

川西海相天然气勘探难点及对策

叶 军

(中国石化西南油气分公司)

叶军.川西海相天然气勘探难点及对策.天然气工业,2008,28(2):17-22.

摘 要 “十五”期间,川东北海相特大型气田的发现引发了新一轮南方海相地层油气勘探热潮,中石化在川西坳陷中段部署了针对海相层位的亚洲最深科学探井——川科1井。但四川盆地构造演化复杂、多源多期多系统成藏、油气高演化等特定地质条件,使得一系列基础地质和成藏难题尚待解决,主要有:高演化烃源岩和资源评价、复杂构造运动背景下的成藏机理、油气保存条件评价等问题。为此,对川西海相天然气勘探的难点进行了分析,并指出了包括:烃源—资源、储层、保存条件、聚集条件、川西海相油气成藏地质理论、川西海相油气地质分析评价方法技术系列等在内的6个科技攻关方向,总结出“强化盆地构造演化与恢复研究,重视油气成藏地质研究,加大基础地质研究投资力度,设立一批围绕海相油气成藏地质理论和地质分析评价方法技术系列的专项课题,不要大而全,强调专项攻关,各个击破”的技术对策,同时提出了开展13个专项研究的建议。

主题词 四川盆地 西 海相 碳酸盐岩 天然气勘探 难点 攻关方向 技术 对策

“十五”期间,中国石化南方油气勘探公司发现并快速探明了我国目前最大的海相气田——普光气田,截至2006年底累计探明天然气储量 $3560.72 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计最终储量规模可达 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1]。普光气田的发现,展现了四川盆地寻找海相碳酸盐岩特大型气田的勘探前景,增强了人们勘探海相油气田的信心。随着川东北海相油气勘探大突破,“十一五”期间川西地区海相油气勘探也拉开了帷幕,针对海相层位的地震勘探迅速展开,同时第一口以海相为目的层的亚洲第一深井——川科1井(设计井深8874 m)在川西坳陷中段孝泉构造开钻。目前川西海相已经被定位为川西陆相油气田的重要战略接替基地和建设中石化四川探区百亿立方米大气田的重要领域。

一、川西海相区域地质背景

川西海相区域指地史上位于上扬子地台西缘、目前位于四川盆地西部川西平原所在地区,基底主要由前震旦系火地垭群变质岩系和晋宁期岩浆岩组成,上覆盖层主要由海相和陆相2套沉积体系组成。

四川盆地海相沉积历史主要经历了3个阶段^[2]:①震旦纪—志留纪为台地沉积早期;②泥盆纪—石炭纪为台地沉积中期,除川东有少量碳酸盐

岩沉积外,长期为古陆,处于剥蚀环境;③二叠纪—中三叠世为台地沉积晚期。海相沉积总体特征为:陆源碎屑沉积物与碳酸盐岩在时空上组成有序组合,厚度上以碳酸盐岩为主;沉积物多属潮坪—浅海相,纵向上组成多个海侵—海退旋回,一般以陆源碎屑开始,碳酸盐岩沉积结束。中三叠世前,四川“盆地”格局尚未形成,西南侧长期濒临康滇和甘孜古陆,东北部毗连北大巴山和武陵山台缘斜坡;这一古地理格局控制了海相盖层的发育,表现为震旦系至中三叠统西部较薄而东部较厚,一般为3~5.6 km;受加里东期华南板块向北俯冲的影响,川中形成古隆起;二叠纪受引张作用影响,在四川盆地北部、东部出现了台沟及其沉积物,盆地西南部和东部局部地区有玄武岩喷溢;早三叠世晚期至中三叠世早期,发育膏盐沉积物;受秦岭海域关闭和滨太平洋地质时间的影响,在中三叠世形成了泸州—开江古隆起,自此结束了碳酸盐岩台地发展阶段,晚三叠世以后过渡到以陆相沉积为主的阶段。在台地发展期,四川盆地形成了巨厚的古生代—中生代海相碳酸盐岩沉积序列(表1)。迄今为止,四川盆地的震旦系至中三叠统海相领域中已发现含气层系(段)10余个,建成大中型气田19个,主要分布在川东地区^[3],以石炭系、上二叠统、下三叠统气藏为主;其他地区则以中小型气田为主。

作者简介:叶军,女,1955年生,教授级高级工程师;长期从事油气成藏地质综合研究工作。地址:(610016)四川省成都市提督街108号。电话:13880699790。E-mail:yejun5511@163.com

表 1 四川盆地海相沉积地层简表(据许国明等,2006)

地 层 层 序					厚度 (m)	岩性描述	地震反 射层	岩相特征	构造 事件	接触关系
系	统	组	段	代号						
三 叠 系	中 统	雷口坡组	三段	T ₂ l ³	0~330	深灰色石灰岩夹石膏	T ₁ f ⁴	浅滩湖间	早幕	
			二段	T ₂ l ²	0~590	白云岩与石膏互层		潮间—蒸发台地		
			一段	T ₂ l ¹	30~135	白云岩膏岩,底为绿豆岩		潮上—蒸发台地		
	下 统	嘉陵江组	五段	T ₁ f ⁵	50~800	上为石膏,下为白云岩		浅海台地		
			四段	T ₁ f ⁴	50~800	上为石膏,下为白云岩		潮间		
			三段	T ₁ f ³	180~250	石灰岩夹石膏		浅海台地— 混积陆棚		
			二段	T ₁ f ²	170~190	石膏与白云岩互层		浅海台地—台盆		
		飞仙关组	一段	T ₁ f ¹	310~420	灰紫色石灰岩		浅海台地—潮坪		
			四段	T ₁ f ³	30~60	石膏及白云岩		浅海台地		
			三段	T ₁ f ³	400~730	石灰岩及泥质灰岩夹鲕灰岩		浅海台地—潮间		
			一段	T ₁ f ¹				陆棚		
二 叠 系	上 统	长兴组		P ₂ c	80~250	生物灰岩或溶孔云岩	T _{P₂}	浅海台地—潮坪	东吴 运动	
		龙潭组(吴家坪组)		P ₂ l (P ₂ w)	13~260	燧石灰岩,底为页岩		浅海台地		
	下 统	茅口组		P ₁ m	150~130	石灰岩,下部夹泥质灰岩	T _{P₁}	浅海台地	云南 运动	
		栖霞组		P ₁ q	100~130	石灰岩		滨岸		
		梁山组		P ₁ l	0~30	页岩夹砂岩		浅海台地—潮间		
石炭系	上统	黄龙组		C ₂ h	0~40	石灰岩或白云岩	T _s	潮坪—浅海	加里东 运动	
志留系	中下统			S ₁₋₂	800	黑色页岩、 灰绿色泥岩、砂岩		滨海—潮坪		
奥陶系	中下统			O ₁₋₂	14~296	上部生物灰岩, 下部石灰岩、白云岩				
寒武系	上统			Є ₃	888~230	白云岩				
	中统			Є ₂	204~245	泥质云岩夹石膏,底为泥岩				
	下统			Є ₁	368~1953	页岩及粉砂岩,顶为鲕灰岩				
震旦系		灯影组		Z ₂ d	117~1160	白云岩,下部夹泥岩				
		观音崖组		Z ₂ g	<800	砂、砾岩				

川西坳陷海相地层勘探程度很低,但从基本地质特征和自然地理及经济技术条件分析,对该区开展油气地质研究和勘探实践都具有重大的战略意义。通过类比川东北大型气田成藏条件并结合川西地区具体地质情况,目前中国石化西南油气分公司确定该地区以二叠系—中三叠统为近期勘探的主要目的层,厚度为 2800~3900 m,在川西陆相前陆盆地坳陷区埋深为 5000~8000 m,属超深层勘探领域。

二、川西海相勘探面临的主要地质难题

四川海相碳酸盐岩台地沉积结束后,在海相层系之上又叠合了晚三叠世海湾盆地和前陆盆地、侏罗纪至新近纪陆内坳陷盆地。伴随四川盆地的形成和演化,川西海相层系经历了作用强度、方式、规模各异的多期次构造运动,导致油气生、排、运、聚条件和机理及过程十分复杂,尤其对高温、高压、高演化

背景下的天然气保存状况尚不清楚,油气富集规律认识程度较低。

1. 生烃量和资源量计算问题

川西海相烃源岩能够生成巨大的油气量无疑,但是如何准确计算生烃量则决定于源岩有机质丰度下限、转化率、演化程度等参数的正确取值,从生烃量转化为资源量则取决于整个成藏过程。一个勘探领域的烃源和资源状况是勘探的基础,现有关于川西海相烃源岩的认识主要来源于川西坳陷北段钻井和龙门山逆冲推覆构造带前缘的地表露头,认识是粗略的,必须开展进一步的深入研究。由于川西坳陷北段和露头区抬升时期较早,烃源岩经历的地质作用和热演化程度明显不同于坳陷区主体部位。

(1) 有机碳含量(TOC)

龙门山前缘野外露头 65 个海相烃源岩样品最新实验分析资料表明(表 2),川西海相碳酸盐岩

表 2 川西海相露头烃源岩有机碳含量实验分析数据统计表

剖面地点	样品层位	岩 性	样品数(个)	有机碳含量(范围/平均值)(%)
广元	P ₁ m、P ₂ l、P ₂ d、T ₁ j、T ₂ l	石灰岩、云质灰岩、白云岩	12	0.02~0.23/0.05
江油	P ₁ q+m、P ₂ l、P ₂ c、T ₁ j、T ₂ l	石灰岩	14	0.01~0.18/0.08
	P ₂ l	碳质页岩	1	1.42/1.42
江油、什邡	T ₃ m、T ₃ t	泥页岩	6	0.55~0.97/0.75
大邑	P ₁ q、P ₁ m	石灰岩	4	0.02~0.13/0.0975
		黑色页岩	1	2.57/2.57
	P ₂ l	黑色、灰色页岩	2	1.21~2.57/1.89
	P ₂ l、P ₂ c、T ₁ j、T ₂ l	石灰岩、白云岩	8	0.02~0.013/0.071
峨眉	T ₃ m、T ₃ t、P ₁ m、P ₁ q	碳质页岩、泥岩	5	0.36~1.56/0.65
	P ₁ m、T ₁ j、T ₂ l、P ₁ q	石灰岩、白云岩	12	0.01~0.3/0.10(0.3 只有一个样品)

注:据曾华盛,样品采集与分析由中国石化勘探开发研究院无锡所 2007 年 3 月完成。

TOC 普遍很低,若按照烃源岩评价新标准^[4],取 TOC 下限值为 0.3%,则川西海相碳酸盐岩基本不能成为烃源岩;取泥质烃源岩 TOC 下限值为 0.5%,则只有二叠系泥页岩达到良好烃源岩标准,其他层段泥页岩仅在下限值附近,为低丰度源岩。

根据龙门山推覆带钻探到龙深 1 井碳酸盐岩岩心样品实测^①,中三叠统天井山组 TOC 为 0.19%~0.31%,平均为 0.28%;雷口坡组 TOC 为 0.05%~2.76%,平均为 0.26%。即无论是井下还是露头,川西海相碳酸盐岩 TOC 平均值均不能达到烃源岩下限标准。有机碳含量下限值是圈定烃源岩范围最重要的参数之一。川西坳陷中坝中三叠统雷口坡组油气源对比显示,雷三段气藏属自生自储型天然气藏,所测得的雷三段藻白云岩 TOC 为 0.1% 左右^[5],说明若以下限值 0.3% 计算生烃量,将有大量能够生烃的岩石被排除在外,由此降低勘探潜力评价。因此,川西坳陷海相碳酸盐岩烃源岩的有机质丰度下限是一个需要深入研究的问题。

(2)热演化

川西坳陷中段的川合 100 井中三叠统雷口坡组顶 R₀ 为 2.32%,马深 1 井上三叠统须家河组二段(井深 5400 m)最大热解峰温高达 600℃,R₀ 为 3.1%,由此推测海相烃源岩可能全部进入了过成熟干气演化阶段。根据川科 1 井钻前预测^②,区内主要的海相烃源岩下二叠统顶面埋深在 8400 m 左右,以海相古地温梯度 2.6℃/100 m 粗略计算,中、下三叠统总厚度约为 2490 m,到达上二叠统顶面深度将增加地温约 65℃,预计 R₀>3%。热模拟实验表明^[6]:当烃源岩 R₀>2.5% 时,源岩的油气总产率已占终极产率的 85%;当气源岩 R₀>2.8%,气源岩已经无效。从而,讨论川西坳陷的寒武系与二叠系烃

源岩作为气源的重要性已经不重要。由于海相一般以成油有机质为主,具有“接力”生气作用(李明诚,2006),即在高温作用下,油藏可裂解为天然气,油裂解后的残渣继续生气,直至焦沥青还可生成少量天然气。所以,海相层系不缺乏气源,而追踪古油藏的分布及寻找次生气藏则成为川西海相油气分布规律研究的重要内容。正因为川西海相存在着“接力”生气问题,因而在资源量计算时的有机质转化率参数就被复杂化了,应该进行分段取值,综合考虑。

(3)排聚系数

排聚系数又称聚集系数或运聚系数,是计算资源量的关键参数,常用的资源量计算方法是通过计算生烃量后乘以排聚系数得到资源量。国内排聚系数取值范围油气分别为 1%~10% 和 1%~10%,而事实上这一取值范围是不科学的,它仅能满足决策者对实际勘探区任一资源量期望值的主观要求^[7]。我国含油气盆地多为叠合盆地,由于这类盆地构造变动大,油气运聚过程中的损耗量大,且随不同的地质条件而改变,采用一个笼统的排聚系数来概括油气聚集及耗散作用的类比方法是不成立的^[8]。

川西海相层系仅中三叠世以来就经历了 10 余次构造运动,造成的构造破坏烃量如何计算? 油气最终聚集量应该是生成量与各种耗散量之差,而这种耗散除构造破坏烃量外还包括烃源岩的残留、运载层滞留、运移流散如围岩吸附、水溶流失、扩散量等等。此外,还存在多源、多期生排烃作用及原油裂解成气作用,不同构造时期和不同地球物理化学环境下的耗散量如何确定? 这是该区勘探中面临的高难度基础性研究课题。当前川西海相天然气资源量计算的排聚系数取值为类比得到的 6.5%(上二叠统)、5.5%(下二叠统)、3.5%(下寒武统),其科学性

有待探讨。

2. 油气聚集特征不清

碳酸盐岩的孔渗物性一般都比较差,只有在产生次生孔隙、裂缝和白云岩化的部位才有所改善。因此,碳酸盐岩中的油气运移和聚集主要受这些部位控制,而这些部位又多与古剥蚀面、古岩溶带、古潜山、古生物礁和白云岩化带有关,所以碳酸盐岩中的油气聚集直接与这些地带的时空分布密切相关,从而构成了碳酸盐岩的油气聚集特征(李明诚, 2004)^[9]。川西坳陷自古生代以来经历了加里东、云南、东吴、印支、燕山、喜山期等构造运动,这些构造作用与油气成藏的关系尚待开展精细研究。川西坳陷海相各层系的原油何时生成、生成多少? 原油何时裂解? 初次运移特征和二次运移规模、途径、相态如何? 是否存在古岩溶带? 不整合面及其分布与油气运聚的关系如何? 有无台地边缘古生物礁、滩、白云岩形成的条件? 区域构造和局部构造形成时期与油气生成运移时期的空间匹配条件如何? 输导体系和圈闭类型、特征如何……与油气聚集有关的很多问题目前并不清楚,已经形成的初步认识也待勘探验证和深化。海相成藏机理、成藏体系、富集规律问题是川西海相勘探亟待开展研究的重大课题。

区域古隆起是控制海相油气富集规模和分布的主要因素。以往的研究表明,川西坳陷存在3个古隆起,自北而南为江油印支期古隆起、绵阳—德阳燕山期古隆起、成都—乐山燕山期古隆起(图1)。根据上三叠统底部马鞍塘—小塘子组生排烃高峰为印支中期^[10]来推测,其下伏埋深超过6500 m 古生界烃源岩排烃高峰应在印支期以前,故川西坳陷2个较大的燕山期古隆起形成时已经错过了海相源岩排烃的最佳时期,如果在原油排烃高峰期川西大部分地区并无相应的古隆起存在,大量的石油将漫散在地层中不能相对聚集;直至燕山期隆起形成时,保留在地层中的石油裂解时才发生天然气聚集。那么,能

够作为气源的漫散原油或沥青还有多少? 是否存在以古油藏为气源的高效气源灶^[11]? 古隆起的幅度、面积、储集空间有多少? 这些都是进行川西海相油气勘探必须回答的问题。否则,对川西海相天然气的富集规律将无从认识。

在目前世界30个埋深超过4000 m 的深层大油气田中,碳酸盐岩占了24个,其中18个属于白云岩储层。四川盆地的五百梯、威远、卧龙河气田,鄂尔多斯盆地中部大气田,华北任丘古潜山等大型油气田的产层均为古生界白云岩^[12],普光气田的主力储层也是下三叠统鲕粒白云岩。可见要在川西海相领域寻找大中型气田,认识该区白云岩储层的形成条件和分布规律是至关重要的,但目前还尚未开展相关专题研究。

3. 海相油气的保存条件不清

中国南方海相碳酸盐岩时代老,古埋深大,有机质热演化程度高,油气成藏后的保存条件是决定勘探成败的关键。这在川西坳陷也不例外。川东北海相碳酸盐气田的发现,证实了发育白云岩孔隙型储层和厚大膏盐层(最大累计厚度700余米)是气藏形成的主控因素,而川西坳陷区海相膏盐层的特征与分布尚无钻井揭示,地震剖面上目前尚未见到连片膏盐地层的响应特征。如果坳陷区内没有具一定厚度和分布范围的膏盐岩发育,实现天然气勘探大发现将会有较大风险。据龙门山推覆带龙深1井揭示,海相中三叠统雷口坡组四段发育石膏岩(厚104 m),下三叠统嘉陵江组四段+五段发育石膏岩+膏质云岩(厚185 m),但是预测这两套盖层延伸到川西坳陷中段孝泉地区均相变为以局限海台内滩和藻屑滩为主的沉积^①。因此,川西中段中石化探区的海相膏盐岩分布还有待于下一步勘探中加以查明。

作为油气盖层,泥页岩是除膏盐岩之外的另一类盖岩,川西海相地层上覆堆积了巨厚的陆相碎屑岩,其中的泥页岩对海相油气的封闭性如何,怎样进行定量评价是又一难点。物性盖层封闭机制的核心是毛细管封闭,毛细管能够封闭流体则是由润湿性决定的。水润湿的泥页岩不能阻挡水的流动,反之,油润湿的泥页岩也不能阻隔油气^[12]。由此可知,川西地区无论是海相或陆相地层中能够作为烃源岩的泥页岩,由于经历的油气生成作用已经使岩石的润湿性由水润湿改变为油润湿,导致毛细管封闭能力降低或完全丧失。除了侏罗系红层,川西地区不同时代的泥页岩能否成为区域性盖层? 其封盖性能如何? 应当怎样认识和评价其对海相油气的保存作

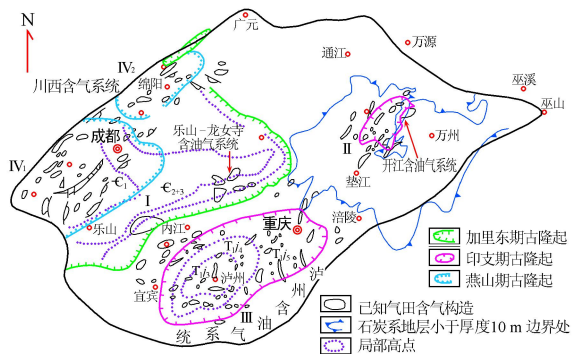


图1 四川盆地古隆起分布示意图(据汪泽成, 2002)

用?这是一系列需要探讨的基础地质问题。

众所周知,天然气成藏时期越晚越有利于气藏的保存。气藏一旦形成,其破坏作用也就开始了,如果没有后续气源的持续补充,仅扩散和渗漏作用就能够导致一个埋藏深度为4000 m、孔隙度为20%、充满度为100%、厚度为10 m的甲烷气藏在12.68 Ma内全部损失(盖层扩散系数为 $n \times 10^{-6}$)^[6];统计资料表明^[12],大油田的地质储量有可能在18~27 Ma内漏失殆尽,气田的散失就可能更快;据韩克猷^[9]研究,古近纪川东地区上石炭统聚气量达 $1.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,由于后期各种破坏作用使现今总探明储量仅为原聚气量的1/4~1/5。上述事实表明,对于成藏早、演化高、后续气源补充条件不清楚的川西海相领域,深入研究和正确认识保存条件是勘探潜力评价的关键要素,其中核心是油气生、聚、散动平衡问题。

三、攻关方向与技术对策

1. 攻关方向

上述川西海相勘探存在的地质难题分析说明,目前对这个领域的认识程度还很低,大量的基础地质特别是成藏地质科研工作尚待开展,如不加快攻关进度,必将严重降低勘探成效。在海相基础地质和成藏地质研究方面,笔者提出攻关主要方向如下。

(1) 烃源—资源:主攻海相各烃源岩层系的排油高峰、储层中原油裂解成气高峰和排聚系数。

(2) 储层:主攻白云岩化条件和机理,寻找孔隙型白云岩分布区带。

(3) 保存条件:主攻膏盐岩沉积环境和分布空间,其他类型盖层的封闭机理与宏观及微观评价。

(4) 聚集条件:主攻历次构造运动在川西地区的活动强度、影响范围、叠加影响,查明大型古构造、古油藏的分布;研究不同地质时期油气相态转化和运移输导体系(断裂、不整合面、输导岩层特征与空间组合)及圈闭条件;定量研究确定沉积间断(不整合面)对油气生成与演化、运移、散失的影响;研究现今圈闭与古构造、古油藏的关系,评价勘探潜力,选择勘探目标。

(5) 川西海相油气成藏地质理论:形成以构造演化为主线,以烃源、储层、保存为重点,强调以各种成藏因素动态演变、时空匹配为特色,包含叠合盆地构造演化、构造特征、油气成藏机理、成藏模式、富集规律、圈闭特征等内容的地质理论。

(6) 川西海相油气地质分析评价方法技术系列:包括盆地演化与古构造分析技术、高演化海相油气

生成机理与油气资源评价技术、白云岩形成环境分析与储层分布预测技术、海相油气成藏期与运聚机理分析技术、高演化天然气运聚散动平衡分析技术、海相油气保存封盖条件分析与评价技术、海相油气圈闭分析与评价技术。

2. 技术对策

结合川科1井的实施和“十一五”期间在川西地区实施5条二维地震测线勘探,笔者提出针对川西海相地质难点攻关的技术对策如下:强化盆地构造演化与恢复研究,重视油气成藏有机地球化学实验分析与研究,引进和培训油气成藏地质综合研究高层次人才,加大基础地质研究投资力度,设立一批围绕海相油气成藏地质理论和地质分析评价方法技术系列的专项研究课题,不要大而全,应强调专项攻关、各个击破。力争用3~5 a的时间,形成较为完善的四川盆地海相油气成藏理论体系和配套分析研究评价技术系列。

为此,建议开展如下专项攻关。

(1) 古生代以来四川盆地的构造演化及与油气成藏的关系研究。

(2) 古生代以来川西地区古地温场形成与演化研究。

(3) 川西地区中、古生代沉积—岩相古地理及生、储、盖岩空间分布研究。

(4) 川西海相高效烃源岩评价指标研究。

(5) 海相碳酸盐岩动态生—排烃机理研究。

(6) 川西海相多期多源油—气—源对比及方法技术研究。

(7) 川西海相油气生—运—聚成藏体系研究与评价。

(8) 川西海相油气生—运—聚—散动平衡评价系统研究。

(9) 川西海相油气资源量计算的排聚系数研究。

(10) 叠合盆地高演化油气保存条件研究。

(11) 川西海相储层成因机理与分布规律研究。

(12) 川西海相油气圈闭成因机理与勘探技术研究。

(13) 川西海相油气藏成藏模式与勘探目标预测。

四、结束语

川西坳陷海相层系是中石化“十一五”期间的勘探新领域,初步研究认为,该领域具备天然气勘探潜力。但由于勘探刚起步及叠合盆地复杂的构造演化历史、多期多类型多源成藏、油气高演化、超埋深等特定地质条件的存在,使该区在天然气勘探中面临

一系列基础地质和成藏认识难题尚待解决。这些问题集中体现在烃源—资源、油气聚集条件、保存条件3个方面的各个环节。为此,加强基础地质研究和成藏地质研究,加大研究投资力度,培养和引进高层次人才,做深做细各专项研究工作是正确认识川西海相油气富集规律,指导海相天然气勘探部署,提高勘探成效的必由之路,也是提高企业科技创新能力和水平的契机。

成文中参考的内部资料如下:①魏力民、熊亮、刘大成,《四川省彭州市大园包构造龙深1井钻后评估报告(二稿)》,中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,2007;②杨克明、张晓鹏、李书兵等,《四川盆地川西坳陷油气探井(川科1井)地质设计》,中国石化西南油气分公司,2007。

参 考 文 献

- [1] 蔡希源.中国石化油气勘探回顾与展望[J].石油与天然气地质,2006,27(6):715-721.
- [2] 郭正吾,邓康龄,韩永辉,等.四川盆地形成与演化[M].北京:地质出版社,1996:113.
- [3] 王庭斌.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,2005,32(4):1-6.
- [4] 秦建中.中国烃源岩[M].北京:科学出版社,2005:229.
- [5] 曹慧缙,叶军,关孝如,等.海相碳酸盐岩油气生成与演化初步研究[C]//中国南方油气勘探新领域探索论文集.第3集.北京:地质出版社,1988:112-124.
- [6] 廖永胜.高一过成熟气源岩评价的若干问题[J].石油勘探与开发,2005,32(4):147-161.
- [7] 庞雄奇,金之钧,姜振学,等.叠合盆地油气资源评价问题及其研究意义[J].石油勘探与开发,2002,29(1):9-13.
- [8] 姜振学,庞雄奇,金之钧.门限控烃论作用及其在有效烃源岩判别中的应用[J].地球科学,2002,27(6):689-695.
- [9] 韩克猷.川东开江古隆起大中型气田的形成与勘探目标[J].天然气工业,1995,15(4):1-5.
- [10] 杨克明,叶军,吕正祥.川西坳陷上三叠统成藏年代学特征[J].石油与天然气地质,2005,26(2):208-212.
- [11] 赵文智,王红军,王兆云,等.中国天然气高效成藏的内涵及意义[J].天然气工业,2006,26(12):6-14.
- [12] 李明诚.石油与天然气运移[M].北京:石油工业出版社,2004:159-319.

(修改回稿日期 2007-11-26 编辑 居维清)