

文章编号:1672-9854(2010)-01-0015-06

古老碳酸盐岩层系油气储层地质特征

刘伟, 孟庆阳, 张光亚, 张磊

(中国石油勘探开发研究院)



刘伟

摘要 对研究程度较高的北美奥陶系碳酸盐岩油气田特征参数作了统计和分析,对比中国下古生界碳酸盐岩油气田,分析了古老碳酸盐岩油气储层的特点及主要控制因素。北美大陆奥陶纪沉积环境以环潮坪—浅水陆棚为主,储集岩可简单地划分为四种岩相类型,包括泥晶灰岩、粒泥灰岩、泥粒灰岩以及颗粒灰岩。晶间孔、角砾岩相关孔隙及溶蚀孔隙是最主要的孔隙类型,其中尤以晶间孔最为普遍。中国下古生界碳酸盐岩油气储层的演化更为复杂,原生孔隙损失殆尽。北美和中国的研究都表明,岩溶储层和白云岩储层是主要的有效储层。当埋深超过3000m时,白云岩是主要的储层岩石类型。在埋深增大的情况下白云岩保持更好的储集性能,这是一个基本的趋势。中国下古生界碳酸盐岩埋深较大,所以白云岩储层是一个特别值得关注的领域。

关键词 下古生界;碳酸盐岩油气田;碳酸盐岩储集层;北美地区;中国

中图分类号:TE112.23 **文献标识码**:A

刘伟 1978年生,工程师。2001年毕业于西北大学,2008年在中国石油勘探开发研究院获博士学位,现主要从事海相碳酸盐岩沉积与储层研究。通讯地址:100083北京市海淀区学院路20号910信箱;电话:(010)83598457

海相碳酸盐岩储层研究是石油地质研究的重要环节。中国的海相碳酸盐岩层系多形成于多旋回的叠合盆地下部,以“时代老、埋藏深”为特点,与中生代碳酸盐岩储层相比,经历了更为复杂的成岩演化历史,具有更为复杂的孔隙结构。笔者将下古生界碳酸盐岩称为古老碳酸盐岩,对这一类古老碳酸盐岩储层地质特征的研究显得尤为重要。本文通过对研究程度较高的北美大陆地区奥陶系碳酸盐岩油气田特征参数的统计和分析,对比中国早古生代碳酸盐岩油气田,力图明确中国古老碳酸盐岩油气储层的特点及主要控制因素。

1 古老碳酸盐岩油气田时空分布特征

碳酸盐岩油气田的时空分布具有不均衡性,世界上超过四分之三的石油储量来自中东地区的侏罗系、白垩系和第三系,而大约三分之二的天然气储量来自前苏联、中东和美国的石炭系、二叠系。相比之下,在下古生界发现的油气田的数量和

储量要少得多(图1),目前主要集中在北美大陆、中国、俄罗斯波罗的海含油气区以及澳大利亚坎宁盆地。

中国海相碳酸盐岩分布面积达 $455 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1],主要分布在塔里木地台、华北地台、扬子地台等地区,目前油气发现主要集中在塔里木、鄂尔多斯和四川等盆地^[2]。从层位上看,除南方海域第三系和四川盆地上古生界外,奥陶系是主要的碳酸盐岩油气产出层位。

北美地区是世界上最主要的奥陶系碳酸盐岩油气产区,也是研究最为深入的地区。油气产出主要集中在威尔斯頓盆地、密执安盆地、二叠盆地以及伊利诺斯盆地,主力产层包括寒武系—奥陶系 Arbuckle 群、下奥陶统 Ellenburger 组、中—上奥陶统 Trenton-Black River 石灰岩以及上奥陶统红河组。本文选取了八个主要的具有代表性的奥陶系碳酸盐岩油气田(表1),对各种地质参数进行统计,来确定有利储层的特征和控制因素。

收稿日期:2009-09-16

表 2 北美油气区主要奥陶系碳酸盐岩油气田储层特征

序号	油气田	地层	产层	埋深 (m)	沉积相	原岩岩性				成岩作用				孔隙类型					孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}$)	
						M	W	P	G	D1	D2	D3	D4	P1	P2	P3	P4	P5			
1	Cabin Creek 油田	O ₃	上奥陶统红河组; 志留系内湖组	1890	环潮坪	●	○	●		●	●	●	●	◇	●	○				13/1-25	8/0-142
2	Pennel 油田	O ₃	上奥陶统红河组	1684	环潮坪	●	●	○		●		●	●		●	○		○	15/4-26	3/115 (裂缝)	
3	Oklahoma City 油田	O ₁	寒武系—奥陶系 Arbuckle 群	1996	环潮坪	●	○			●	●		●	◇	○	●			12/2-24	140/0.2-1530	
4	Wilburton 气田	O ₁	寒武系—奥陶系 Arbuckle 群	3712	环潮坪	●	○			●	●		●		◇	○	●	●	1.1/0.1 ~ 8.5	0.03/0-565	
5	Albion Scipio 油田	O ₂₋₃	中—上奥陶统 Trenton-BlackRiver 灰岩	1220	低能 陆棚	●	●	●	○	●		●	●		●	○		◇	4/0-12	10/0.01-8000	
6	Lima-Indiana 油气田	O ₂₋₃	中—上奥陶统 Trenton-BlackRiver 灰岩	402	低能 陆棚	●	●	●	○	●		●	●		●	○		◇	7/1.5-14	250/0.3-9000	
7	Emma 油田	O ₁	下奥陶统 Ellenburger 组	2743	环潮坪	●				●	●	●		●	◇	◇	○	●	●	3	54
8	Puckett 气田	O ₁	下奥陶统 Ellenburger 组	3719	环潮坪	●	●			●	●		●	◇	◇	●	●	○		3.5	10-50

注: M 泥晶灰岩; W 粒泥灰岩; P 泥粒灰岩; G 颗粒灰岩。D1 白云石化; D2 大气淡水溶解; D3 非大气淡水溶解; D4 裂缝。
P1 粒间孔; P2 白云石晶间孔; P3 溶蚀孔隙; P4 角砾孔隙; P5 裂缝孔隙。● 主要类型; ○ 次要类型; ◇ 少量。
孔隙度、渗透率的数值表达式: 平均值/最小值~最大值。

隙地质成因及演化方向为依据,提出碳酸盐岩孔隙的分类和命名方案,得到了广泛应用。本文采用该分类方案,并做了一定简化。

北美油气区八个主要奥陶系碳酸盐岩油气田储层孔隙类型的统计表明,晶间孔、角砾岩相关孔隙及溶蚀孔隙是最主要的孔隙类型,裂缝相对次要(表 2)。其中尤以晶间孔最为普遍,在八个油气田中均有发育,在 Cabin Creek、Pennel 等四个油气田中为主要孔隙类型。其次是与岩溶作用有关的角砾岩孔隙,它作为主要孔隙类型出现在 Wilburton、Emma 及 Puckett 油田。溶蚀孔隙(暴露溶蚀和埋藏溶蚀)在八个油气田中均有发育,且是 Wilburton 和 Emma 油田的主要储集空间。裂缝的分布也较普遍,但仅在两个油气田作为主要孔隙类型出现。虽然在粗粒沉积中,粒间孔有可能保存下来,但是由于受到成岩作用的强烈改造,其数量和规模均很小。

2.3 成岩作用

奥陶系碳酸盐岩在漫长的地质历史中经历了多种成岩作用,这些成岩过程在很大程度上改变或模糊了沉积时的孔隙特征,并成为最终控制储层发育的关键因素。建设性的成岩作用包括溶蚀作用(大气

淡水溶蚀、非大气淡水溶蚀)、白云石化作用及裂缝作用。

2.3.1 溶蚀作用

溶蚀作用可以发生在不同的成岩环境中。成岩作用早期,选择性溶蚀在大气淡水和超咸水环境中发生。前者与抬升暴露和潮湿气候环境有关,后者与蒸发环境有关,在两种环境中均形成典型的铸模孔和溶蚀孔洞。

大气淡水溶蚀与主要不整合面关系密切,全球大约 20%~30%的可采出油气资源与不整合有着密切联系^[5]。例如北美地区阿巴拉契亚盆地奥陶系内发育的 Owl Creek 不整合(也称 Knox 不整合面)对于岩溶储层的发育有重要意义。岩溶储层以相对低的基质孔隙度和发育的溶孔、溶洞、裂缝孔隙及角砾孔隙为特征。

埋藏环境下形成的溶蚀现象在碳酸盐岩储层中也较为常见,这通常与地下流体中的有机酸或硫酸有关。流体沿断裂或裂缝流动,在流动过程中改造已经存在的孔隙体系,这类储层通常以形态不规则、但连通性较好的溶蚀孔洞为特征。

在表 1 和表 2 给出的八个油气田中均发现了溶

蚀作用发育或存在的证据,其中 Emma 和 Puckeeet 等五个油气田主要发生大气淡水溶蚀作用,而 Pennel 和 Lima-Indiana 等四个油气田以非大气淡水溶蚀为主,溶蚀孔隙和角砾孔隙是 Wilburton、Emma 等四个油气田的主要储层孔隙类型(表 2)。

区域性的暴露溶蚀是控制有效储层发育的关键因素。广泛发育的溶洞系统中通常可以识别出三种岩溶相,即洞顶相、溶洞充填相及溶洞坍塌相。而持续的埋藏作用则导致未完全充填的溶洞系统进一步破裂、坍塌及角砾岩化。与埋藏作用相关的坍塌和角砾岩化更是岩溶储层中有效孔隙的重要成因,例如美国西德克萨斯州 Emma 油田 Ellenburger 组^[6-7]。

2.3.2 白云石化作用

近地表和埋藏环境形成的白云岩,都不同程度地发育晶间孔隙,这些晶间孔隙的产生主要是由于白云石交代方解石时固体体积的减小。白云石化作用对储层的影响表现在两个方面:(1)增加了储层孔隙,虽然有时白云石化使岩石孔隙增加不多,但可以明显提高岩石渗透率;(2)过白云石化会使早期形成的晶间孔堵塞,从而事实上减少岩石孔隙度。

北美地区奥陶系碳酸盐岩储层岩性主要为白云岩,有两种成因:一是在准同生期形成于蒸发潮坪、局限半局限潮坪或台地中的白云岩;另一类是热液流体沿断裂带或断层活动造成断裂附近石灰岩的白云石化。

潮坪白云岩储层中,白云石化程度在横向和垂

向上的变化,是影响储层性质的重要因素,潮上带的过白云石化和潮下带程度较低的白云石化对储层产生负面影响^[8-9]。而热液白云岩储层的分布受控于断裂体系的分布,如位于美国密执安盆地西南部的 Albion Scipio 油田储集体为呈长条状(长达 77 km,宽不到 2.6 km)沿断裂带分布的灰—褐色白云岩^[10]。

2.3.3 裂缝作用

裂缝在碳酸盐岩中相当普遍,其形成与构造作用、差异压实作用、盐丘运动等有关。因为裂缝孔隙的测定相对困难,因此裂缝作用最终能使孔隙度增加多少还不明确,但是裂缝会提高岩石渗透率已经得到很多理论和实践的证实。此外,裂缝还为溶蚀流体提供流动通道。裂缝仅在 Wilburton 和 Emma 油气田中作为主要孔隙类型出现,在 Pennel 和 Puckett 油田中是次要孔隙类型。

3 中国奥陶系碳酸盐岩油气储层特征

中国古老碳酸盐岩层系的演化,具有以下特点。

(1)构成多旋回叠合盆地的下部层系,大多经历了从裂谷盆地→克拉通盆地→被动大陆边缘盆地→前陆盆地的叠加复合过程,具有复杂的地质结构^[11]。

(2)碳酸盐岩层系分布时代老,埋藏深。国外海相地层以中、新生界为主,即便是古生界油气藏,埋深通常也不会超过 4 000 m。而中国海相地层分布以古生界为主,勘探目的层常常超过 4 000 m,绝大多数都在 3 000 m 以上(表 3)。

表 3 中国部分地区古老碳酸盐岩油气储层特征

序号	盆地	地区	主要产层	埋深 (m)	沉积相	原岩岩性					成岩作用				孔隙类型				
						M	W	P	G	R	D1	D2	D3	D4	P1	P2	P3	P4	P5
1	塔里木盆地	塔北	奥陶系 一间房组—鹰山组	5000-6000	开阔台地	○	○	●	●	○	◇	●	●	◇	◇	●	●	○	
		塔中	上奥陶统 良里塔格组	4000-5000	台地边缘	◇	○	●	●	◇	●	○	●	◇	●	○	○	○	
			中—下奥陶统 鹰山组	5000-6500	开阔台地	○	○	●	●	◇	●	●	●	◇	◇	●	●	○	
		和田河	奥陶系	2000-2300	开阔台地	●	●	○	●	●	●	●	●	◇	○	●	●	●	
2	鄂尔多斯盆地	靖边	下奥陶统 马家沟组	3500-4000	硬石膏—白云岩 盆缘坪	●	●	○	○	●	●	○	○	○	●	●	●	○	
3	四川盆地	威远	震旦系灯影组	3000	潮坪相	●	○	○	○	●	○	○	●	●	●	○	●		
		资阳	震旦系灯影组	3300-4000	潮坪相	●	●	○	○	●	●	○	○	●	●	○	○		

注: R 礁灰岩; M 泥晶灰岩; W 粒泥灰岩; P 泥粒灰岩; G 颗粒灰岩。D1 白云石化; D2 大气淡水溶解; D3 非大气淡水溶解; D4 裂缝。P1 粒间孔; P2 白云石晶间孔; P3 溶蚀孔隙; P4 角砾孔隙; P5 裂缝孔隙。● 主要类型; ○ 次要类型; ◇ 少量。

由此可见,中国奥陶系碳酸盐岩储层特征比国外更为复杂。目前的勘探实践表明,我国早古生代碳酸盐岩油气发现主要集中在塔里木盆地和鄂尔多斯盆地,岩溶储层和白云岩储层是最重要的储层类型。

3.1 古岩溶储层

在我国,多次构造运动为暴露型古岩溶储层发育提供了条件,古生代至少发育四期岩溶作用——加里东中晚期、海西早期、海西晚期、印支期^[12]。

加里东运动对中国古生代碳酸盐岩层系影响深远。奥陶纪末,加里东运动使鄂尔多斯盆地整体抬升,遭受了长达 150 Ma 的风化剥蚀,至中石炭世才开始沉降,接受中上石炭统的沉积,并在这个不整合面附近形成了大型油气藏。在塔里木盆地,塔中地区下奥陶统岩溶风化壳是中加里东运动的产物,缝洞型储层呈准层状展布^[13],已有工业油气发现。此外越来越多的证据表明,塔北地区加里东期岩溶也广泛发育^[14-16]。海西期是另一次重要的岩溶发育期,该期岩溶在塔北隆起最为显著,钻井及地震资料揭示下石炭统与下伏中奥陶统、志留系—泥盆系呈角度不整合接触关系。

除暴露溶蚀外,地下热液流体也对碳酸盐岩地层有溶蚀作用。由于热液中含有大量的 CO_2 、 SO_4^{2-} 以及有机酸等酸性物质,在其沿断裂(裂缝)、不整合面和其它孔隙进入碳酸盐岩时,通常会沿热液通道两侧进行溶蚀改造,形成油气聚集的新场所^[17-18]。鄂尔多斯盆地奥陶系深部白云岩中的溶蚀孔洞,其成因属于热水岩溶作用的结果,如定探 1 井、陕 12 井。在我国塔里木盆地奥陶系石灰岩、白云岩中,热液岩溶不像风化壳岩溶作用那样形成大型的溶蚀孔洞,而是形成大量毫米级的小溶孔^[19]。如塔中地区塔中 44 井和塔中 12 井良里塔格组,热液白云石化使英买 7 井碳酸盐岩储层得到明显改善。

暴露岩溶作用和埋藏溶蚀作用是古岩溶储层形成的两种最重要成岩作用。暴露岩溶作用是储层形成的基础和前提,埋藏溶蚀作用是储层建设性的补充。埋藏溶蚀作用与前期暴露岩溶作用的多期次叠加配置和溶蚀改造是导致有效储集空间发育、储渗条件改善以及储层形成的决定性因素^[20]。

3.2 白云岩储层

奥陶系碳酸盐岩时代久远,在形成和埋藏过程中

经历了多种成岩作用,导致原始孔隙体系被破坏直至消亡。据孙绍清(C&C 公司,2000)对全球主要碳酸盐岩油气田的统计,当埋深超过 3000 m 时,气凝析油藏中,白云岩是主要的储层岩石类型(图 2)。由此可见,相对于石灰岩,在埋深增大的情况下白云岩保持更好的储集性能,这是一个基本的趋势。中国下古生界碳酸盐岩埋深较大,绝大多数超过 3000 m,所以白云岩储层是一个特别值得关注的领域。

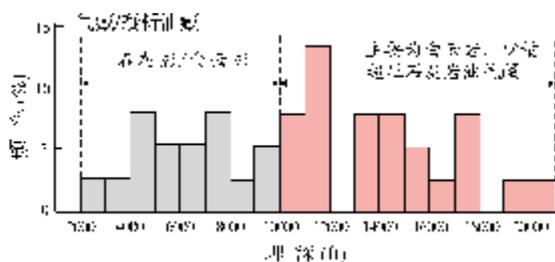


图 2 碳酸盐岩油气藏埋藏深度与岩性类型关系
(据 C&C 公司,2000)

准同生期白云岩晶粒较小,孔隙性较差,但是分布面积广,成层性好,如四川盆地三叠系雷口坡组、鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组以及塔里木盆地中一下寒武统。埋藏白云岩晶粒粗,晶间孔非常发育,但其形成和分布规律较复杂,如塔里木盆地蓬莱坝组、四川盆地地下奥陶统南津关组以及鄂尔多斯盆地马家沟组。强烈的后期成岩作用,可明显改造各类白云岩的储集性能——在岩溶作用、埋藏溶蚀作用及构造破裂作用下,白云岩比石灰岩更敏感,更易于发育成优质储层,如四川威远气田灯影组、塔里木英买力寒武系白云岩、鄂尔多斯马家沟组白云岩等储层都是典型的复合成因优质白云岩储层(表 3)。

4 结论与认识

通过对北美地区奥陶系碳酸盐岩油气田的资料统计不难看出,古老碳酸盐岩储层有效孔隙主要是白云岩晶间孔和溶蚀孔隙。中国在小克拉通板块背景下形成的早古生代碳酸盐岩油气储层的演化则更为复杂,原生孔隙损失殆尽,受不整合面和断裂系统控制的岩溶储层和白云岩储层是主要的有效储层,它们是我国古老碳酸盐岩层系油气勘探所应关注的重点。而针对古老碳酸盐岩层系的储层研究,除要加强白云岩机理性研究外,还要注意小克拉通板块构造活动与岩溶储层发育的关系。

参考文献

- [1] 周玉琦,易荣龙,舒文培,等. 中国石油与天然气资源[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2002.
- [2] 赵贤正. 中国南方油气勘探领域及加快勘探的对策[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(1):96-101.
- [3] 强子同. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 东营:石油大学出版社, 1998.
- [4] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonate[J]. AAPG Bull, 1970, 54: 207-250.
- [5] Richard D F, James L W, Donald A Y. Paleokarst related hydrocarbon reservoirs[M]. New Orleans: SEPM Core Workshop, 1993, (18):3
- [6] Morris W L, Dennis R K, Donald F O, 等. 内克拉通盆地[M]. 刘里斌, 于福华, 杨时榜, 等, 译. 北京:石油工业出版社, 2000.
- [7] Loucks R G, Anderson J H. Depositional facies, diagenetic terranes and porosity development in Lower Ordovician Ellenburger dolomite, Puckett Field, West Texas[M]// Roehl P O, Choquette P W. Carbonate petroleum reservoirs. New York: Springer-Verlag, 1985:19-37.
- [8] Williams J A. Characterization of oil types in the Williston Basin[J]. AAPG Bull, 1974, 58:1243-1252.
- [9] 罗海儿 P O, 乔奎特 P W. 世界大油气田碳酸盐岩油藏研究实例[M]. 王正鉴, 江若霓, 等, 译. 北京:石油工业出版社, 1993.
- [10] Budai J M, Wilson J L. Diagenetic history of the Trenton and Black River formations in the Michigan Basin [M]// Catacosinos P A, Daniels P A. Early sedimentary evolution of the Michigan Basin. Geological Society of America Special Paper 256, 1991:73-88.
- [11] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩系油气勘探特殊性问题[J]. 地学前缘, 2005, 12(3):15-22.
- [12] 康玉柱. 中国古生代碳酸盐岩古岩溶集特征与油气分布[J]. 天然气工业, 2007, 28(6):1-12.
- [13] 苗继军, 贾承造, 邹才能, 等. 塔中地区下奥陶统岩溶风化壳储层特征与勘探领域[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 202-207.
- [14] 闫相宾, 李铁军, 张涛, 等. 塔中与塔河地区奥陶系岩溶储层形成条件的差异 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 202-207.
- [15] 高志前, 樊太亮, 刘忠宝, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系关键不整合性质论证及其对储层的影响[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(4):567-569.
- [16] 张达景, 吕海涛, 张涛, 等. 塔河油田加里东期岩溶储层特征及分布预测[J]. 沉积学报, 2007, 25(2):215-223.
- [17] 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响[J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 103-109.
- [18] Westphal H, Eberli G P, Smith L B, et al. Reservoir characterization of the Mississippian Madison Formation, Wind River basin, Wyoming [J]. AAPG Bull, 2004, 88(4): 405-432.
- [19] 吴茂炳, 王毅, 郑孟林, 等. 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩热液岩溶及其对储层的影响[J]. 中国科学 D 辑, 2007, 37(增刊 I):83-92.
- [20] 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.

编辑:吴厚松

Geologic Characteristics of Oil and Gas Reservoirs in Old Lower Paleozoic and Sinian Carbonate Rocks

Liu Wei, Meng Qingyang, Zhang Guangya, Zhang Lei

Abstract: Correlated with statistics and analysis of the characteristic parameters from eight Ordovician carbonate reservoirs in eight oil and gas fields in north American, the features and the main controlling factors of the Lower Paleozoic and Sinian carbonate reservoirs from some oil and gas fields in China are studied. In North American, the Ordovician sedimentary environments mostly were circular tide flats to shallow shelves and the carbonate reservoirs can be briefly divide into four types of lithofacies, including mudstone, wackestone, packstone and grainstone, in which intercrystal pores, pores related with breccia and dissolved pores are common while in China, the evolution of Lower Paleozoic and Sinian carbonate reservoirs are more complicated and primary pores are mostly damaged out. The both results of reservoir analysis to North American and China have shown that both of kast reservoirs and dolostone reservoirs are all effective ones. When burial depth are more than 3000m, dolostone is the dominant type of reservoir rock. As increasing depth, dolostone can keep good reservoir capability, which is a elementary trend. The Lower Paleozoic and Sinian carbonate rock are commonly greatly deep-buried in many basins in China so that the dolostone reservoirs are a domain worthy to pay an attention especially.

Key words: Lower Paleozoic; Carbonate reservoir; Carbonate field; Dolostone; North American; China

Liu Wei: male, Engineer. Add: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 20 Xueyuan Rd., Beijing, 100083 China