

四川盆地海相碳酸盐岩的油气成藏条件

陈英富^{1,2}, 秦娟³, 王艳红³, 李凤春⁴

(1. 中国产业安全研究中心博士后科研工作站, 北京 100044; 2. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 中国冶金地质总局山东测试中心, 山东济南 250014)

[摘要]四川盆地位于亚洲大陆中南部,是我国最大的外流盆地。油气资源评价结果(2008)表明,四川盆地海相地层待发现资源量约为 $50111.84 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源勘探潜力巨大。本文从地层的划分、层序格架及层序岩相古地理特征等方面,对四川盆地海相碳酸盐岩油气成藏条件做了进一步研究。认为研究区烃源岩包括下志留统、中二叠统、上二叠统龙潭组和上三叠统须家河组等4套岩石,及局部发育的上二叠统大隆组。储集层分为构造成因类和沉积成因类,构造成因主要包括裂缝性储层;沉积成因类储层主要是礁滩储层、内幕白云岩储层和风化壳岩溶储层。中二叠统气藏主要为自生自储的裂缝性气藏和台内滩相气藏;茅口组顶部和雷口坡组顶部发育风化壳型气藏;吴家坪组、长兴组及飞仙关组地层含礁滩型气藏;嘉陵江组和雷口坡组地层含内幕白云岩型气藏。

[关键词] 四川盆地 碳酸盐岩 油气成藏

[中图分类号] [TE122]

[文献标识码] A

[文章编号] 0495-5331(2016)02-0357-06

Chen Ying-fu, Qin Juan, Wang Yan-hong, Li Feng-chun. Hydrocarbon accumulation conditions of marine carbonate rocks in the Sichuan basin of China [J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(2): 0357-0362

四川盆地是我国海相碳酸盐岩层系最发育的含油气盆地,也是碳酸盐岩油气勘探、开发利用最早的地区。油气资源评价结果(2008)表明,四川盆地总地质资源量为 $71851.21 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明天然气储量 $7284 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产量 $133.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中陆相地层仅占16%,而84%的资源都蕴藏在海相地层中。四川盆地海相地层待发现资源量约为 $50111.84 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源勘探潜力巨大(洪海涛等,2000;赵宗举等,2003;梁狄刚等,2005;王庭斌,2005;赵宗举,2005)(图1)。

随着油气勘探工作的逐步深入,在四川盆地碳酸盐岩层系寻找大气田的难度越来越大,勘探重点已经从大气田转变为中小型气田,单纯地储层性质和圈闭类型研究已经不能满足现阶段四川盆地碳酸盐岩气田精细勘探的需要。本文拟从地层的划分、层序格架及层序岩相古地理特征等方向研究,以获取碳酸盐岩盆地沉积环境、油气成藏方面的认识。

1 地质背景

四川盆地位于亚洲大陆中南部,是我国最大的外流盆地,内部丘陵、平原交错,地势北高南低。面积26万多平方千米。

四川盆地是中国大型富含天然气盆地之一,是一个典型的多期构造叠合盆地(朱光有等,2006a, 2006b;金之钧等,2010;马永生等,2010;朱光有等,2010;曹杨,2012)(图2)。其元古界基底之上的沉积盖层巨厚,总体可分为海相和陆相两大套地层,总厚度可达6km~12km。其中,晚元古代震旦纪—中三叠世是以碳酸盐岩为主的海相沉积(厚4km~7km);晚三叠世早期为海陆过渡相(300m~400m);晚三叠世中期—始新世为陆相碎屑岩沉积(2km~5km)。发育五套主力烃源层系:下寒武统、下志留统、中二叠统、上二叠统和上三叠统。形成多套生、储、盖组合。纵向上构成了三大成藏系统:中生界陆相成藏系统、上古生界海相成藏系统和下古生界海

[收稿日期] 2015-12-19; [修订日期] 2016-03-10; [责任编辑] 陈伟军。

[第一作者] 陈英富(1974年-),男,高级工程师,研究方向:区域地质矿产调查。E-mail:1677095519@qq.com。

[通讯作者] 秦娟(1990年-),女,在读研究生,研究方向:油气勘查。E-mail:14478487@qq.com。

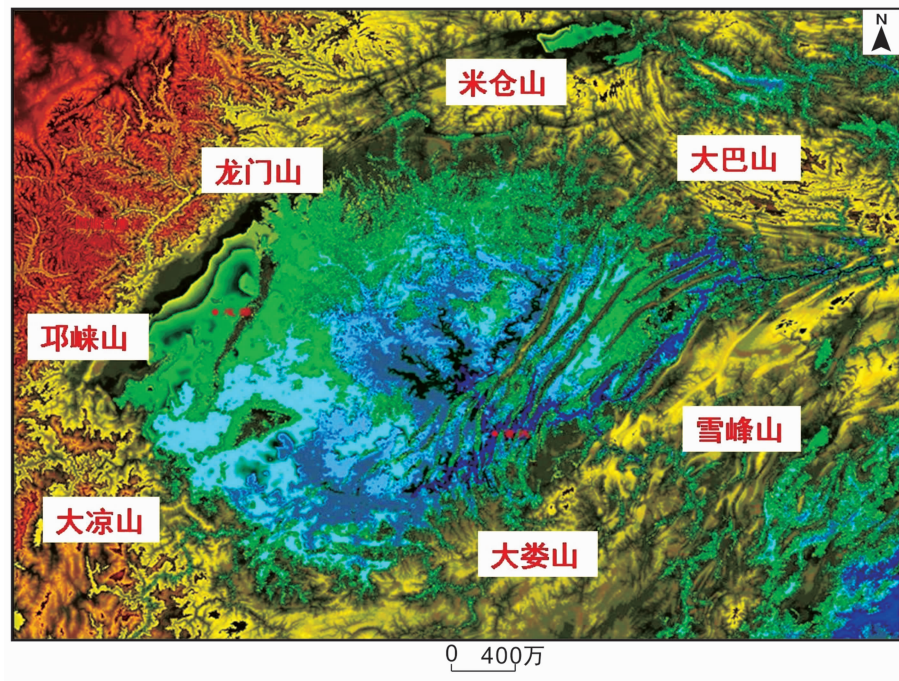


图1 四川盆地及周缘遥感略图

Fig.1 Remote sensing map of the Sichuan basin and adjacent areas

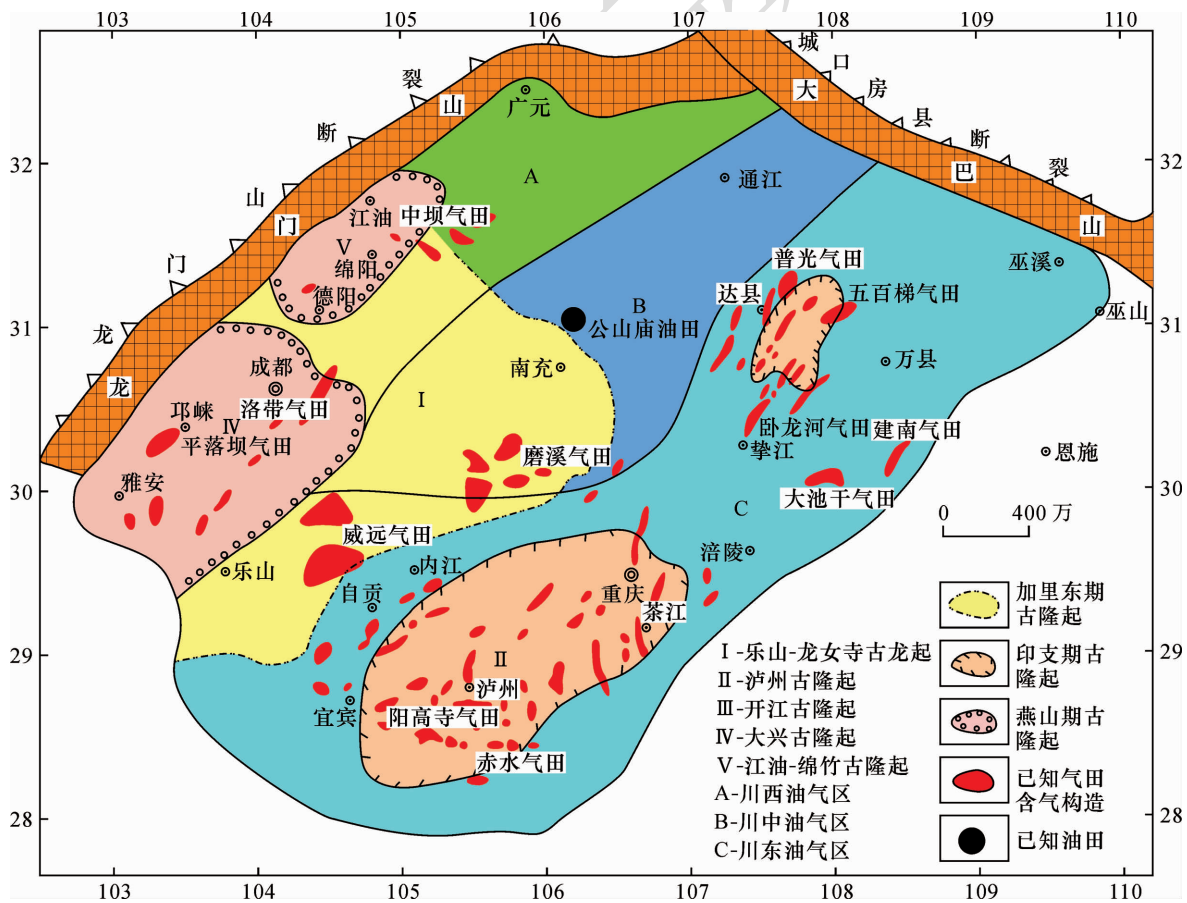


图2 四川盆地油气分布图(据马永生,2010)

Fig.2 Oil and gas distribution in Sichuan basin (after Ma,2010)

相成藏系统(马永生等,2010),有效勘探面积约为 $19.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。已有资料对于四川盆地海相碳酸盐岩油气成藏条件的认识依然存在不足,需要进一步加强这方面的研究。本文主要谈及二叠系一中三叠统。

2 地质特征

2.1 二叠系一中三叠统三级层序格架

根据野外露头层序地层特征、实测主干剖面及钻测井标定的地震层序主干剖面的解释结果,将研究区四川盆地的二叠系划分出五个三级层序,即:层序 PSQ1,相当于下二叠统梁山组及中二叠统栖霞组;层序 PSQ2,大致相当于中二叠统茅口组的下部(茅一段及茅二段);层序 PSQ3,大致相当于中二叠

统茅口组的上部(茅三段及茅四段);层序 PSQ4,相当于上二叠统龙潭组(吴家坪组);层序 PSQ5,大致相当于上二叠统长兴组(大隆组)。将中-下三叠统划分出8个三级层序,即:层序 TSQ1,大致相当于下三叠统飞仙关组(大冶组)下部(飞一段及飞二段,大一段及大二段);层序 TSQ2,大致相当于飞仙关组(大冶组)上部(飞三段及飞四段,大三段及大四段);层序 TSQ3,大致相当于下三叠统嘉陵江组下部(嘉一段及嘉二段);层序 TSQ4,大致相当于嘉陵江组上部(嘉三段及嘉四段);层序 TSQ5,大致相当于中三叠统雷口坡组(巴东组)下部(雷一段及雷二段,巴一段及巴二段);层序 TSQ6,大致相当于雷口坡组(巴东组)上部(雷三段及雷四段,巴三段及巴四段)。具体划分方案见表1。

表1 四川盆地二叠系一中三叠统三级层序格架
Table 1 The Sichuan basin in Permian-Triassic sequence framework

统	组	段	体系域	三级层序
中三叠统	雷口坡组 (巴东组)	雷四段/巴四段	HST	TSQ6
		雷三段/巴三段	TST	
		雷二段/巴二段	HST	TSQ5
		雷一段/巴一段	TST	
下三叠统	嘉陵江组	嘉四段	HST	TSQ4
		嘉三段	TST	
		嘉二段	HST	TSQ3
		嘉一段	TST	
	飞仙关组 (大冶组)	飞四段/大四段	HST	TSQ2
		飞三段/大三段	TST	
上二叠统	长兴组 (大隆组)	飞二段/大二段	HST	TSQ1
		飞一段/大一段	TST	
		长三段	HST	
		长二段		PSQ5
	龙潭组 (吴家坪组)	长一段	TST	
		龙三段		
中二叠统	茅口组	龙二段	HST	PSQ4
		龙一段	TST	
		茅四段	HST	PSQ3
		茅三段	TST	
	栖霞组	茅二段	HST	PSQ2
		茅一段	TST	
下二叠统	梁山组	栖霞二段	HST	
		栖霞一段	TST	PSQ1

2.2 二叠纪一中三叠统层序岩相古地理

中二叠统沉积之前,四川盆地经历了一次大范围的剥蚀暴露,中二叠世早期,发生了海侵,沉积了梁山组滨岸沼泽体系碎屑岩。之后,四川盆地接受了栖霞组清水碳酸盐台地沉积,该时期沉积格局稳

定,四川盆地绝大部分地区发育了较深水的盆地相和外缓坡相:深灰色生屑泥晶灰岩、泥质灰岩、泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩等。茅口组沉积时期,基本上继承了栖霞组时期的沉积格局。总体沉积水体较栖霞期加深,岩性以眼球状灰岩、深灰色泥晶生屑灰岩为

主。盆地内自西往东依次发育盆地相、外缓坡相、中缓坡相和内缓坡相。经过东吴运动改造,造成茅口组的暴露岩溶作用。之后再次海侵,其沉积面貌发生了较大变化,主要表现在张裂及差异升降运动作用下形成了开江—梁平盆地相区锥形、城口—鄂西盆地相范围发生较大变化,以及在川西南出现陆源剥蚀区及峨眉山玄武岩的大规模喷发。长兴组/大隆组沉积期,沉积面貌总体继承了前期的格局。但随着张裂及差异升降作用的持续进行,海侵范围更大,开江—梁平盆地相范围明显增大,而川西南陆源碎屑岩沉积区明显缩小,并在川中地区出现了面积较大及分布稳定的台内洼地亚相区,以及台缘及台内生物礁大量发育。

三叠纪的早期,四川盆地(研究区)及邻区大体上继承了长兴组的沉积特征格局,但在开江—梁平盆地一带,相区和川中台洼水体深度明显变浅、面积减小,台缘及台内生物礁消失,转而发育鲕粒滩,台地边缘锥形已形成,广大的川中、川东地区沉积物主要为泥晶灰岩、颗粒灰岩、泥质灰岩等,为开阔台地相区。随着台地的增生,陆源碎屑物沉积范围减小,浅水碳酸盐岩台地范围扩大,并发育较厚的鲕粒灰岩,川东北地区泥粉晶白云岩和鲕粒白云岩发育,该时期为四川盆地另一个重要的成滩期。嘉陵江组一、二段沉积期,再次发生较大规模海侵,其沉积面貌较前期有所变化,主要表现在碳酸盐台地由前期的局限—蒸发环境向开阔海转变,以及西南部陆源碎屑沉积区的缩小,并在广大的开阔台地中发育了台内洼地较深水沉积环境。嘉陵江组三、四段沉积期,再次发生海侵,沉积面貌较前期的主要变化是碳酸盐台地相由前期的局限台地相转变为开阔台地相,以及西南部陆源碎屑沉积区的缩小。雷口坡组一、二段沉积期,沉积面貌与前期有所变化,主要表现在由于受到来自东南侧的江南古陆隆升剥蚀物源区的影响,在四川盆地东南部发育了另一个陆源碎屑沉积区。雷口坡组三、四段沉积期,发生快速海侵,碳酸盐台地由前期的局限环境转变为半局限—开阔环境。盆地内部以半局限台地相灰岩夹白云岩沉积为主。

3 成藏特征

3.1 储层分类

针对四川盆地海相碳酸盐岩油气成藏特征及分布规律,众多学者认识不同。主要有以下几类观点:①有效气源岩的质量和规模,控制大—中型油气田

的形成(戴金星,1997;梁狄刚等,2005;朱光有等,2006a);②充足的气源、生气强度较高的富气凹陷以及大区域良好的封闭保存条件,是所有盆地形成大中型气田的必备要素,也是诸多地质因素中最为重要的因素(王庭斌,2005);③大型古隆起控制了现今油气藏的分布(马永生等,2005);④古隆起和斜坡带是中国克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化分布最有利区带;⑤台缘带礁滩体具备大范围成藏的有利条件,包括紧邻台缘带的生烃中心、生物礁与颗粒滩叠置发育、呈串珠状分布的岩性圈闭;⑥深大断裂构造带也具有大型化成藏的有利条件。热液活动有利于埋藏溶蚀作用和埋藏白云石化作用,与有效储层叠合发育多层系符合含油富集带;⑦膏岩盖层分布与大型油气藏分布密切相关(金之钧等,2010)。这些成果大致可以分为气源岩(生)控制、储集层(古隆起、斜坡带及台缘带礁滩体)控制、盖层(膏盐盖层)控制、运移通道(深大断裂构造带)控制等4种主控因素。这表明目前学术界对于四川盆地海相碳酸盐岩油气成藏条件的认识依然存在不足。

关于碳酸盐岩储集层分类至今仍存在争议,前人关于四川盆地海相碳酸盐岩储集层的概念多以岩性和成因相结合定名。比如层间岩溶灰岩、层间岩溶白云岩、埋藏白云岩等。这些概念虽然能够清楚地表达出储层的成因、岩性等具体信息,但是在具体预测方面,只能适用于小范围的预测。根据预测简单实用、科学合理的具体要求,提出四川盆地碳酸盐岩储层的成因分类,共分为两大类四小类。具体如下:①构造成因类裂缝型储层;②沉积成因类礁滩型储层、内幕白云岩储层和古风化壳岩溶储层。

3.2 储层成藏特征

3.2.1 礁滩储集层

非均质程度适中,介于灰岩古潜山储集层和白云岩储集层两者之间。其有效储集空间,主要是颗粒灰岩、礁格架原生孔及各种溶蚀孔洞。以粒间孔、铸模孔、粒间—粒内溶蚀孔洞为主。裂缝的发育对于加强及改善储集层性能有积极作用。裂缝的伴生与有效储集层形成无必然关系。形成礁滩相储集层的有效储集空间,主要与不同级别(3~6级)的层序旋回、暴露淡水溶蚀、各种埋藏溶蚀以及原生孔隙的保存有关。因此,礁滩储集层有效储集空间受控于原始沉积体形态。从层序格架中礁滩体发育与展布特征来看,台缘礁滩及台内礁滩均因侧向与垂向发

生相变进而形成良好的岩性-地层圈闭。礁滩相岩性-地层圈闭,非常有利于烃源岩生成的油气向其中心运聚成藏。因此,针对礁滩储集层,油气勘探工作应主要按照“岩性-成岩圈闭油气藏”的思路展开,并在具备成熟烃源岩的油气系统的范围内,研究不同古地理位置的礁滩体层序及旋回地层格架、时空分布。

3.2.2 灰岩古潜山储集层

具有强烈的非均质性。复杂的岩溶缝洞系统是其有效储集空间。这些岩溶缝洞在地下相互连通,并呈现出复杂的空间分布关系。进而造就了此类储集层的强烈非均质性。表现出了不同的缝洞系统中,充填有油、气、水及溶洞内部沉积物(岩溶渗流粉砂-泥质及溶洞角砾岩等),或者是它们的混合充填,以至于在不同缝洞系统中形成相对独立的油、气、水系统及油气水单元(简称“油元”)。有效的储集层主体分布在古潜山的风化壳顶面以下10m~200m的深度范围内,总体沿古风化壳展布并呈准层状分布。针对此,油气勘探思路应首先确定有效的岩溶缝洞系统储集空间的分布,其次确定该岩溶缝洞的充填物质(油-气-水-溶洞沉积物等)。根据不同岩溶缝洞系统及“油元”特征,实施适当的勘探开发方案。

3.2.3 裂缝性储集层

非均质性较强。其非均质程度仅次于灰岩古潜山储集层。该类储集层裂缝主要分布在背斜圈闭高部位或断裂带附近,是评价储集层的关键因素。裂缝性储集层的有效储集层及储集空间的分布受断裂控制。裂缝性灰岩储集层,除了以裂缝做为油气渗流通道与储集空间外,还有大部分灰岩基质孔隙(与裂缝连通或有成因联系),尤其是基质微孔作为油气储集空间。因此,对于裂缝性储集层的勘探思路,关键是系统研究有效裂缝带的空间展布。

3.2.4 内幕白云岩储集层

均质程度较高。经研究发现,内幕白云岩储集层渗透率与孔隙度具有较好的正相关性。由蒸发潮坪-局限泻湖环境、各种海水对流作用形成的白云岩体,经常呈准层状、不规则层状及三维不规则体状产出并广泛分布。内幕白云岩储集层形成的油气田,多归属于构造(背斜)圈闭油气藏,也有少量岩性-成岩圈闭油气藏。由此可以看出,具备构造(背斜)圈闭及有效直接盖层,是内幕白云岩储集层成藏的重要条件。因此,对白云岩储集层油气藏的勘查思路,应该是寻找有效储盖组合的构造(背斜)

圈闭。在具备油气源供给条件的情况下,布设钻探在构造(背斜)圈闭高点部位,以获得油气发现。并在首次发现之后继续实施对构造(背斜)翼部的评价钻探,以获取油、气、水空间分布格局。

4 结论

明确对四川盆地中二叠统-中三叠统气藏有贡献的烃源岩,主要包括下志留统、中二叠统、上二叠统龙潭组和上三叠统须家河组等4套区域性主力烃源岩,及局部发育的上二叠统大隆组。

四川盆地碳酸盐岩储集层按成因分为两大类:构造成因类和沉积成因类。其中,构造成因主要包括裂缝性储层;沉积成因类储层主要是礁滩储层、内幕白云岩储层和风化壳岩溶储层。

储层类型分析表明,中二叠统气藏主要为自生自储的裂缝性气藏和台内滩相气藏;茅口组顶部和雷口坡组顶部发育风化壳型气藏;吴家坪组、长兴组及飞仙关组地层主要发育礁滩型气藏;嘉陵江组和雷口坡组地层主要发育内幕白云岩型气藏。

[References]

- Cao Yang. 2012. Control factors of hydrocarbon accumulation in the fore-land basin of the northern Sichuan basin[J]. Complex oil and gas reservoir, 5(1):25-28(in Chinese with English abstract)
- Dai Jin-xing. 1997. Formation conditions and distribution rules of large and medium sized gas fields in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, Beijing, China,184-196
- Hong Hai-tao, Bao Qiang, Zhang Guan-rong. 2000. Evaluation of the favorable target areas for natural gas exploration in the Sinian and Cambrian systems in Sichuan basin[J]. Journal of Chengdu University of technology, 27(Suppl.):143-146
- Jin Zhi-jun, Zheng He-rong. 2010. A sedimentary condition for the development of the Mesozoic marine source rocks in China[J]. Journal of the Chinese society of deposition, 28(5):875-883(in Chinese with English abstract)
- Liang Di-gang, Chen Jian-ping. 2005. Oil-source correlations for high and over matured marine source rocks in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 32(2):8-14(in Chinese with English abstract)
- Ma Yong-sheng, Cai Xun-yu, Zhao Pei-rong, Luo Yi, Zhang Xue-feng. 2010. the distribution characteristics and exploration direction of large and medium gas fields in the Sichuan basin[J]. Chinese Journal of petroleum, (03):5-12(in Chinese with English abstract)
- Ma Yong-sheng, Mou Chuan-long, Guo Tong. 2005. Sichuan basin in the northeastern part of the northeastern part of the formation of the sequence stratigraphy and reservoir distribution of [J]. Mineral rocks, 25(4):74-79(in Chinese with English abstract)
- Wang Ting-bin. 2005. The geological characteristics and main controlling factors of the distribution of large and medium gas fields in China

- [J]. Petroleum exploration and development, 32 (4): 1-8 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Zong-ju. 2005. The genesis and distribution of the hydrocarbon oil and gas system. Marine oil and gas geology, 9 (4): 5-12 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Zong-ju, Zhu-Yan, Deng Hong-ying. 2003. South China ancient uplift of Paleozoic primary oil and gas reservoir control. Experimental petroleum geology, 25 (1): 10-17 (in Chinese with English abstract)
- Zhu Guang-you, Zhang Shui-chang, Liang Ying-bo. 2006a. The distribution of natural gas with high H₂S content in the Sichuan basin and its TSR genetic evidence[J]. Journal of geology, 8 (80): 1209-1217 (in Chinese with English abstract)
- Zhu Guang-you, Zhang Shui-chang, Liang Ying-bo. 2006b. The formation mechanism and distribution prediction of deep marine high quality reservoir in the Sichuan basin[J]. Petroleum exploration and development, 33 (2): 161-166 (in Chinese with English abstract)
- Zhu Guang-you, Zhang Shui-chang, Zhang Bin, Su Jin, Yang De-bin. 2010. Marine carbonate oil and gas reservoirs in the central and western regions of China[J]. Chinese Journal of petroleum, 31 (6): 871-878 (in Chinese with English abstract)
- [附中文参考文献]
- 曹 杨. 2012. 四川盆地北部前陆盆地油气成藏控制因素分析[J]. 复杂油气藏, 5(1): 25-28
- 戴金星. 1997. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 地质出版社, 184-196
- 洪海涛, 包 强, 张光荣. 2000. 对四川盆地天然气资源的潜在接替层系-震旦-寒武系有利目标区块的评价[J]. 成都理工学院学报, 27(增刊): 143-146
- 金之钧, 郑和荣. 2010. 中国前中生代海相烃源岩发育的构造-沉积条件[J]. 沉积学报, 28(5): 875-883
- 梁狄刚, 陈建平. 2005. 中国南方高过成熟区海相油源对比问题[J]. 石油勘探与开发, 32(2): 8-14
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 罗 毅, 张学丰. 2010. 四川盆地大中型天然气田分布特征与勘探方向[J]. 石油学报, (03): 5-12
- 马永生, 牟传龙, 郭彤楼. 2005. 四川盆地东北部飞仙关组层序地层与储层分布[J]. 矿物岩石, 25(4): 74-79
- 王庭斌. 2005. 中国大中型气田分布的地质特征及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 32(4): 1-8
- 赵宗举. 2005. 再生烃油气系统成因及全球分布[J]. 海相油气地质, 9(4): 5-12
- 赵宗举, 朱 琰, 邓红婴. 2003. 中国南方古隆起对中、古生界原生气藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 25(1): 10-17
- 朱光有, 张水昌, 梁英波. 2006a. 四川盆地高含 H₂S 天然气的分布与 TSR 成因证据[J]. 地质学报, 8(80): 1209-1217
- 朱光有, 张水昌, 梁英波. 2006b. 四川盆地深部海相优质储集层的形成机理及其分布预测[J]. 石油勘探与开发, 33(2): 161-166
- 朱光有, 张水昌, 张 斌, 苏 劲, 杨德斌. 2010. 中国中西部地区海相碳酸盐岩油气藏类型与成藏模式[J]. 石油学报, 31(6): 871-878

Hydrocarbon Accumulation Conditions of Marine Carbonate Rocks in the Sichuan Basin of China

CHEN Ying-fu^{1,2}, QIN Juan³, WANG Yan-hong³, Li Feng-chun⁴

(1. Postdoctoral Program of the China Center for Industrial Security Research, Beijing 100044;

2. Institute of mineral resources research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300;

3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

4. The Testing Center of Shandong Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Jinan, Shandong 250014)

Abstract: The Sichuan basin is one of the most important oil and gas basins of marine carbonate sequences in China, also the earliest carbonate exploration, exploitation and utilization were conducted. The evaluation of its hydrocarbon resources (2008) suggested there is a considerable amount of undiscovered resources (approximately $50111.84 \times 10^8 \text{ m}^3$) in the marine strata of this basin, implying a great potential of prospecting. This paper presents a further study on hydrocarbon accumulation conditions in this area based on strata classification, sequence patterns and characteristics of rock facies and paleogeography. The results suggest that the source rocks include four sets of Lower Silurian, Middle Permian, Upper Permian, and Upper Triassic systems. Reservoirs are of structural and sedimentary genesis, of which the former refers to fissures and the latter is reef-beaches, dolomitite, and weathering crusts. These reservoirs are present in varied formations.

Key words: Sichuan basin, marine carbonate rock, hydrocarbon reservoir