

文章编号: 1000-0550(2012)01-0166-13

# 中国西部叠合盆地油气多期成藏模式及勘探有效性<sup>①</sup>

康德江 姜丽娜 张金友

(大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

**摘要** 我国西部叠合盆地油气资源丰富,随着勘探难度逐年增加,如何准确定位有利成藏区带对增加勘探成功率至关重要。通过对比叠合盆地主要大中型油气田发现,叠合盆地大都为多期成藏,且晚期成藏有利于油气规模化保存。在大量总结叠合盆地多个油气成藏过程、特点和模式的基础上,结合研究区带的构造演化特点,按照叠合盆地构造变动模式划分,将西部叠合盆地油气多期成藏模式划分为5种,分别是油气连续充注型、早期强烈改造型、中期强烈改造型、晚期强烈改造型和多期充注改造交替型。在晚期成藏有利于油气勘探的前提下,分析认为具有油气连续充注型油气成藏的区域和周边地区由于构造变动轻微,破坏幅度最小,因此油气藏类型较多,规模化可能性最大,最具油气勘探有效性,而多期充注改造交替型成藏模式在构造变动频繁剧烈的影响下,使得油气藏破坏量较大,保存下来的可能性很小,因此也最不具备勘探有效性,此类地区应该尽可能规避。

**关键词** 叠合盆地 多期成藏模式 勘探有效性 晚期成藏 构造变动

**第一作者简介** 康德江 男 1978年出生 博士 石油地质学 E-mail: kdj78721@163.com

**中图分类号** P618.130.2 **文献标识码** A

叠合盆地内的油气藏经过了多年理论研究和实际勘探,已经在很多领域取得了巨大突破,如塔里木盆地的塔中构造带、库车前陆盆地和准噶尔盆地的腹部及西北缘等地区,与此同时也相应的形成了一系列的油气勘探理论和方法,如“梁控论”、“断控论”和“油气复式聚集论”等,这些方法都为叠合盆地油气藏的勘探开发起到了重要作用。但随着勘探实践的不断深化,逐渐发现很多先前形成的理论在指导预测的准确性方面发生偏差的概率越来越明显。经过勘探家们的不断研究探索,发现的众多油气田(藏)中,有绝大部分都是经过了多期调整改造后的“二次复合”油气田(藏),这些油气资源在经历多期不同的构造变动调整改造后,在不同时期、不同地点以不同的方式聚集成不同类型和规模的油气藏。那么,究竟在什么样的地方可能形成规模性的油气藏就成为了一个亟待研究解决的问题。因此,本文依托中国石油大学(北京)973项目首席科学家庞雄奇教授为首的研究课题,有针对性的、综合地分析研究了复杂叠合盆地油气成藏的主要影响因素,在构造变动研究的基础上,充分开展对叠合盆地油气多期成藏研究,总结出适合油气多期聚集成藏的区域,建立多期成藏的油气运聚模式,对确定油气勘探有效性和增加勘探准确性方面应该具有一定的借鉴意义。

## 1 多期成藏研究的实际意义

众所周知,复杂叠合盆地经历了多次构造变动,盆地构造格局发生了剧烈变化,这对于常规的固体矿产来说,影响的作用并不是十分明显的,而油气资源其可流动性特点的驱使下,其成藏的多方面都受到了强烈影响。每一次的构造叠加都会使原有油气藏不但会发生空间上的转移,而且会导致油气性质上的质变,更有甚者对造成油气资源在量上的巨大损失,当然同时也有可能产生新的油气聚集成藏。以塔里木盆地为例,截止到目前,众多学者都对其海相地层成藏期次进行了多项研究,尽管在具体期次上存仍在有不同的见解(表1)<sup>[1~15]</sup>,但可以肯定的看出,塔里木盆地海相油气藏具有典型的多期油气调整聚集成藏的特点。

此外,从塔里木盆地和准噶尔盆地油气资源量的分布状况看(图1),两大叠合盆地资源量在坳陷区和隆起区都有较大量的分布,而且在各个地质时期都有不同规模的保存,且时期越晚,资源量富集的规模也越大,这既是由于油气自身运移特点决定的,另外一个重要原因就是后期的构造变动过程中,油气经过多期调整改造,在目前最终定位的区域聚集成藏。以准噶尔盆地中央坳陷为例,其内部资源量在最早形成

<sup>①</sup>国家重点基础研究发展规划(973)项目(中国西部典型叠合盆地油气成藏机制与分布规律)(2006CB202300)研究部分成果。  
收稿日期:2010-09-30; 收修改稿日期:2011-01-30

表 1 塔里木盆地海相地层油气成藏期次汇总表(据陈元壮 2005)

Table 1 Summary of marine reservoir formation in Tarim Basin (from Chen Yuanzhuang, 2005)

研究学者	研 究 结 果 分 期				
贾承造 (1995)	喜马拉雅期		印支期—晚海西期	早海西期	
周兴熙 (1995、2000)	近期 (N <sub>2</sub> 至今)	晚期 (J <sub>3</sub> —N <sub>1</sub> )	中期 (P-T)		早期 (S <sub>3</sub> -D)
康玉柱 (1996)	喜马拉雅期	晚燕山期	印支—早 燕山期	晚海西期	早海西期
王金琪 (1996)	晚喜马拉雅期			晚海西期	早海西期
李小地 (1996)	喜马拉雅期		晚海西期—印支期	早海西期	
周小进等 (1997)	喜马拉雅期	印支—燕山期	晚海西期	早海西期	
康志宏等 (2001)	印支—喜马 拉雅期			海西晚期	晚加里东期
张水昌等 (2000)	塔北	喜马拉雅期	印支—燕山期		晚加里东期
	塔中	燕山期 (主体 E)		晚海西期 (P <sub>2</sub> )	晚加里东期
刘洛夫等 (1998, 2000)	喜山期		K 沉积前		晚加里东期
张光亚等 (2003)	喜山期		晚海西期		加里东—早海西期
李宇平等 (2002)	K—E				S 末期

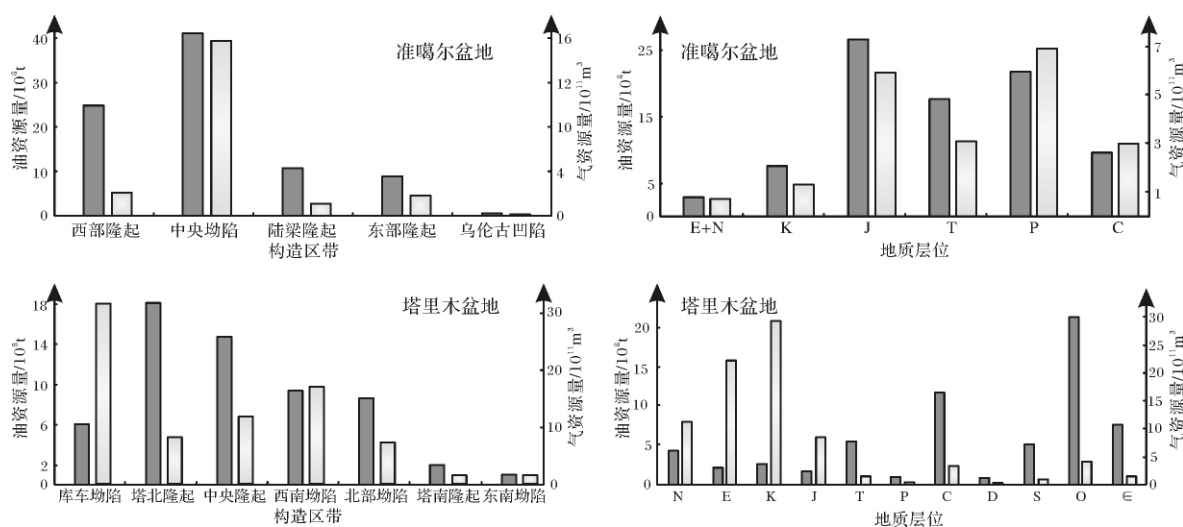


图 1 塔里木盆地与准噶尔盆地油气资源量平面和纵向分布柱状图

Fig. 1 The plane and vertical distribution histogram of oil and gas resources in Junggar Basin and Tarim Basin

聚集时,要远远大于目前状况,就是由于后期的车莫古隆起的形成发展<sup>[16]</sup>,导致了油气在空间上发生调整,在分化形成的小型隆起和北部的陆梁隆起内聚集形成目前的油气田。这些情况的出现,都是由于油气多期成藏导致的直接结果;又如轮南地区,其下古生界中发育了3期沥青<sup>[17]</sup>。换言之,这些古生代形成的油气藏经历了3期运移。所以,由于多期构造叠加、多期生烃和多期成藏,叠合盆地很多油气藏在经

历了不同程度的调整改造后,形成了有成因联系的一系列调整改造型隐蔽油气藏<sup>[18-24]</sup>。而塔中低凸起上志留系广泛分布的沥青砂岩则是多期成藏导致油气藏大量破坏的典型反面实例。

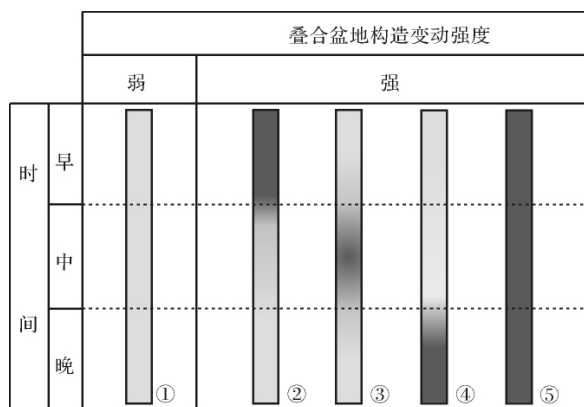
大量实例说明,叠合盆地内的油气藏最终聚集时间、空间和规模并不完全遵从于经典的油气运聚规律,在构造变动的强烈影响下,可能会产生与以往理论看似相悖的现象,这一点与简单的原型盆地有明显

差异,因此叠合盆地内油气藏在伴随着后期构造变动的强烈影响下,会在什么地方“定居”下来?会在什么样的地质层位保存下来?又会在什么样的地质时期后稳定下来?这些问题的答案将直接关系到能否在以后找油过程中找得准、找得大。因此,只有建立起叠合盆地内的油气多期运聚成藏模式,才能对油气藏最终形成的时间、地点和规模给予准确的定性回答。

## 2 油气多期成藏模式建立

### 2.1 多期成藏模式的建立标准

叠合盆地内,油气的多期成藏大都是与其长期频繁的大幅度构造变动具有密切的联系。但不同地域的叠合盆地都有其各自独特的构造发育史。通过对西部复杂叠合盆地大量油气藏的生、排烃以及油气运聚过程分析,综合前人以往丰富的研究成果,认为构造变动强度的不同是决定叠合盆地成藏模式差异的主要因素。因此,按照构造变动强度大小差异的划分原则,结合构造变动发生的相对地质时期,在对复杂叠合盆地构造变动类型、特征和变动模式的研究分析基础之上,将油气多期成藏建立起相应的5种基本模型(图2):即①油气连续充注型;②早期强烈改造型;③中期强烈改造型;④晚期强烈改造型;⑤多期充注改造交替型。



①油气连续充注型; ②早期强烈改造型; ③中期强烈改造型;  
④晚期强烈改造型; ⑤多期充注改造交替型。

图2 复杂叠合盆地油气成藏模式分类标准

Fig. 2 Hydrocarbon accumulation pattern classification of superimposed basins

图2所示的叠合盆地油气成藏模式分类标准主要是考虑的构造变动强度的大小和发生时期,因为这两点是直接关系到油气成藏的规模和大小的重要因素。

而且,此处必须要着重说明的是,其中所涉及到的构造变动强度的大小和发生的时间,如早、中和晚,是一个相对的概念,是相对于每一个具体的研究目标而言的。因为任何一个盆地所经历的构造演化都是具有个性的,尤其是我国西部的塔里木盆地和准噶尔盆地,两大盆地虽然在地理位置上仅为天山相隔,空间上并没有过大的距离,但是两者在盆地的构造演化史上却存在较大的差异。目前的研究认为,塔里木盆地是一个以寒武系为基底发生发展起来的大型叠合盆地,经历了加里东运动、海西运动、印支运动、燕山运动和喜山运动等五次较大规模的构造运动,每一次的构造变动都对塔里木盆地的已有地层产生了重要的影响。而准噶尔盆地是在石炭系火山岩基底上发育起来,由于基底时代较塔里木盆地新,仅经受了自晚海西期以来的近四次的构造运动,对盆地发育影响最大的两个时期分别分布在晚海西期和燕山期。因此,由于盆地的发育史不同,假如不按照每个研究目标的具体情况划定相对强度大小和发生的相对时期,那么相对于塔里木盆地来讲,整个准噶尔盆地的发育过程都位于中后期,而实际上这是一个不正确的比较。又由于每一个叠合盆地发生构造变动的原因不同,其强度大小也不尽相同。比如塔里木盆地在早奥陶世末期海退及南北向挤压的背景下,塔中地区进一步隆升并遭受剥蚀。晚奥陶世末期,在塔中地区表现为大规模的挤压作用,使塔中地区中上奥陶统地层抬升并遭受一定程度的剥蚀。加里东晚期运动使志留系地层隆升并遭受剥蚀。这些构造运动的发生,使得塔里木盆地的各个不同区带遭受了不同程度的剥蚀,其在自身盆地的尺度内,无论是横向和纵向都具有一定的可比性。而要是用其与在新近纪以来发生的喜马拉雅运动导致准噶尔盆地腹部车莫古隆起消失且翘倾的构造强度相比,就没有任何可比性,两者也无从对比。

### 2.2 多期成藏模式的建立

#### 1) 油气连续充注型

任何油气藏的形成都是一个连续且连贯的过程,如果在一个地区能够长期稳定的接受一个油气源的烃类供给,那么势必会形成一个具有规模的油气藏,那么油气连续充注型的多期成藏就是此类。所谓的油气连续充注型是指由于构造变动的性质相对稳定,造成该区域内油气的形成具有连贯性,且能过长期的向外排烃,形成连续性的油气动态充注,其最大的特点就是供油气能力较强,不但能够形成常规油气,而

且可以形成高温裂解气藏等(图3)。但不利的是,由于相对稳定的构造条件,在研究区的腹部中心地带,长期以沉降为主,很少形成具有规模性的大型构造圈闭,如隆起和断块类圈闭,因此,形成的大量烃类常常会在周边及上覆相对较浅的层位聚集成藏。当然,在特殊的储集类型中,如塔里木盆地寒武系—奥陶系内部的碳酸盐岩储层,礁滩相次生储集空间也可以形成一定规模的油气藏。

如图3中所示,此类地区往往由于构造变动强度较弱,后期的改造作用基本上对油气成藏没有过多影响。各个成藏期内可能存在一定的剥蚀作用,但这对于盖层的保存作用并没有造成大的影响。油气形成以后,在油气自身作用力的影响下,输导体系将其运送到周边及上覆地层聚集成藏。但随着埋藏的进一步增强,烃源岩的演化程度也在随之增强,成熟度过高的烃源岩进入到了大量生气阶段,同时早期形成的聚集于中部的油藏埋深加大后,原油在高温下发生裂解形成裂解气,迅速向上部扩散,在相对浅部聚集成藏为凝析气藏,这也就是此种类型的最大特点。以塔里木盆地满加尔凹陷为例,它是塔里木盆地重要的生烃凹陷之一,从构造演化上就可以反映出它的总体构造变动强度是属于相对较弱,长期处于拗陷的态势。从油气运聚成藏的角度来看,该区的主要特征是油气的多期次供给,存在较大数量的裂解气的存在,油气大都聚在上部或凹陷的周边部位,自生成藏规模有限,这一点主要是由于拗陷长期深埋,造成烃源岩过成熟和多期成熟的结果。比如下奥陶统生油层是满加尔拗陷的主力源岩,其在泥盆纪末生油气区主要分

布在拗陷西部,生油范围主要分布在轮南与哈拉哈塘—英买力以南的满加尔凹陷西北部(图4)。在此两带的外围为油气共生区,共生区东侧为湿气生成区。但随着时间的推移,经过了古生代至新生代末期,除英买10井北局部地区已无纯油生成外,大部分地区为湿气生成带。这是一个典型的由于持续埋藏导致的油气连续充注的油气多期成藏实例。

## 2) 早期强烈改造型

与晚期强烈改造相对应的复杂成藏模式就是早期的强烈改造型成藏模式。该成藏模式是相比晚期的构造运动对油气藏的调整破坏来讲,早期的强度更大,范围更广,程度更高。通常情况下,在早期由于强烈的构造变动,使得盆地内先期排出的油气没有办法聚集在合适的圈闭中成藏,或者在成藏后的短时间内,由于强烈的剥蚀等次生作用使得油气藏难以大规模的保留。在这种情况下,往往导致地层大量剥蚀甚至缺失,圈闭的完整性不强,烃源岩由于构造变动的抬升而无法长期处于成熟排烃状态,因此生排烃量相对有限。同时,由于强烈的构造运动导致内部断裂系统相对发育,往往会形成多条通天断裂,直接导致油气藏的大量散失,所以早期一般难以形成大规模的油气聚集成藏(图5)。在剧烈构造变动调整改造后期,运动趋于平稳,处于埋藏稳定阶段,早期的不整合面和断裂上方常常覆盖有较好的沉积盖层,尽管也存在一定程度的风化剥蚀,但强度相对较小,这使得下伏油气藏得以保存,同时稳定的构造沉降也使得深部烃源岩能够继续的生排烃,在断裂和不整合面的输导下聚集在早期被破坏掉的油气圈闭或空圈闭中聚集成

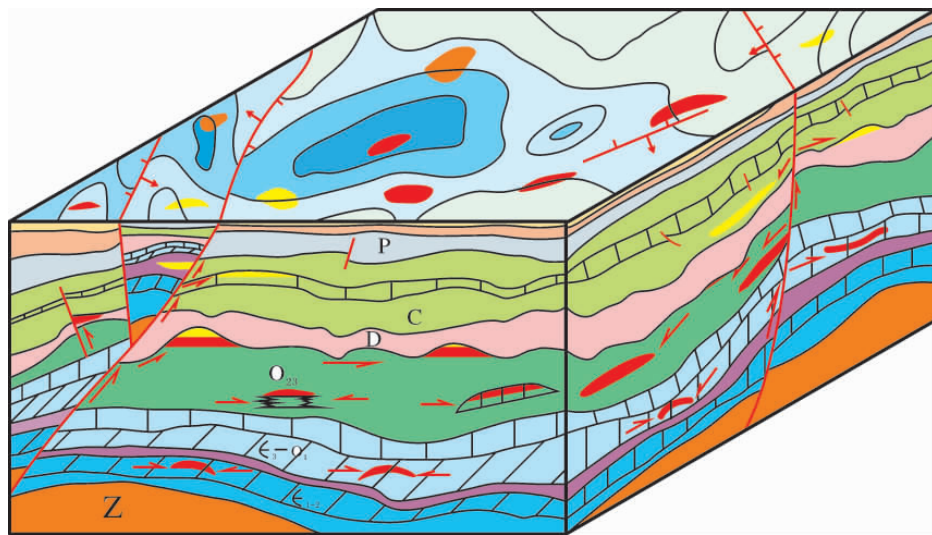


图3 复杂叠合盆地油气连续充注型多期成藏模式

Fig.3 Continuous charge multi-stage accumulation model of superimposed basins

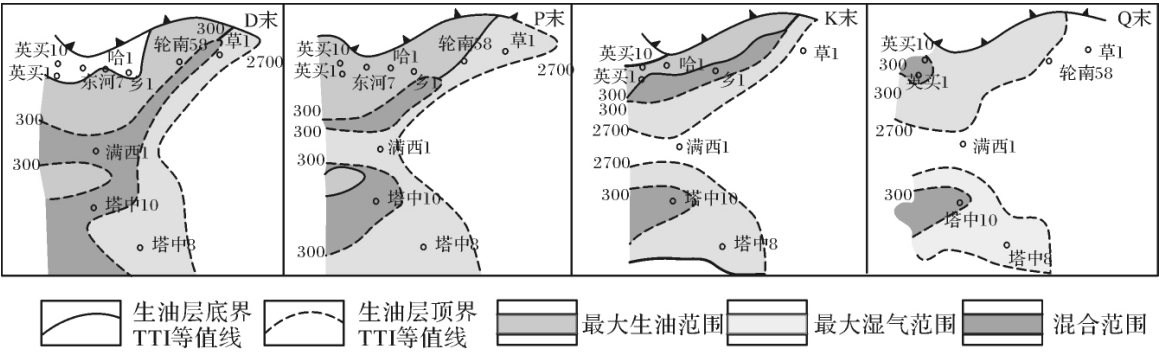


图 4 满加尔坳陷下奥陶统最大生油气范围发展演化图<sup>[8]</sup>

Fig. 4 Ordovician evolution plan of the largest oil and gas range in Manjiaer depression<sup>[8]</sup>

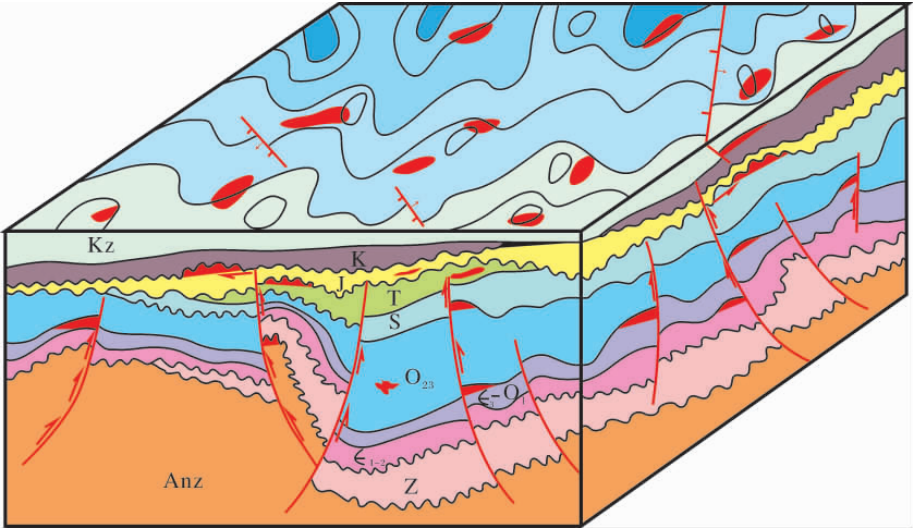


图 5 复杂叠合盆地早期强烈改造型油气成藏模式

Fig. 5 Accumulation model of strongly reworked in early period of superimposed basins

表 2 塔里木盆地塔中凸起油气藏的形成与改造期次(据王子煜 1998)

Table 2 Times of reservoir formation and transformation in Tazhong area of Tarim Basin( from Wang Ziyu 1998)

时代	Є	O <sub>1</sub>	O <sub>2+3</sub>	S-D	C	P	T	J	K	E	N	Q
圈闭形成期		I 期					II 期					
油气藏形成期			I 期				II 期					
油气藏改造期				I 期		II 期				III 期		

藏。这样就形成了早期强烈改造、晚期连续充注的成藏格局。

根据王子煜<sup>[27]</sup>的研究,塔中含油气系统经历了 3 个成藏期:即晚加里东期、早海西期和喜山期(表 2)。下古生界含油气层系形成油气藏的主要受保存条件的制约,由于早期构造运动的强烈破坏,如泥盆

纪末期,使得早期形成大规模志留系油气藏遭到重创,强烈的构造运动使第一期形成的油气藏由于地层隆升而被破坏。奥陶系、志留系中普遍存在的沥青就是最直接的证据。然后,后期新生界的快速覆盖也促成了上二叠统层位中大套泥岩欠压实超压带的形成,有效地阻挡了 T 号不整合面以下海相油气的上逸,



为塔中4井亿吨级(大型)、塔中1井中等规模的油气聚集创造了条件<sup>[9]</sup>。因此,总体上来讲,晚期强烈充注型油气成藏基本上是在对早期大规模破坏油气藏的调整和晚期新形成油气藏的综合下完成。

### 3) 中期强烈改造型

其含义是指油气在生成排出后,能够顺利的进入到油气圈闭中聚集成藏,在成藏期后,经历了多期的构造变动调整,但由于调整改造的幅度并不强烈,因此使得每一次油气藏都会有一定程度的改造或是散失,但并不是致命性的破坏,而由于最近一期的成藏事件没有经历过多地质变动,故此,此类的油气成藏特征是多期的油气聚集,但以晚期贡献为主。在西部复杂叠合盆地的演化进程中,持续埋深作为长期供烃的深凹地区并不是现今最为重点的勘探领域,事实证明,在这类地区往往发现的油气藏不论是在数量和规模上都明显小于周边构造变动增强的地区。而向构造变动强度最大区域过渡的第一个类型就是多期轻微改造型。这种类型的油气成藏是首先在烃源岩上覆或周边形成原生油气藏,随着构造变动产生的剥蚀等次生作用,发生轻度的调整和破坏,但影响不大,大都是空间位置没有明显变化,油气性质变化不大,只是发生一定的油气调整到上覆地层,发生混源现象。但由于总体上的构造运动作用仍不是很强,故此,使得不论是圈闭幅度、类型和数量都明显不够成熟,因此使得此类成藏的规模和数量常常受到限制(图6)。

多期成藏轻微改造型的典型代表就是塔里木盆

地的和田古隆起。和田古隆起位于塔里木盆地的南缘,麦盖提斜坡的中东部。由于构造变动的持续轻微往复,使得和田河古隆起及周边地区发生过三期主要的生排烃及油气聚集成藏事件<sup>[13]</sup>,生油层经历了三次生烃高峰期:奥陶纪主体出现第一次生烃高峰期,此时由于烃源岩处在隆起主体部位,因此,烃类保持处于一种低熟—成熟早期阶段,主要以生成油类为主,此时生成的油气聚集量很小,大部分散失。其后来自寒武系一下奥陶统烃源岩的油气,在晚二叠世进入生油高峰,高峰期生成的油及高一过成熟阶段生成的气沿塔西南古隆起遭受破坏后形成的风化壳由北向南运移,进入志留—泥盆纪、二叠—三叠纪形成的圈闭,聚集在古隆起顶部,形成古油气藏<sup>[25]</sup>。在喜马拉雅运动期挤压作用和前陆盆地地质背景下,由北倾变为南倾,寒武系一下奥陶统烃源岩进入过成熟热演化阶段,形成干气。干气沿断层向上运移,聚集在石炭系储集层中,形成玛4等气藏(图7)。

### 4) 晚期强烈改造型

晚期强烈改造型油气成藏模式是指盆地在早期的油气生成、聚集都是一个相对稳定的环境,但随着发展到中后期以后,盆地发生大规模的构造变动,早期油气藏发生大规模的调整改造作用,形成新的油气聚集。其中,包括新生成的油气聚集上覆地层形成的原生油气藏,同时更多的是下伏古油藏在各种条件的配合情况下调整到上覆或周边地区聚集成藏。由于晚期强烈的改造作用,前一种原生油气藏不多,大都

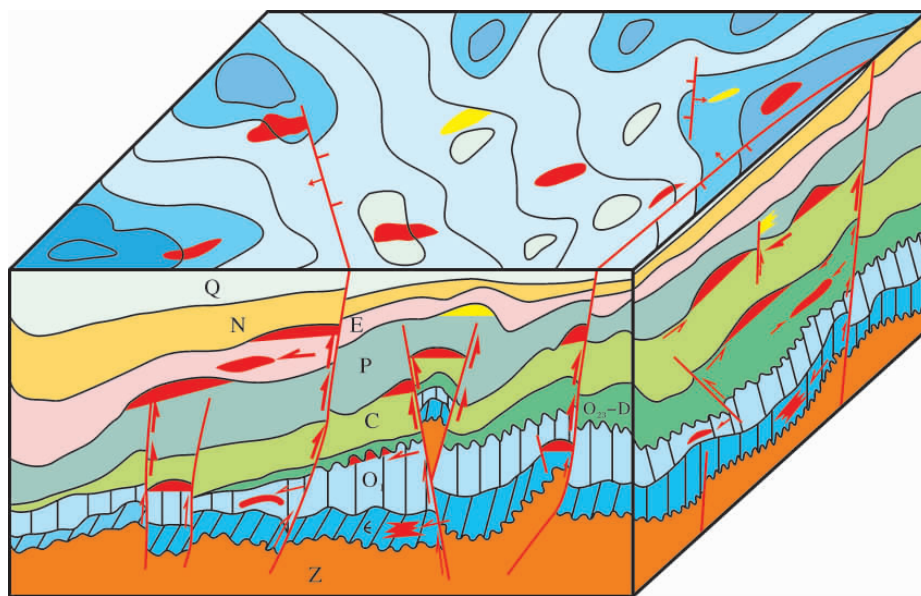


图6 复杂叠合盆地中期强烈改造型油气成藏模式

Fig.6 Accumulation model of strongly reworked in medium-term of superimposed basins

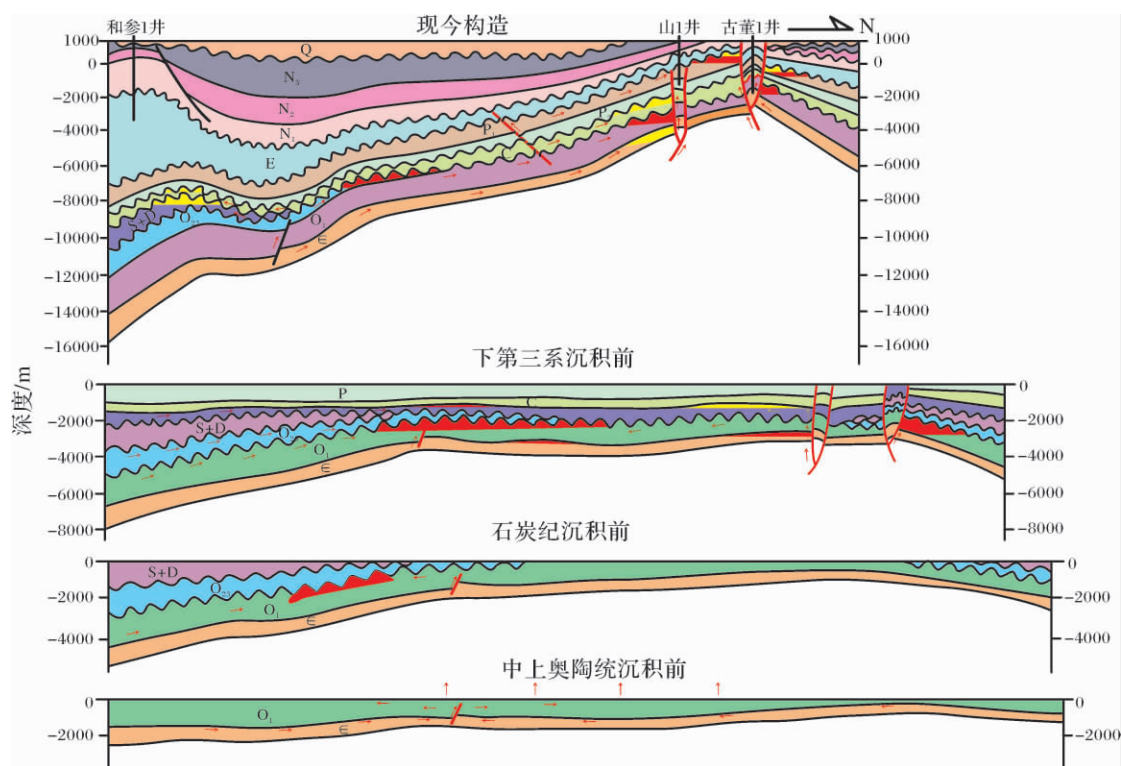


图7 和田古隆起山1—和参1井南北向油气成藏发育模式

Fig.7 Development mode of oil and gas accumulation Shan 1—Hecan 1 in Hetian paleo-uplift

是对古油气藏的改造,基本上都是空间和类型的变化,而不会出现大规模的量上的损失,由长期深埋出现的高温裂解和凝析气等气藏并不多(图8)。晚期强烈改造型的油气成藏最大特征就是在后期的构造运动加剧过程中,发生过多次明显的挤压隆升过程,使得盆地中后期出现了多套的不整合界面,也同时相应的产生了多条沟通早晚期的大型断裂(带),这种输导体系的形成,使得盆地早期形成的古油气藏能够被调整到晚期形成的新圈闭中聚集成藏,其中也可能是区域性的翘倾掀斜导致古油气藏在空间上的明显转移,虽然存在量上的损耗,但致命性的破坏不多,是一种相对有利于油气保存的多期成藏类型。

晚期强烈改造型油气成藏的典型代表之一就是准噶尔盆地车—莫古隆起油气成藏。盆地最下部的石炭系滴水泉组在二叠纪末期就开始了大量排烃,其生成的油气沿先期形成的断裂向上部运移,沿不整合面等输导体系聚集在其自身内部的火山岩储层及二叠系夏子街组中成藏(图9a)。此时的油气藏规模并不大。随后,由于构造变动,车—莫古隆起的莫索湾地区中晚侏罗世主要处于隆升剥蚀状态。这样早期形成的古油气藏和中央拗陷排出的烃沿断层向上调

整运移至浅部,一部分沿两侧储层进行分流,一部分油气散失至地表<sup>[26]</sup>(图9b)。第三阶段,白垩纪早期,下部和中部主力烃源岩生成的大量油气在断裂和不整合面的配合下继续向上运移,储集在白垩系底部砂体中,由于构造平缓,较难成藏(图9c)。最后,受喜马拉雅运动的影响,准噶尔盆地发生大幅度掀斜作用,车—莫古隆起地区北西升南东降,早期形成的油气藏因圈闭溢出点的抬高,而重新调整,聚集在构造或岩性圈闭中(图9d),这也是准噶尔盆地白垩系多口井试油或取芯有油气显示,而无规模油气聚集的主要原因。这样也使得车—莫古隆起周边形成了多个油气聚集带的局面,油气藏类型多样,这些都与车—莫古隆起的晚期剧烈活动、翘倾且深埋有密切关系。

#### 5) 多期充注改造交替型

在西部复杂叠合盆地当中,以多期充注改造交替型成藏最为复杂,而且形成的油气藏数量相对最少。所谓多期充注改造交替型是指区域内升降强度不但大,而且十分频繁,油气虽然较早的开始进行聚集成藏,但由于随之而来的强烈抬升,地层遭到强烈剥蚀而导致油气藏调整改造甚至破坏,在此之后,油气开始新一轮的成藏、改造与破坏,反复数次,最终导致区



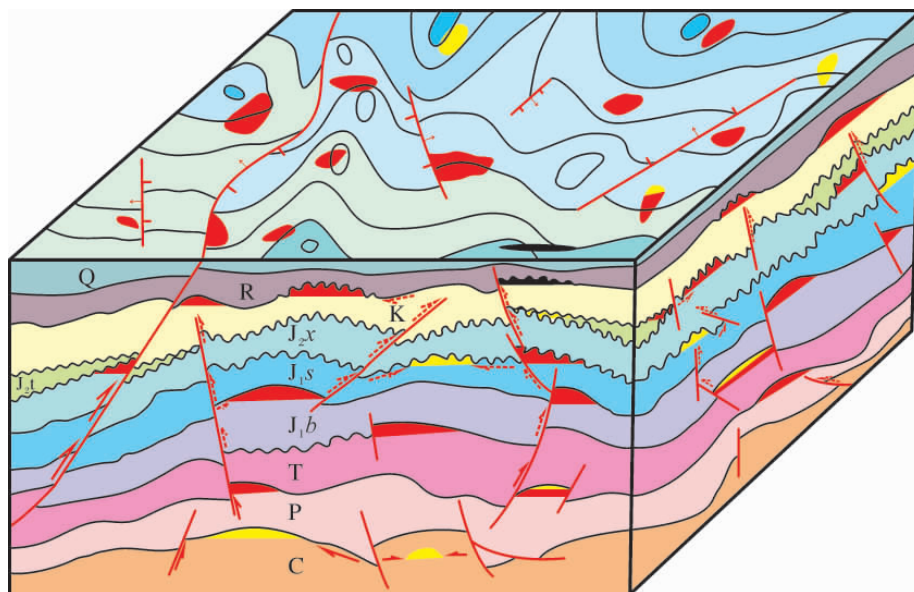


图8 复杂叠合盆地晚期强烈改造型油气成藏模式

Fig. 8 Accumulation model of strongly reworked in late period of superimposed basins

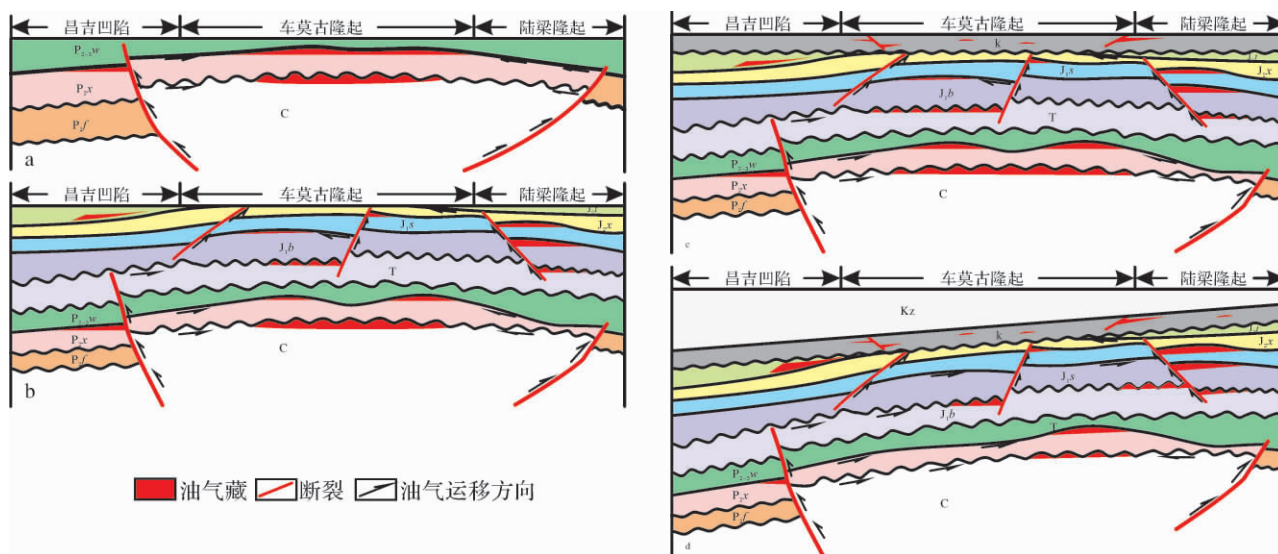


图9 准噶尔盆地车—莫古隆起成藏演化模式图

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation model of Che - mo paleo - uplift in Junggar Basin

域内多期充注多期破坏的局面,最终难以形成大规模的油气藏(图10)。这种类型典型特征就是形成多期的区域性不整合面,以及较密集的断裂,这种断裂往往沟通了上下储盖组合,使得油气能够穿层运移,导致油气混源现象明显,破坏的量很大,有些地方甚至会有沥青等破坏产物出露地表。这种强烈交替的多期油气充注改造成藏模式在整个构造变动地区强度是最大的,升降频率也是最大的,通常会形成油气多期充注、多期强烈改造的局面,难以形成较大的油气储量。

陆梁地区油气藏就是一个经过多期充注破坏的典型实例。综合储层包裹体均一温度和自生伊利石分析等成藏期研究成果,并结合凹陷区烃源岩的热演化过程和区域构造发展史,陆梁地区应主要有三次较重要的成藏事件<sup>[28]</sup>,这三次成藏事件分别发生在三叠纪、白垩纪和第三纪(图11)。由于三叠纪末期整体的抬升,二叠系和石炭系烃源岩层生成的早期油气藏被破坏。至晚白垩世,由于该地区整体下沉接受了巨厚的早白垩世沉积,地层内重新聚集形成了白垩纪油气藏,重新聚集了一定规模的油气。但由于早白垩



世沉积末期陆梁隆起的抬升,使下白垩统上部遭受剥蚀,使得早期侏罗系生成聚集在白垩系内的第二期油气藏遭到较大破坏,但深部层位二叠系二次充注在石炭系内部的成熟油气得以保存;在随后的第三纪,二叠系下乌尔禾组生成的高成熟油气对石炭系油藏再充注、侏罗系高成熟油气藏及白垩系油气藏形成。但由于受到喜山运动的影响,隆起进行总体的又一次抬

升,同样在一定程度上影响到了下伏油气藏。因此,从总体上来讲,陆梁隆起成藏主要为三期的外源性油气成藏,基本体现了在构造往复剧烈运动的情况下,油气多期充注多期强烈改造的成藏模式。

3 多期成藏的勘探有效性差异

如前所述,在叠合盆地众多油气成藏过程中,每

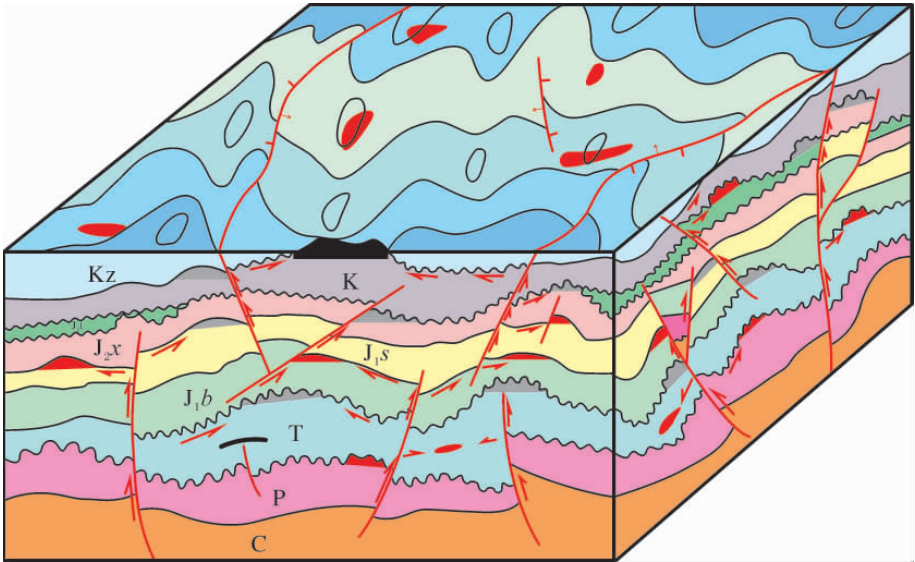


图 10 复杂叠合盆地多期充注改造交替型油气成藏模式

Fig. 10 Accumulation model of multi-stage alternating in superimposed basins

地质年代	C	P <sub>ij</sub>	P <sub>if</sub>	P <sub>2x</sub>	P <sub>2w</sub>	T <sub>1b</sub>	T <sub>2k</sub>	T <sub>3b</sub>	J <sub>1b</sub>	J <sub>1s</sub>	J <sub>2x</sub>	J <sub>2t</sub>	K	E	N
构造运动	海西			印支			喜山 I			喜山 II		喜山 III		喜山	
源岩	■			■											
油气演化	佳木河组						○								
	风城组						○								
	乌尔禾组									○					
斜坡区	储集层			■			■								
	圈闭类型						超覆、不整合面、岩性								
	运聚模型						不整合面(侧向)运移								
	油气成藏						■								
隆起区	储集层			■						■		■			
	圈闭类型						古潜山、披覆背斜、岩性								
	运聚模型						不整合面(侧向)—正断层(垂向), 油源逆断裂(侧向)—正断裂(垂向)								
	油气成藏									■		■		■	
水文地质旋回	沉积期			■						■				■	
	淋滤期						■			■				■	
							第一水文旋回			第二水文旋回		第三水文旋回			
断裂系统							早期挤压逆掩断裂系统			中期区域拉张断裂系统		晚期后生局部张性断裂系统			

图 11 准噶尔盆地陆梁隆起成藏事件综合图( 据新疆油田公司 2005 ,修改)

Fig. 11 Comprehensive plans of forming event of Lu liang uplift in Junngar Basin  
( Xinjiang Oilfield Company ,2005 ,modified)

一种成藏类型都会在不同地质条件的约束情况下,会形成大量形态各异、规模不等、类型复杂的油气藏,那么不同类型的成藏方式,最终导致形成油气藏的概率和规模也必然是相差很大,这对于油气勘探来讲就是勘探有效性差异的问题。这个问题的直接起因就在于复杂叠合盆地的差异构造变动,而最终结果又归结于油气资源量的保存规模,所以,探究多期成藏导致的勘探有效性差异就必须按照由因及果的线路,把构造变动调整纳入到研究探讨的范围。

纵观目前勘探得到的油气藏不难发现,有相当大的比重都是来自于晚期油气的调整聚集,这就是目前石油地质学家所谈论到的晚期成藏<sup>[29]</sup>。由于晚期成藏的“晚期”是一个相对于油气主成藏期后的时间概念,这个时间的绝对值越晚,就越靠近现今的地质时间,那么油气调整改造经历的次数也就相对减少,也越有利于油气的保存富集,而反之则是越不利,前文述及的多期往复的剧烈充注改造交替型成藏就是一个典型代表。大油田成藏期有晚的也有相当早的,但总体上仍以晚期成藏为主,例如,塔里木盆地虽然有20.69%油藏不是晚期成藏的,如有些油藏成藏期为海西期<sup>[30,31]</sup>,但仍有近80%的油气藏为晚期成藏。因此,由于中国西部叠合盆地经历了多旋回性演化过程,使得西部叠合盆地大油、气田不论是何种多期成藏类型,都具有晚期成藏的结果。因为往往早期形成的大油气藏受到破坏或从巨大变为一般和中、小型油气田,甚至被完全破坏。所以只有晚期成藏才避免了过多的旋回性破坏功能,有利于各种类型油气藏的保存和富集,这对于油气勘探来讲是十分有利的。

所以,在上述讨论建立的5种油气多期成藏模式中,第一种油气连续充注型成藏模式一般情况下可以形成典型的油气藏,且不仅仅局限于晚期成藏,它在对早前原生油气藏保持尽量少影响的条件下会形成新生油气藏,并且由于烃源岩的持续深埋,油气藏类型大都以凝析气藏或裂解气藏为主,因此它的勘探有效性较好。但是从严格意义上来讲,这种油气成藏模式一般会包括两种类型,一种是临近大型生烃坳陷的有利圈闭成藏,如古隆起,这种类型是在油气满足排烃条件后,在向周围地区运聚的途中被捕获成藏的,属于异地成藏,且形成的凝析气藏较多;另一种是位于坳陷内部的局部小型构造成藏,如凹中隆,这种小型构造十分有利于油气的直接充注,充满度较高。第二种早期强烈改造型成藏模式虽然与第四种成藏模

式类似,但由于它们在对油气藏破坏的时间上明显不同,因而其最终对油气藏导致的结果也相差甚远。早期的强烈构造运动完全可以把早期形成的油气藏大规模破坏,但由于晚期的相对稳定,使得中后期形成的大量油气藏得以保存,比如塔中地区大面积的志留系沥青砂岩的分布和后期石炭系、三叠系大量油气藏的存在就充分展现了早期破坏晚期封存的巨大差异转折,并且在晚期成藏普遍存在的情况下,这种油气成藏类型相对来讲也是有利于油气勘探的。第三种中期强烈改造型成藏模式在构造变动的的时间上向后发生推移,对早期油气藏具有一定的保存作用,晚期由于构造变动强度减弱,使得晚期盖层对早期形成的,中期遭受破坏在后期重新聚集的,以及新近形成的油气藏都具有很好的封盖作用,有利于油气藏的保存。因此,这是一种有利于油气成藏的成藏模式,具有良好的勘探有效性。第四种晚期强烈改造型成藏模式是一种晚期破坏性较大的剧烈构造运动影响下形成的,随着晚期构造运动的逐步加强,那么它对油气藏破坏的力度也是逐步上升的,其最大极致完全可以将油气藏全部破坏,仅仅保留少量前期古油气藏的很少一部分,所以这是一种勘探有效性较差的成藏模式,在类似地区不利于油气藏的规模保存。当着,这种不利于保存的概念是针对古油气藏形成的原地区,如果由于后期强烈的构造变动使得油气藏发生以空间改变为主的调整改造,如准噶尔盆地的车莫古隆起,在古油气藏的周边地区,仍然具有一定的勘探潜力,因此,对于这种成藏模式要一分为二辩证的看待。最后一种是多期充注改造交替型成藏模式,这是一种最不具备勘探有效性的成藏模式,由于各个成藏期次都普遍经历过大规模的剧烈构造变动,使得每个主要成藏期的油气成藏条件都存在致命的缺陷,距离生烃中心距离较远,不能保证稳定的油气供应,输导体系上往往会存在较多的逸散损失情况,如破坏性断裂、盖层的缺失等,最终的保存条件又因为构造变动而变得十分脆弱,这些对于本已所剩不多的油气来讲是一个十分不利的条件,因此,这种成藏模式保留下来的油气资源应该是极其有限的。

所以,在上述五种油气成藏模式中,具有勘探有效性的成藏模式应该是最有可能形成规模油气藏的。在实际勘探过程中,应该在适宜或可能形成该种成藏模式的地方加大力度,寻找突破口,而在不具备勘探有效性的地方应该格外小心,慎之又慎。

## 4 结语及讨论

我国中西部地区大面积的复杂叠合盆地内,油气成藏存在明显的多期特点。在大量总结复杂叠合盆地油气成藏特点基础上,结合叠合盆地构造变动的基本模式,建立起包括油气连续充注型、早期强烈改造型、中期强烈改造型、晚期强烈改造型和多期充注改造交替型在内的五种成藏模式。这与在该项目研究获得的复杂叠合盆地多期构造变动模式是相互对应的(相应成果已发表在2010年《地质学报》上)。在以油气晚期成藏为主导的前提下,上述五种成藏模式存在明显的差异勘探有效性。其中对油气规模聚集成藏最为有利的是具有持续埋藏型油气成藏的区域和周边地区,由于自身构造特点决定,其形成的油气藏性质类型较为复杂;其次是早期强烈改造型和中期强烈改造型,随着构造变动强度和频率的逐渐增加,使得晚期强烈改造型和多期充注改造交替型油气成藏最不利于油气规模保存,所以最不具有勘探有效性。按照上述研究思路,在叠合盆地的油气勘探要十分关注研究区域的构造发育史,分析构造变动的强度以及其发生期相对于排烃期的早晚,只有这样才能初步的圈定有利油气聚集成藏的区带,否则,在大方向不够明了的前提下,无疑会增加油气勘探的风险。

上述的油气成藏模式是在以复杂叠合盆地构造变动模式划分的基础上建立起来的,不同的构造模式对应一定的成藏模式,但其中仍然存在一定不足:成藏模式的建立架构在构造变动模式研究的基础之上的,而构造变动模式的分类具有多解性。构造变动模式的建立是以区带或盆地构造演化研究的基础上进行的,而叠合盆地往往是多个原型盆地在垂向上的叠置,这就导致了构造演化研究的难度,不同学者从不同角度会有不同的解释,这使得分类模式存在多解性。而随后建立在不同构造变动分类模式基础上的成藏模式,同样会发生不同分类变化,这将在直接导致油气藏勘探的方向性差异。且构造变动发生的时间的划分也需要进一步的商榷,是在整个地史时期过程中均分,还是在大量排烃期后划分,或者是首次大规模成藏后分割都有待于深入研究。构造变动模式不完全与成藏模式完全一一对应。油气成藏本身受到多种因素的制约,构造变动仅仅是其中较为重要的一个,在综合因素的合力作用下,使得两者之间不存在完全对应的关系,要正确看待两者的联系。在这种方法的指导下所能最终确定的仅仅是寻找可能具有

每种成藏模式的区带,而具体的勘探目标则要更为具体的结合其他成藏要素具体划分。文中油气勘探有效性仅仅是一种可能性推测,这种推测的可能性大小是尚无法确定的,如果能将区带成藏有效性定量化表征出来,将有利于油气勘探准确度的大幅度提高。

## 参考文献(References)

- 1 周兴熙. 复合叠合盆地油气成藏特征——以塔里木盆地为例[J]. 地质前缘, 2000, 7(3): 39-47 [Zhou Xingxi. Oil and gas accumulation characteristics of composite superimposed basin: an example from Tarim Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 39-47]
- 2 李丕龙, 张善文, 曲寿利. 陆相断陷盆地油气地质与勘探卷四: 陆相断陷盆地油气成藏组合[C]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 367 [Li Pilong, Zhang Shanwen, Qu Shouli. Continental Rift Basin Petroleum Geology and Exploration (Volume IV): Continental rift basin hydrocarbon composition [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 367]
- 3 金之钧, 张一伟, 王捷, 等. 油气成藏机理与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 369 [Jin Zhijun, Zhang Yiwei, Wang Jie, et al. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 369]
- 4 Martinsen R S. Depositional remnants, part 1: Common components of the stratigraphic record with important implications for hydrocarbon exploration and production[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(12): 1869-1882
- 5 Martinsen R S. Depositional remnants, part 2: Examples from the Western Interior Cretaceous basin of North America[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(12): 1883-1909
- 6 关德范, 王国力, 张金功, 等. 成烃成藏理论新思维[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 425-432 [Guan Defan, Wang Guoli, Zhang Jingong, et al. New idea about hydrocarbon generation and pool formation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5): 425-432]
- 7 何治亮, 顾忆, 高山林. 中国西部多旋回演化与油气聚集[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 433-438 [He Zhiliang, Gu Yi, Gao Shanlin. Polycyclic evolution and petroleum accumulation in the west of China [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(5): 433-438]
- 8 冯乔. 塔里木盆地满加尔凹陷地层埋藏史与有机质成熟演化[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 172-176 [Feng Qiao, Burial history of stratigraphy and maturity evolution of organic matter in Manjiaer Depression Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 172-176]
- 9 范光华. 塔里木盆地轮南低隆凝析气藏的形成条件[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(3): 245-248 [Fan Guanghua. Formation of condensate gas pool in Lunnan low uplift, Tarim basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(3): 245-248]
- 10 何登发, 贾承造, 柳少波, 等. 塔里木盆地轮南低凸起油气多期成藏动力学[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊) 122-130 [He Dengfa, Jia Chengzao, Liu Shaobo, et al. Oil and gas multi-stage forming dynamics of Lunnan low uplift in Tarim basin [J]. Chinese Science Bul-

- letin, 2002, 47( Suppl. ) 122-130]
- 11 刘春晓, 钱利, 邓国振. 塔中地区油气成藏主控因素及成藏规律研究[J]. 地质力学学报, 2007, 13(4): 355-367 [Liu Chunxiao, Qian Li, Deng Guozhen. Controlling factors and accumulation Laws of reservoir formation in Tazhong region [J]. Journal of Geomechanics, 2007, 13(4): 355-367]
- 12 张小兵, 赵锡奎. 塔里木盆地塔中构造演化与志留系油气关系[J]. 天然气勘探与开发, 2004, 27(2): 11-15 [Zhang Xiaobing, Zhao Xikui. Relationship between Tazhong tectonic evolution and Silurian hydrocarbon distribution in Tarim basin [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2004, 27(2): 11-15]
- 13 周鹏. 塔里木盆地和田古隆起构造演化及油气关系[D]. 成都理工大学, 2002: 51-56 [Zhou Peng. Evolution of Hetian paleo-uplift tectonic and relation between oil and gas in Tarim Basin [D]. Chengdu University of Technology, 2002: 51-56]
- 14 康玉柱. 中国古生代海相成油特征[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1995: 65-69 [Kang Yuzhu. Characteristics of Paleozoic Marine Hydrocarbon Generation in China [M]. Urumqi: Xinjiang Technology and Health Press, 1995: 65-69]
- 15 陈元壮. 塔里木盆地志留系油气成藏机理和成藏模式研究[D]. 中国石油大学(北京), 2002: 77-90 [Chen Yuanzhuang. Formation mechanism and accumulation mode of Silurian oil and gas in the Tarim basin [D]. China University of Petroleum( Beijing ), 2002: 77-90]
- 16 丁文龙, 金之钧, 张义杰, 等. 新疆准噶尔盆地断裂控油气作用机理研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(3): 102-102 [Ding Wenlong, Jin Zhijun, Zhang Yijie, et al. Mechanism of fracture-controlled oil and gas in Junggar Basin, Xinjiang [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(3): 102-102]
- 17 贾承造主编. 前陆冲断带油气勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 52-94 [Jia Chengzao. Oil and Gas Exploration on Foreland Thrust Belt [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 52-94]
- 18 王世虎, 徐希坤, 宋国奇. 塔西南坳陷和田凹陷前陆逆冲带构造特征[J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 378-343 [Wang Shihu, Xu Xikun, Song Guoqi. Tectonic features of the foreland obduction zone in the Hetian sag of the southwest Tarim depression [J]. Experimental Petroleum Geology, 2001, 23(4): 378-343]
- 19 张越迁, 张年富, 姚新玉. 准噶尔盆地腹部油气勘探回顾与展望[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(2): 105-109 [Zhang Yueqian, Zhang Nianfu, Yao Xinyu. Review and prospect for petroleum exploration in hinterland and of Junggar basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(2): 105-109]
- 20 何登发, 陈新发, 张义杰, 等. 准噶尔盆地油气富集规律. 石油学报, 2004, 25(3): 1-10 [He Dengfa, Chen Xinfa, Zhang Yijie, et al. Enrichment characteristics of oil and gas in Junggar basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(3): 1-10]
- 21 谭明友, 张云银, 宋传春, 等. 准噶尔盆地油气幕式成藏规律探讨[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 28-31 [Tan Mingyou, Zhang Yunyin, Song Chuanchun, et al. Episodic reservoir-formation rules in the Junggar Basin, Northwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 28-31]
- 22 吴庆福. 准噶尔盆地构造演化与找油领域[J]. 新疆地质, 1986, 4(3): 1-19 [Wu Qingfu. Tectonic evolution and oil fields to find in Junggar Basin [J]. Xinjiang Geology, 1986, 4(3): 1-19]
- 23 张功成, 陈新发, 刘楼军, 等. 准噶尔盆地结构构造与油气田分布[J]. 石油学报, 1999, 20(1): 13-18 [Zhang Gongcheng, Chen Xinfa, Liu Loujun, et al. The tectonic evolution, architecture and petroleum distribution in the Junggar basin in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(1): 13-18]
- 24 陈新发. 塔里木盆地西南凹陷与准噶尔盆地构造演化、油气系统对比研究[D]. 中国地震局地质研究所, 1998: 66-81 [Chen Xinfa. Comparative study of tectonic evolution and petroleum systems between southwest depression in Tarim basin and Junggar basin [D]. Institute of Geology of China Earthquake Administration, 1998: 66-81]
- 25 张克银, 艾华国. 碳酸盐岩顶部不整合面结构层及控油意义[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(5): 16-19 [Zhang Keyin, Ai Huaguo. The unconformity and oil control significance at the top of carbonate layer [J]. Petroleum Exploration & Development, 1996, 23(5): 16-19]
- 26 刘波, 王英华, 钱祥麟. 华北奥陶系两个不整合面的成因与相关区域性储层预测[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 25-30 [Liu Bo, Wang Yinghua, Qian Xianglin. The two Ordovician unconformities in North China: their origins and related regional reservoirs' prediction [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 25-30]
- 27 王子煜, 陆克政, 漆家福, 等. 塔里木盆地塔中凸起的构造演化及其与油气藏的关系[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22(4): 13-17 [Wang Ziyu, Lu Kezheng, Qi Jiafu, et al. Relation between tectonic evolution and oil reservoir in Tazhong uplift of Tarim Basin [J]. Journal of the University of Petroleum, 1998, 22(4): 13-17]
- 28 秦胜飞, 贾承造, 陶士振. 塔里木盆地库车坳陷油气成藏的若干特征[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 104-108 [Qin Shengfei, Jia Chengzao, Tao Shizhen. A number of features of hydrocarbon accumulation in the Kuqa depression, Tarim basin [J]. Chinese Geology, 2002, 29(1): 104-108]
- 29 戴金星, 卫延召, 赵靖舟. 晚期成藏对大气田形成的重大作用[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 10-19 [Dai Jinxing, Wei Yanzhao, Zhao Jingzhou. Important role of the formation of gas accumulations in the late stage in the formation of large gas fields [J]. Chinese Geology, 2003, 30(1): 10-19]
- 30 翟光明, 何文渊. 中国前陆盆地特点及未来油气勘探策略[C]// 中国石油勘探与生产分公司编. 中国中西部前陆盆地冲断带油气勘探文集北京: 石油工业出版社, 2002: 15-22 [Zhai Guangming, He Wenyuan. The characteristics and the future oil and gas exploration strategy of China Foreland Basin [C]// China Petroleum Exploration and Production Branch Code. Collection of Oil and Gas Exploration on Thrust Belt of the Foreland Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 15-22]
- 31 王兆云, 赵文智, 何海清. 超压与烃类生成相互作用关系及对油气运聚成藏的影响[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 12-15 [Wang Zhaoun, Zhao Wenzhi, He Haiqing. Study on the interaction of overpressure and hydrocarbon generation and the influence of overpressure upon hydrocarbon accumulations [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 12-15]



## The Model of the Multi-Stage of Oil-Gas Formation and Exploration Effectiveness in Superimposed Basins in Western China

KANG De-jiang JIANG Li-na ZHANG Jin-you

(Research Institute of Petroleum Exploration & Development of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712)

**Abstract:** By comparing the large and medium-sized oil and gas fields, it is discovered that reservoirs in superimposed basins are most of multi-stage formation process, and the late accumulation is favorable for large-scale preservation. Based on summary of accumulation progress, characteristic and model of the various oil-gas pool, combined with features of the tectonic evolution of the study area, it composes the hydrocarbon accumulation pattern classification, and divides oil and gas multi-phase accumulation model into 5 types according to the criteria: continuous oil-gas filled, early strong reformation, strongly reworked in medium-term, late strongly reworked and alternation of multi-stage filling and reworked. Strength of structural changes and occurring period are taken into account to construct the pattern classification criteria, and the two parameters are all relative. The characteristic of continuous oil-gas filled is that the oil and gas transportation capability is strong and it can not only form the normal reservoir, but also the pyrolysis gas reservoir. The early strong reformation means the strength of structure is more stronger and the range is larger during the early period, it makes the hydrocarbon expelled from resource can not be assemble in the suitable trap, in contrast the later oil and gas can form the reservoir. Strongly reworked in medium-term mode indicates that much of tectonic movements strongly happened after the reservoir accumulated, oil and gas reservoirs will be reformed or lost to some extent each time, so the late contribution is the main result of this type. The late strongly reworked type means that the hydrocarbon formed and expelled from source all accumulated in the relatively stable environment, and in the late, there happens the strong and large-scale tectonic movements, these movements change the existed reservoirs in the aspect of quality and quantity. The last one is multi-stage filling and reworked type, which most occurs in the region happened strong and frequent extremely tectonic movements. Although the reservoirs formed early, strong tectonic movements destroy or change them all, after several times, it basically, can not form a large reservoir.

Among the model of the multi-stage of oil-gas formation listed above, the first type can form the typical reservoir under normal circumstance, moreover, the condensate gas reservoir is more. The second one is similar to the forth type, but because the time of destroy is different, the corresponding results are very different. Early strong reformation type can destroy the reservoir accumulated in the early stage seriously, and because of the later stable tectonic movements, it can preserve the hydrocarbon formed in the later period, such as the distribution of Silurian bituminous sandstone in Tazhong region and much of reservoir existed in Carboniferous and Thriassic. The third one can preserve the earlier reservoir to some extent, and meanwhile, it also can accumulate the late hydrocarbon because the strength of the tectonic movements become weaker. The characteristic of the forth type is the strength of tectonic is very strong, and it can be destructive. To the maximum extent, it can completely destroy the former reservoirs, the remaining is very little. The last type is a model without exploration effectiveness, and the result of structural damage is highly visible, So the resource accumulated under this condition is restricted extremely.

In the context of late accumulation is favorable for exploration, it determine that the region with the model of continuous oil-gas filled and surrounding areas is most likely to accumulate large scale and many types of oil-gas reservoirs because there have little tectonic movements and the damage. However, the model of alternation of multi-stage filling and reworking have little exploration effectiveness because of many tectonic movements and damages. Consequently, the exploration for oil-gas should try to avoid these areas.

**Key words:** superimposed basin; model of multi-stage accumulation; exploration effectiveness; late accumulation; tectonic movement