong Formation

*通讯作者。

川东地区石炭系碳酸盐岩储层成因机理及主控因素研究

张雨琦¹, 郭萌萌¹, 张志鹏¹, 赵 喆¹, 刘冬奎², 廖义沙², 胡忠贵^{1*}

¹长江大学地球科学学院, 武汉

²中国石油西南油气田公司, 重庆

Email: xgz1978127@tom.com

收稿日期: 2014年6月1日; 修回日期: 2014年6月29日; 录用日期: 2014年7月10日

摘 要

世界上碳酸盐岩储层的油气产量约占世界油气总产量的60%, 但是在我国, 与常规的砂岩油气藏相比, 碳酸盐岩油气藏勘探开发程度较低, 所以研究碳酸盐岩储层具有重大的实际意义。本文通过对川东地区石炭系碳酸盐岩储层成因机理及主控因素的研究, 深刻地剖析其储层形成机理, 有利于该区碳酸盐岩储层的评价与预测, 为油气开采提供了重要的地质依据。在总结前人研究成果的基础上, 重点从影响储层形成的主控因素——沉积相与岩性对储层发育的控制, 白云岩化的作用和古岩溶作用对储层发育的控制进行了描述, 以及对各个成岩阶段, 不同主控因素对储层形成的机理进行了动态分析。

关键词

碳酸盐岩储层, 主控因素, 川东地区, 石炭系, 黄龙组

1. 引言

川东地区发育的碳酸盐岩储层影响因素多, 勘探难度大。在我国, 碳酸盐岩油气藏勘探开发程度较低, 所以, 研究碳酸盐岩储层具有重大的实际意义。前人对该地区储层的岩石学特征、沉积环境、储层的测井响应特征、层序地层学等方面都做了详细的研究, 而对碳酸盐岩储层形成机理等方面的研究相对较少。因此, 本文在人的研究基础之上, 从沉积相和岩性, 白云岩化及古岩溶作用三个方面系统论述了碳酸盐岩储层的形成机理和主控因素并剖析了不同时期对储层的影响。

2. 区域地质背景

川东地区构造上隶属川东陡弧形褶皱带, 西起华蓥山, 东至七曜山, 南达南川 - 开隆一线, 北东以万源断裂带与大巴山相接, 面积约 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 该地区钻遇石炭系地层的钻井达 200 余口, 大部分钻井钻获工业油气流或具有良好的油气显示, 为四川盆地最重要的天然气生产基地之一(图 1)。

该区石炭系地层由于受海西早期强烈构造隆升和侵蚀作用影响, 仅残存不完整的上石炭统黄龙组, 厚度为 13~69.6 m。该地层不整合超覆在中志留统韩家店组半深海 - 陆棚相的大套暗色泥页岩之上, 其顶被下二叠统梁山组海岸平原相的煤系地层不整合超覆, 黄龙组地层上部为灰岩, 底部为去云(膏)化灰岩夹石膏, 中部为白云岩, 是石炭系的产层段。

按岩性、岩相和沉积演化特征, 黄龙组自下而上可划分为相当三个岩性段: 一段, 泥 - 粉晶结构的

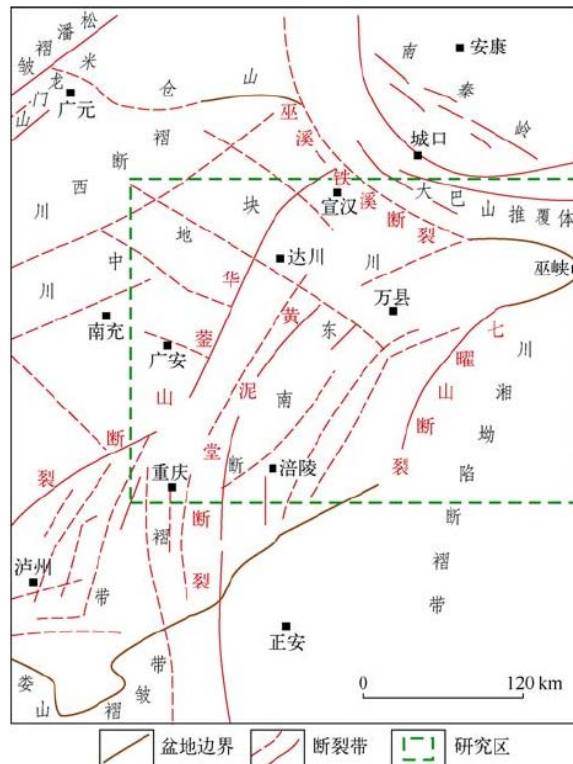


Figure 1. Map of study area
图 1. 研究区简况图

白云岩，角砾状灰岩，去膏化去云化次生灰岩，属萨勃哈沉积，层厚 0~20 m；二段，以角砾状白云岩为主，偶见鲕状白云岩，晶粒灰岩，生物碎屑灰岩，生物碎屑角砾灰岩等，属于局限-开阔海湾沉积，残厚 0~50.5 m；三段，相当高位体系域，为亮晶粒屑灰岩、微晶粒屑灰岩与粒屑微晶灰岩和泥-微晶灰岩互层组合，属于开阔海湾浅水-深水陆棚沉积，残厚 0~40 m。

3. 川东地区石炭系沉积背景

3.1. 层序地层特征

1) I 型层序界面

包括研究区在内的整个四川盆地东部地区黄龙组顶底的两个构造不整合面为 I 型层序。石炭系早期，川东地区由于受加里东构造运动的影响，地层的抬升速率大于海平面的上升速率；晚石炭世由于云南构造运动及沉积速率等的影响导致相对海平面下降，因此黄龙组顶、底界面为 I 类层序界面(图 2)[1] [2]。

2) 最大海泛面

海进达到最大限度时期所形成的等时性界面，为海进体系域的顶界面。被动大陆边缘和克拉通盆地的沉降速率一般为 1~25 cm/ka[3]，晚古生代川东地区属于扬子板块东缘的川鄂内部克拉通盆地，沉积速率略大于平均沉降速率，所以不发育海平面达到最高时与欠补偿沉积有关的凝缩段，最大海泛面在工区内主要发育在黄龙组三段底部。

3) 低水位体系域(LST)

晚石炭世早期川东地区与鄂西海槽相同，海水由东向西侵入，由于古隆起的影响海平面有小幅上升，同时古隆起的存在使海水蒸发量大于补给量，使得川东地区主要为蒸发台地为主，由硬石膏岩间夹薄

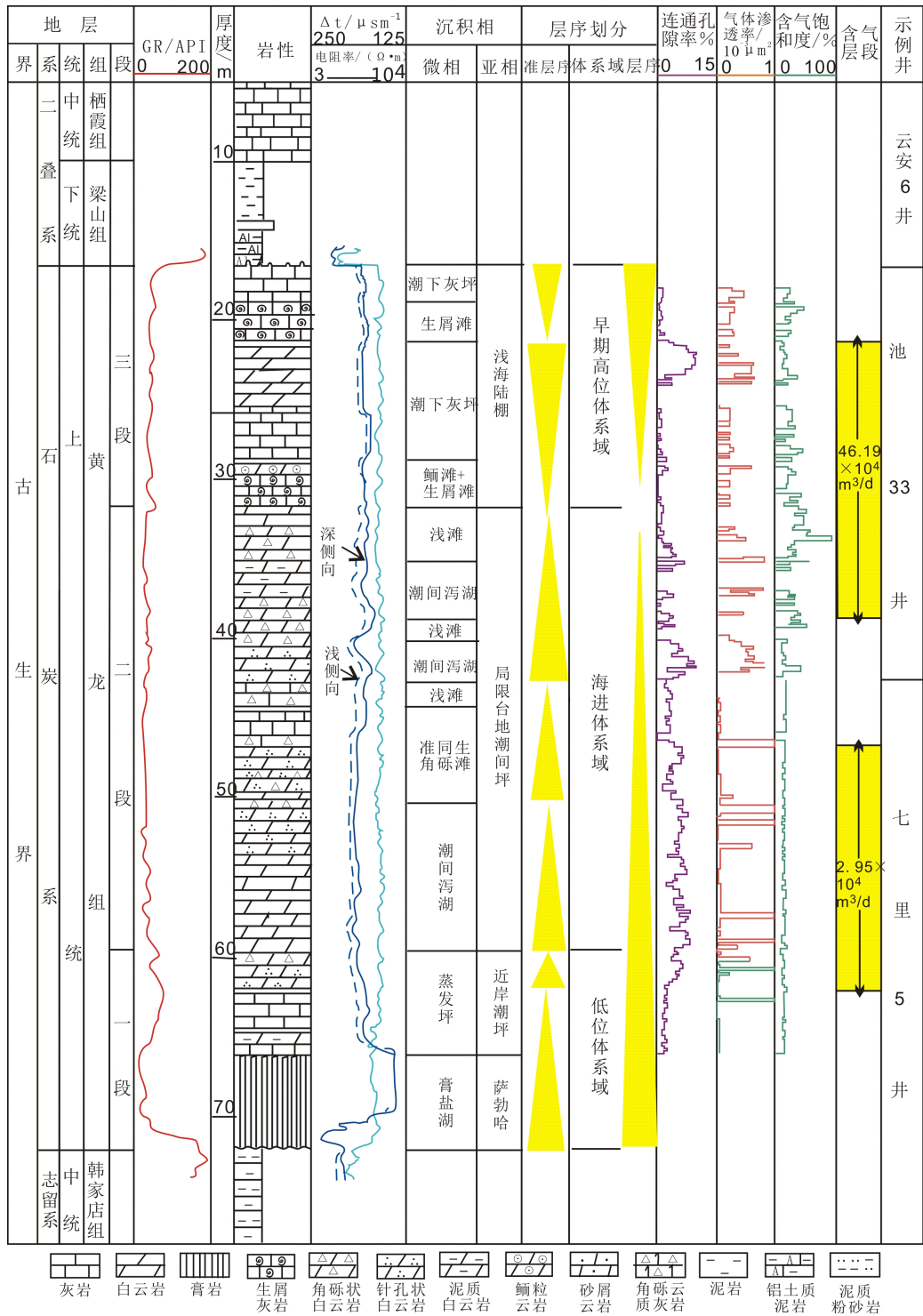


Figure 2. Comprehensive column of carboniferous division of sequence and reservoir characters
图 2. 石炭系层序划分与储集层特征综合柱状图

层膏云岩、云膏岩。

4) 海进体系域

初始海泛面与最大海泛面之间的向陆地方向退积型层序组合。川东黄龙组中期海平面重新开始较大

幅度上升,海进由东向西逐渐扩大,将古隆起大部分淹没。沉积环境主要为局限台地环境,残留的古隆起和古隆边缘为有障壁海岸环境。岩性为泥-粉晶灰岩、泥-粉晶灰质云岩、生屑云岩的退积型准层序组合,纵向上多个叠置并依次向古隆起和古陆方向渐进式超覆。

5) 高水位体系域

黄龙组晚期为高水位体系域发育期,受云南运动的影响,川东地区隆升遭受剥蚀,仅古陆边缘和西部、南部地区,川东地区沉积环境为开阔台地海水循环良好,各类窄盐度生物丰富,沉积海相灰岩为主,仅沉积物的中上部暴露。体系域底部普遍发育暗色含生物屑微晶灰岩代表海平面上升达到最高位置时的最大海泛面,岩性组合为颗粒灰岩和灰岩、白云质灰岩、白云岩层序组成,表现为向上变浅变粗加积型层序。

3.2. 沉积相特征

黄龙组沉积早期(C_2h1^1)主要为萨勃哈相,主要发育于研究区的西部,发育有泻湖和潮坪等亚相以及膏盐湖和蒸发潮坪等微相,为去膏化去云化次生灰岩和泥-微晶白云岩互层组合,夹有次生灰质岩溶角砾岩[4]中期(C_2h1^2)时海侵开始扩大,主要为有障壁海岸相,发育有潮坪,障壁滩,泻湖等亚相以及粒屑滩,半局限泻湖等微相,岩性主要以白云岩为主,如颗粒白云岩,晶粒白云岩,微晶白云岩等,局部夹有硅质白云岩,砂屑、生物屑和球粒普遍发育;晚期(C_2h1^3)海域范围进一步扩大,整个海湾进入开阔正常的浅海陆棚沉积环境[5],发育有海湾陆棚和有障壁海岸沉积相以及潮坪,开阔海湾陆棚等亚相,灰泥坪,膏云坪,滨外粒屑滩等微相,残余地层的岩性主要为泥晶灰岩,亮晶粒屑灰岩与微晶白云岩互层以及受大气淡水溶蚀作用形成的灰质岩溶角砾岩[6]。

3.3. 构造运动及气候特点

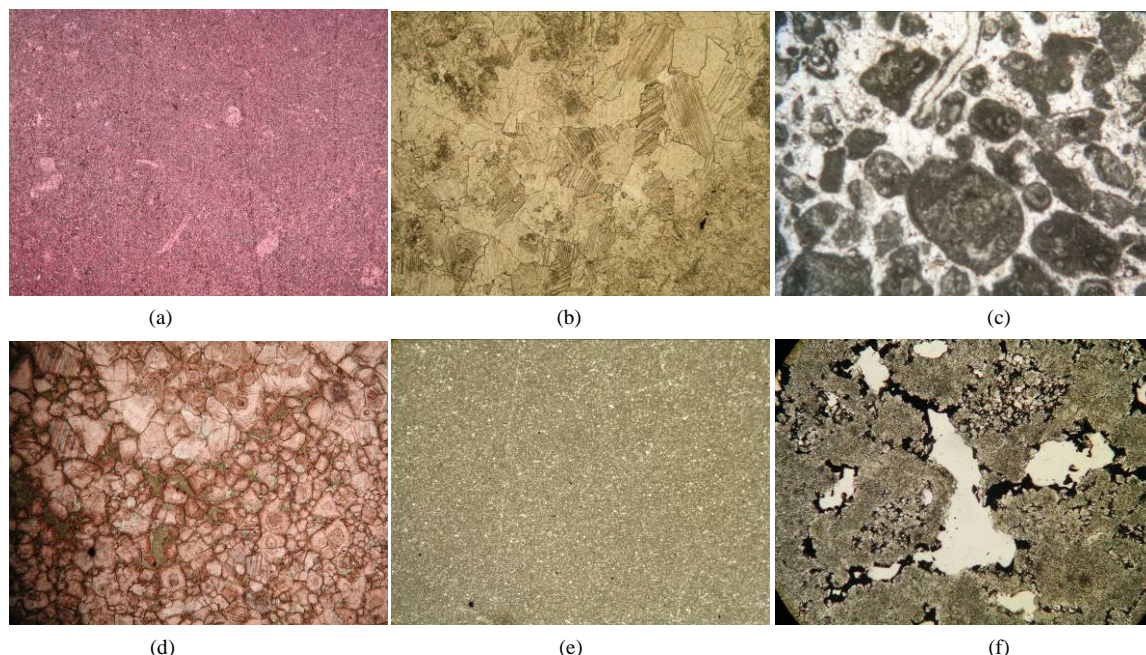
发生在志留纪末期或泥盆纪的早期的加里东运动使川东地区的地层抬升,海水退去,地层暴露到地表遭受剥蚀,由于长期的风化剥蚀作用,从而使本区泥盆系、志留系上统地层被剥蚀殆尽,志留系中统也遭到不同程度的侵蚀。再加上加里东的造山运动使川东地区成为一种整体坡度极为平缓、局部凹凸不平的地貌景观。这种地貌景观形成了上石炭统咸化泻湖沉积的大背景,随后到晚石炭世,海水大量的侵入,但由于受上扬子古陆及江南古陆的半遮挡,使得海水不能完全畅通再加之气候炎热,导致海水盐度增大,形成了川东地区的特殊地理环境,即蒸发膏湖-咸化泻湖-陆表海沉积环境,这分别代表黄龙组的一段、二段、三段的沉积环境。所以形成黄龙组地层的气候特点是干旱炎热条件,当到石炭纪的末期,由于海西期构造活动(云南运动)使整个四川盆地抬升,使地层暴露到地表遭受风化剥蚀,由于大气水的淋溶作用,白云岩发生溶蚀,从而形成大量的溶蚀孔洞,有助于储层的发育。此时的气候条件由原先的干旱蒸发环境转为潮湿环境。

4. 储层形成主控因素和机理分析

4.1. 储层岩石学特征及成岩作用类型

川东地区石炭系由下到上,由次生灰岩为主-微-粉晶白云岩为主-泥-粉晶灰岩为主夹白云岩递变[6]。白云岩类有颗粒白云岩,微-泥晶白云岩,去云化粉-细晶云灰岩和白云质岩溶角砾岩等。由于白云石含量越高(即白云化程度越高),对应孔隙度越高,越有利于储层发育(图3),因此黄龙组储层岩性主要为颗粒和晶粒白云岩及白云质岩溶角砾岩并且主要发育于二段,而其余次生灰岩类等岩性比较致密,不利于储层的发育。

黄龙组成岩作用类型众多,破坏性成岩作用包括:胶结作用、压实和压溶作用;建设性成岩作用包括:白云岩化作用、古表生期大气水溶蚀作用、去膏化和去云化作用、再埋藏期深部溶蚀作用、重结晶



(a) 含生屑微晶灰岩, 刺屑碎片, 马槽 1, C_2hl^3 , 4042 m, 染色薄片(-), 照片对角线长 4 mm; (b) 次生灰岩, 七里 24, C_2hl^2 , 编号 19-540, 普通薄片(-), 照片对角线长 1.8 mm; (c) 亮晶颗粒白云岩, 天西 1, C_2hl^2 , 编号 137, 普通薄片(-), 照片对角线长 4 mm; (d) 角砾支撑次生灰质岩溶角砾岩, 基质由次生方解石晶屑和外来泥质物组成, 次生方解石具白云石假象和环带结构, 铜 11, 3653 m, 普通薄片(-), 对角线长 4 mm; (e) 泥晶白云岩, 轿 1 井, C_2hl^1 , 编号 2-149, 普通薄片(-), 照片对角线长 4 mm; (f) 具溶蚀孔残余砂屑微-粉晶白云岩, 溶蚀孔, 铁山 8, C_2hl^2 , 编号 218, 普通薄片(-), 照片对角线长 1.8 mm

Figure 3. Main rock's types of Carboniferous Huanglong formation

图 3. 石炭系黄龙组主要岩石类型

作用和破裂作用。

4.2. 储层形成的主控因素

沉积相对储层发育的控制：高能的沉积环境，如粒屑滩相的颗粒白云岩、晶粒白云岩以及白云质岩溶角砾岩的物性好，如图 4 粒屑滩物性明显高于其他微相，有利于储层发育[4]。

白云岩化对储层发育的控制：很多研究资料都可以表明白云岩对于储层发育的重要性，白云岩的物性好，即使是岩溶角砾岩，也以白云质岩溶角砾岩的储集物性更好，因此白云岩化的程度，产生时期等均对整个储层有很大的影响。准同生期川东地区处于萨勃哈沉积环境，蒸发作用强，此时白云岩主要是高镁卤水交代碳酸盐沉积物的产物，这类白云岩很致密，不利于储层发育。早成岩期埋藏白云岩为正常海相沉积的灰岩在成岩埋藏环境中被富镁孔隙水流体交代的产物，晶间孔和晶间溶孔普遍发育，对储层发育有利。中成岩埋藏白云岩具有伴随溶蚀作用与淡水沉积物充填作用同时进行和逐渐以重结晶作用为主的特点[6]，晶间孔和晶间溶孔普遍发育，也是储层发育的有利因素。

古岩溶作用对储层发育的控制：晚石炭世晚期研究区受海西早期的云南运动影响隆升为陆，黄龙组因遭受到强烈的风化剥蚀导致 C_2hl^3 段被大面积剥蚀，部分古隆起上的黄龙组部分或全部消失殆尽，形成了黄龙组顶部的古喀斯特地貌及层内的古岩溶体系从而使沉积物原始沉积形态遭到破坏，溶洞、裂缝发育，对储层的孔隙和连通性起到了建设性作用。

4.3. 储层形成机理分析

准同生期：此时期处于晚石炭世早期，白云化作用发生在蒸发浓缩的高盐度海源孔隙水成岩系统中

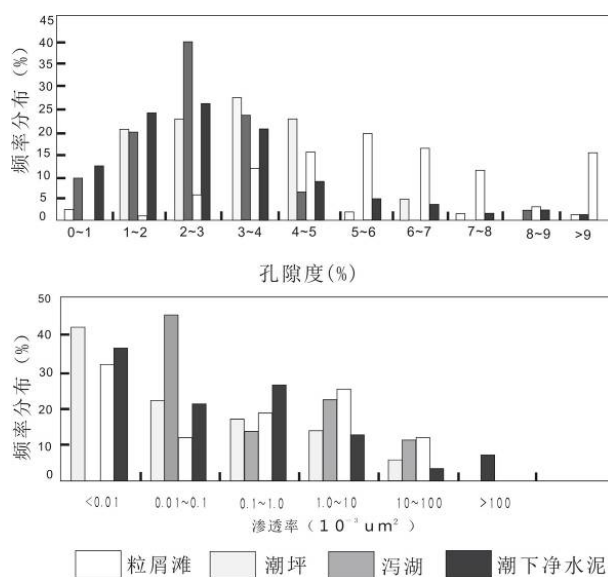
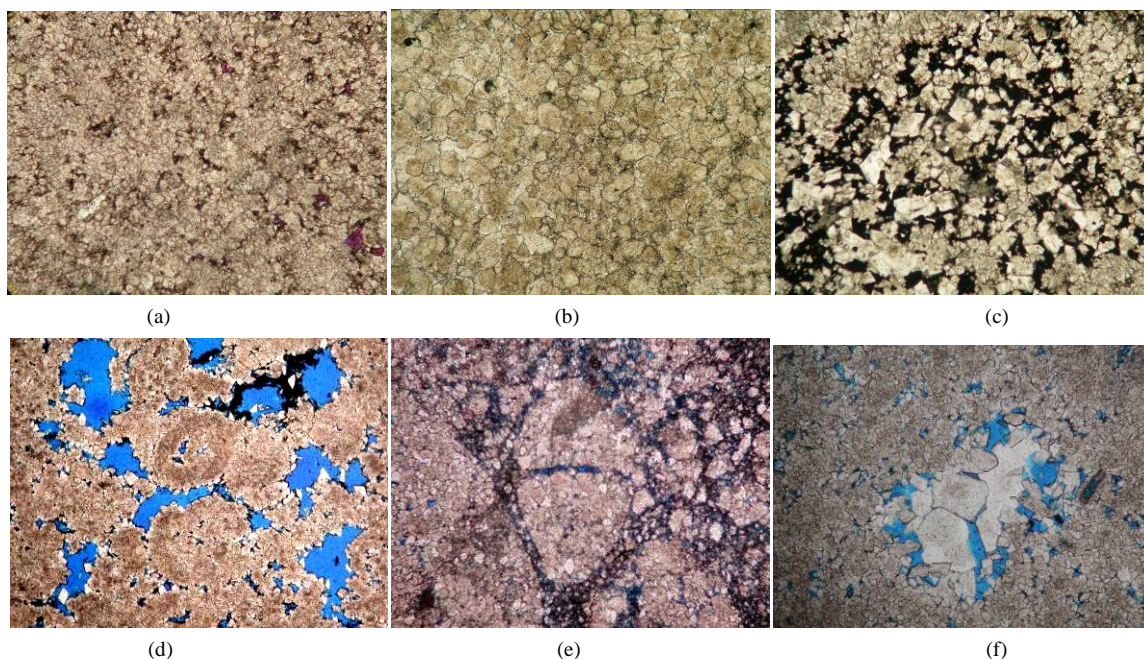


Figure 4. Physical property histogram of different reservoir microfacies of Huanglong formation in eastern Sichuan basin
图 4. 川东黄龙组不同储集微相物性分布直方图

[6]。这个时期气候炎热干燥，蒸发性强因而海水盐度高，并且沉积物刚脱离水体，孔隙中的流体仍与海水相通，处在一个开放环境，因此成岩流体是高盐度的海水。其产物为微晶白云岩，颗粒白云岩的一世代胶结物以及石膏岩。准同生期成岩阶段为孔隙水成岩系统是以压实作用和胶结作用为主的，因此原生孔隙大部分被充填，不利于储层发育。在该阶段主要的成岩过程是在该成岩环境下刚沉积下来不久的表层沉积物，主要是文石，由于这些沉积物还是疏松的，其粒间水由于蒸发作用和毛细管作用而使其含盐度变大，正常的海水变成了盐水，它的 Mg/Ca 比例达到了 20:1，甚至更高，当这些盐水与文石相接触时就可以将文石交代，发生准同生白云石化作用，形成准同生白云岩，当然也可形成一些石膏盐或其他盐类矿物。形成的准同生白云岩为泥-微晶白云岩，由于此类白云岩很致密，面孔率普遍小于 1%，对储层发育不利(图 5(a))。

早成岩期：此时期处于晚石炭世晚期早时，这段时期沉积物经过了短时期的浅埋藏成岩固结作用。在石炭纪，海水是逐渐侵入该地区，在早成岩期气候仍处在蒸发条件，因而孔隙中流体仍具有原来海水特征。在该条件下加之沉积物有了一定的埋藏深度，造成孔隙中流体与上覆水体隔绝，因此此时成岩流体性质是封存卤水。在这种成岩条件下黄龙组二段的颗粒白云岩为其主要产物，此类白云岩孔隙十分发育，常呈溶蚀孔洞状残余颗粒白云岩产出，十分有利于油气的储集。主要的成岩作用类型有浅埋藏白云石化和压实压溶以及重结晶作用，主要发育在黄龙组二段的有障壁海岸环境，尤其是浅滩微相中。在该阶段主要的成岩过程是随着海平面的上升，沉积物的不断叠复加厚，从而使下部的岩石进入一个相对封闭的埋藏环境中，并且由于压实作用，使上部地层颗粒孔隙间的富镁孔隙水流体下流交代下部灰岩，从而形成早埋藏白云岩。该白云岩颗粒大小为粉-细晶[7]，大小较均匀，以半自形-自形晶为主，显微镜下白云石较脏，往往具有雾心亮边结构和重结晶现象，晶间孔和晶间溶孔普遍较发育，面孔率普遍大于 5%。浅埋藏期的成岩系统为压实卤水成岩系统，因而压实和压溶作用以及进一步的胶结作用造成原生孔隙被破坏和充填，但是此时期大范围发育有埋藏白云石化作用和建设性的重结晶作用，有利于孔隙的发育，促进储层形成(图 5(b)、图 5(c))。

古表生期：此时期处于晚石炭世晚期晚时，在晚石炭末由于海西期构造活动(云南运动)使得川东地区再次隆升为陆，使得经过短暂成岩固结作用的沉积物被抬升暴露，接受大气淡水的改造。该时期的气候



(a) 准同生期：硅化泥 - 微晶白云岩，晶间充填有机质和方解石，致密，天东 7， C_2hl^2 ，编号 135，普通薄片(-)，照片对角线长 1.8 mm；(b) 早成岩期：粉 - 细晶白云石晶体间充填泥质，茨竹 1， C_2hl^2 ，编号 324，普通薄片(-)，照片对角线长 1.8 mm；(c) 早成岩期：粉 - 细晶白云岩，晶间孔发育，充填有机质，云和 1， C_2hl^2 ，编号 190，普通薄片(-)，照片对角线长 1.8 mm；(d) 古表生期：粉晶砂屑鲕粒白云岩，晶间、粒间和粒内溶孔非常发育，部分溶孔边缘充填有沥青，相 19， C_2hl^2 ，铸体薄片(-)，对角线长 4 mm；(e) 古表生期：白云质岩溶角砾岩，角砾内和溶蚀缝间的溶孔非常发育，板 2，铸体薄片(-)，对角线 4 mm；(f) 再埋藏期：热液异形白云石，充填于粉晶白云岩晶间溶孔中，板 1， C_2hl^2 ，3009.38 m，铸体薄片(-)

Figure 5. Main rock's types of Carboniferous Huanglong formation

图 5. 石炭系黄龙组主要岩石类型

条件由原先的蒸发环境转为潮湿环境，成岩流体性质是大气淡水。此时的成岩作用以大气水的强烈溶蚀作用为主，大气淡水对于基岩产生了溶蚀作用形成了淋溶溶孔状白云岩和白云质角砾岩等，这些岩石中各类溶蚀孔，洞，缝都很发育，为有利于储层发育的岩性。除此之外经大气水溶蚀改造后未角砾岩化的溶孔晶粒和颗粒白云岩粒间溶孔和晶间溶孔，溶缝都非常发育，为十分有利于储层发育的岩性。同时，普遍发育的淡水方解石和白云石说明存在局部的低温低还原性流体的胶结作用[6]，形成了充填孔洞缝的淡水白云石胶结物。整体来说古表生期的大气水溶蚀作用有利于储层的发育(图 5(d)、图 5(e))。

再埋藏期：此时期是从二叠世到侏罗世，此时的成岩阶段属于深部排放的温压水成岩系统[6]，成岩流体性质是深循环地下水。在相当印支期 - 喜山早期的时期内，黄龙组接受深源热液的胶结，压实，压溶，重结晶，局部的溶蚀，交代和充填等改造使得孔洞缝被堵塞，储层物性变差。但伴随埋藏深度加大和温度压力的增高以及晚印支 - 燕山运动期发育的大量 NE 向的深大断裂等使得由深部排放和沿裂缝运移的热液造成储层的强烈深部溶蚀，进一步扩大了储集空间，对研究区有效储集空间的形成起到了重要作用。该阶段的成岩过程是由于在 P-K 时期，川东地区处于海水环境中，黄龙组地层被海水淹没，下二叠统的梁山组煤系地层不整合超覆于其上，从而使黄龙组地层进入一个相对封闭的成岩体系，在压实作用下，来自上覆梁山组煤系地层或下伏中志留统韩家店组泥质地层的溶蚀流体下流，对黄龙组的地层进行深部溶蚀作用，并且这些流体还可对灰岩进行交代，生成一些深埋藏白云岩，再者还伴随着有机质热演化过程中排出的脱羧基酸性热液运移到多孔的黄龙组地层中，对基岩中的孔、洞、缝进行溶扩和产生新的更大规模的溶蚀孔、洞、缝，这样都会增大岩石的孔隙度和渗透率，对储层的发育非常有利(图 5(f))。

构造改造期：燕山 - 喜山早期产生区域构造隆升和褶皱变形作用，从而发育的裂缝有利于改善储层

孔隙度,即使是较致密的岩性,如次生晶粒灰岩,泥-微晶灰岩等也会由于裂缝的发育形成有效的裂缝型储集层。喜马拉雅期发生了更为强烈的隆升挤压作用,这一过程中发生了褶皱,断裂,抬升或剥蚀作用,岩石受应力作用产生了大量裂缝,对于储层的孔隙和渗透性都有很大的帮助。

5. 结论

1) 川东地区石炭系碳酸盐岩储层的形成受控于如下因素:粒屑滩相带控制了储层分布范围和规模,成岩期热液埋藏白云岩化发育的岩石是储层形成的基础,岩溶作用进一步扩大了储层发育范围,改善了储集条件。

2) 对于石炭系碳酸盐岩储层的贡献:浅埋藏期和古表生期对于储层发育的贡献最大,相比较而言,准同时期、再埋藏期和后期构造阶段对于储层发育的贡献相对较小。

3) 储集性良好的黄龙组白云岩储层的形成,主要是早成岩阶段-浅埋藏白云岩化作用的产物,古岩溶作用对储层发育的控制起到积极的建设作用。与储层发育密切相关的成岩方式主要为:早成岩阶段压实卤水成岩系统的埋藏白云岩化作用;古表生期大气水成岩系统的岩溶作用,再埋藏中、晚成岩阶段的构造破裂作用。

基金项目

长江大学 2014 年省级“大学生创新创业训练计划”(项目编号:104892013005)资助。

参考文献 (References)

- [1] 郑荣才,李德敏,张梢楠 (1995) 川东黄龙组天然气储层的层序地层学研究. *沉积学报*, **1**, 1-9.
- [2] 崔秉荃 (1993) 上扬子石炭纪锇碳同位素和微量元素铝与海平面变化的关系. *成都地质学院学报*, **3**, 33-37.
- [3] 梅冥相,徐德斌,周洪瑞 (2003) 米级旋回层序的成因类型及其相序组构特征. *沉积学报*, **1**, 3-48.
- [4] 文华国,郑荣才,沈忠民 (2011) 四川盆地东部黄龙组碳酸盐岩储层沉积-成岩系统. *地球科学——中国地质大学学报*, **1**, 111-121.
- [5] 张兵,郑荣才,党录瑞,等 (2010) 川东地区黄龙组碳酸盐岩储层测井响应特征及储层发育主控因素. *地质勘探*, **10**, 13-17.
- [6] 胡忠贵 (2009) 川东-渝北地区石炭系白云岩成因与成岩系统研究. 博士论文,成都理工大学,成都.
- [7] 郑荣才,党录瑞,郑超,文华国,周刚,徐发波 (2010) 川东-渝北黄龙组碳酸盐岩储层的成岩系统. *石油学报*, **2**, 237-245.