

文章编号:0253-9985(2010)05-0517-18

中国西部叠合盆地深部油气勘探面临的重大挑战 及其研究方法 with 意义

庞雄奇^{1,2}

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油大学 盆地与油藏研究中心,北京 102249)

摘要:在综合调研和收集了世界深部油气藏大量资料及对中国西部叠合盆地油气地质特征深入研究的基础上,总结提出中国西部叠合盆地深部油气勘探面临着三方面的重大挑战:①油气组成复杂,多期混合、来源不清,致使深部油气勘探方向难以确定;②富集油气的有效储层裂缝和溶蚀孔洞混杂,成因机制不清,导致勘探区带预测困难;③油气相态变异大,油气分布特征受深部高温压环境、低孔渗介质条件和多种运聚动力的影响,使得现有的成藏理论难以有效指导勘探目标的预测。因此认为,加速中国西部叠合盆地深部油气勘探必须解决三个关键科学问题:①多期构造过程叠加与深部油气生成演化;②深部有效储层形成机制与发育模式;③深部油气复合成藏机制与油气富集规律。为此,建议采用油气成藏过程正演模拟和油气成藏过程反演剖析相结合的研究方法和“深部成藏条件—深部成藏机制—深部成藏规律”的技术主线,重点选择深部资源潜力最大的塔里木盆地和准噶尔盆地开展研究,期待形成和发展中国叠合盆地深部油气复合成藏理论,研发深部油气分布预测配套技术,促进中国西部深部油气勘探和储量的快速增长。

关键词:油气分布规律;油气成藏;深部或深层油气勘探;中国叠合盆地

中图分类号:TE132 **文献标识码:**A

Key challenges and research methods of petroleum exploration in the deep of superimposed basins in western China

Pang Xiongqi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Research Center of Basins and Reservoirs, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on comprehensive knowledge of deep reservoirs all over the world and petroleum geological features of superimposed basins in western China, this paper recognizes three key challenges of petroleum exploration in the deep of superimposed basins in western China. The first challenge is that hydrocarbons generated in multi-phases mix together and their origins are not clear, making it hard to select leads. The second challenge is that fractures and dissolved pores/cavities mix together in reservoirs and their origins are unclear, making it hard to predict favorable plays. The third challenge is that phases of hydrocarbon vary greatly and the distribution of hydrocarbon is influenced by high pressure and temperature, low porosity and permeability and several driving forces of migration, making it difficult to predict exploration targets using existing pool-forming theories. Therefore, to accelerate hydrocarbon exploration in the deep of superimposed basins in western China, we have to find answers to three key issues: (i) multi-stage tectonic overprinting and deep hydrocarbon

收稿日期:2010-08-11。

作者简介:庞雄奇(1961—),男,教授,油气藏形成与分布预测。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2006CB202300;2011CB201100)。

generation and evolution; (ii) development mechanism and pattern of deep effective reservoirs; (iii) composite pool-forming mechanism and accumulation pattern of hydrocarbons in deep strata. It is suggested to adopt a research method that integrates forward modeling with inversion analysis of hydrocarbon accumulation process and a technical route of “geological condition-mechanism-pattern of hydrocarbon accumulation”. Tarim Basin and Junggar Basin can be chosen as the focus of study as they have the greatest deep petroleum resource potential. It is expected to develop theories on composite hydrocarbon accumulation in the deep of superimposed basins in western China and supporting techniques to predict hydrocarbon distribution. These new theories will promote hydrocarbon exploration and fast reserve growth in the deep of western China basins.

Keywords: hydrocarbon distribution pattern, hydrocarbon accumulation, deep hydrocarbon exploration, superimposed basin in China

油气短缺正制约着我国经济的发展和人民生活水平的提高。随着我国国民经济的迅速发展,油气需求与日俱增。据发改委近期公布的数据,2009年我国进口原油 $20\,379 \times 10^4$ t,比2008年增长13.9%,原油对外依存度达到52%的新高。油气短缺的状况在我国还将进一步加重。随着对原油进口需求的持续增长,我国的能源风险越来越大。造成我国油气短缺的根本原因是后备储量的严重不足。我国目前的原油储量和产量之比约为14/1,不到世界平均值40/1的三分之一。要改变我国油气短缺的这一状况,关键是增大油气的后备储量。为确保我国能源安全和继续保障社会经济的平稳发展,加大开发国内油气资源的力度、充分发挥国内油气资源的保障作用就具有迫切的现实意义。

1 西部叠合盆地深部是我国最现实的后备储量接替区

1.1 关于“深部”的概念与表征

深部油气藏也叫深层油气藏。关于“深部”的概念,有不同的判别标准。有以地层年代来划分的,对于某一确定的盆地,将地层年代较老且埋深较大的地层称之为深部地层^[1~4];也有按孔隙度、渗透率、温度或深度来确定的^[5],将埋深较大,孔隙度超过10%~12%,或渗透率超过 $0.5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,或温度超过120~150℃的地层称为深部地层。目前,大多数学者是依据埋藏深度来划分的。由于不同的盆地同一深度所对应的地

层温度或孔隙度或渗透是不相同的,因此不同学者提出的深度界限也不统一。有些学者将埋深大于2 500 m的地层称为深部地层^[6];有些学者将埋深大于3 500 m的地层称为深部地层^[7~9];有些学者将埋深大于4 000 m的地层称为深部地层^[10~13];还有些学者则将埋深大于4 500 m的地层称为深部层^[14~17]。

有关深部油气地质特征与油气成藏条件,许多学者开展过研究^[5,18~22]。结果表明,一般情况下,深部地层的孔隙度小于10%~12%、渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、地层温度超过120~150℃。本次研究,参照国家新一轮油气资源评价的规定,将对应于上述地质特征的地层概称为深部地层。在我国西部盆地,它与埋深大于4 500 m的地层大致对应;在我国东部盆地,它与埋深大于3 000 m的沉积地层大致对应。

1.2 世界含油气盆地深部油气勘探取得巨大成效

在全球范围内,深部油气普遍存在,资源潜力巨大^[23]。据已发表资料统计^[24],目前已在4 500~8 103 m深度内开发了1 000多个油气田,其石油原始可采量相当于全球石油储量的7%,而天然气储量占25%。埃及、意大利、墨西哥、法国和美国在这一深度内的天然气探明储量约占这些国家天然气总储量的47%。在4 500~6 668 m深度内,阿根廷、意大利、利比亚、墨西哥、美国、特里尼达和多巴哥所发现的石油占这些国家现今可采石油储量的31%以上。在墨西哥和美国,深部工业油气田的发现率竟然高达

50%~71%,其中有25个是巨型油气田^[25]。美国西内盆地阿纳达科凹陷米尔斯兰奇气田在7 663~8 083 m埋深的下奥陶统碳酸盐岩内发现了世界上最深的气藏,储量达 $365 \times 10^8 \text{ m}^3$,单井日产气 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在美国墨西哥湾密西西比三角洲的列克-华盛顿湖油田6 540 m深处发现了世界上最深的油藏。当今世界上最深的油气勘探井深达9 583 m。

1.3 中国含油气盆地深部油气资源潜力巨大

1.3.1 西部盆地油气资源潜力大

我国从“六五”以来,逐渐开展了深部油气勘探工作,先后在塔里木、鄂尔多斯、四川等大型沉积盆地的深部发现了一批大油气田,并在东部油气区的大庆、中原、大港、胜利等地区的深部获得了重大进展^[26~28]。中国沉积厚度大于5 km的大型沉积盆地有21个,在14个盆地打了深井。其中,1998年在塔里木盆地完钻的塔参1井井深7 200 m,于5 059~6 930 m钻遇12个油气显示层段;中石化最近在塔北隆起上完成的塔深1井深度达到了8 407 m,并在8 403 m白云岩溶孔中见轻质原油。塔里木盆地目前已测试的156个油气层井段中,58个油气层的底界超过5 000 m深。我国深度超过5 000 m的油气藏主要集中在西部叠合盆地,其中在塔里木盆地深部的石油探明储量约占盆地总储量的79%左右。塔里木轮南地区石炭系的石英砂岩储集层,尽管埋深已达6 000 m,但仍保持着极高的孔隙度;塔河油田奥陶系发育的大型洞缝形成高产。我国深度超过5 000 m的气藏主要分布在塔里木盆地、四川盆地及准噶尔盆地。在塔里木盆地以羊塔克气田规模最大,气藏最大埋深达5 300 m。准噶尔盆地深部油气藏的勘探始于腹部地区,1994年在石西油田石炭系火山岩获得 $3 847 \times 10^4 \text{ t}$ 的探明储量,油藏最大埋深为4 530 m;之后,在西北缘的克拉玛依油田、车排子油田、玛北油田,南缘的呼图壁气田、卡因迪克油田,及腹部的莫索湾凸起、莫北凸起深部不断有油气新发现,油气藏埋深多处于3 500~4 000 m。我国塔里木、四川、鄂尔多斯三大盆地海相地层不断有大油气田发现,深部天然气勘探展示出良好

的前景^[29~31]。

中国油气资源较为丰富。据国土资源部、发改委、财政部联合完成的最新一轮全国油气资源评价的结果,我国常规油气资源总量高达 $1 287 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气 $70 \times 10^{12} \text{ m}^3$,它们的探明率目前分别仅有33%和13%,其中40%以上的剩余资源潜力集中分布在我国西部的叠合盆地,包括塔里木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地和柴达木盆地等。

1.3.2 西部叠合盆地深部油气资源潜力大

据统计,我国深部(深度3 500~4 500 m)、超深部(深度大于4 500 m)油气资源储量分布极不均匀,主要集中在新疆,尤其是新疆南区^[21]。准噶尔盆地深部和超深部的石油地质资源量为 $9.7 \times 10^8 \text{ t}$,约占盆地总数的18%。深部天然气地质资源量为 $1 564 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占盆地总数的24%;超深部的天然气地质资源量为 $2 081 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占盆地总数的32%。腹部的基岩油气藏和与古地形、地貌有关的岩性油气藏潜在资源量大,应是目前深部勘探的重点区域。塔里木盆地的油气资源分布从浅层到深部有逐渐递增的趋势。石油资源的分布以超深部最为丰富,为 $33.7 \times 10^8 \text{ t}$,约占总数的56%;其次是深部,为 $15.9 \times 10^8 \text{ t}$,约占总数的27%。天然气资源量也主要分布于深部和超深部,其中超深部为 $29 244 \times 10^8 \text{ m}^3$,占盆地总数的37%;深部为 $26 621 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总数的33%。中国西部复杂叠合盆地富集了中国45%左右的剩余油气资源,目前探明率不到20%,发展潜力巨大。相比于中国东部盆地,中国西部盆地的油气资源更多地集中分布于深部地层内(占西部叠合盆地油气资源的79%,图1)。

1.4 西部叠合盆地是我国最现实的油气资源战略接替区

据国土资源部、国家发改委、国家财政部2005年底联合组织完成的新一轮全国油气资源评价,我国石油和天然气资源探明率分别为33%和12.5%,与世界油气资源平均探明率73%和60.5%相比,探明程度总体较低。在陆相生油理论指导下,我国东部油气资源得到了较好的勘探

和开发,探明率已高达 60% 以上,目前油气储量增长放慢,产量整体下降。相比之下,我国西部含油气叠合盆地的资源还未得到充分开发和利用,探明率不到 18.9%,剩余资源约占全国的 43.4%。在我国西部,剩余资源的 75% 以上又集中在塔里

木和准噶尔这两个面积最大的叠合盆地中,目前已形成了每年超过 $3\,000\times 10^4\text{ t}$ 的产能,建成了我国“西气东输”的主要气源基地,显现出巨大的发展潜力,是我国目前最现实的油气资源战略接替基地(图 2)。

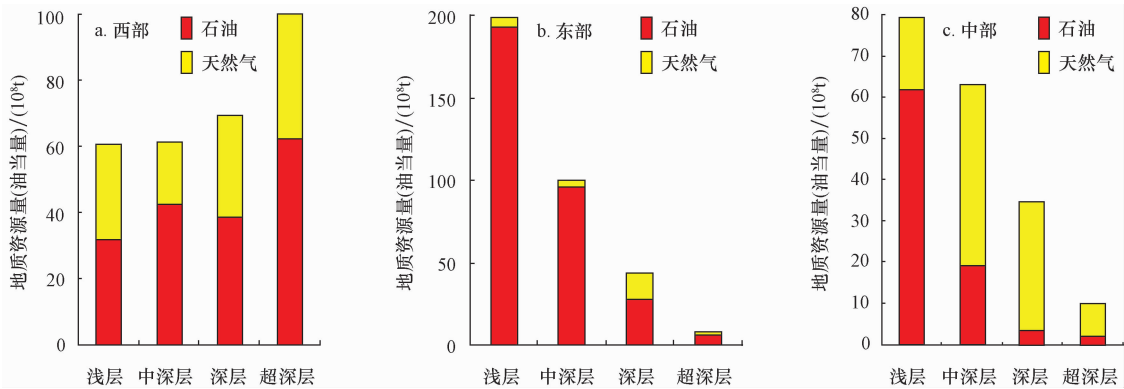


图 1 中国叠合盆地深部油气资源分布特征^①

Fig. 1 Distribution of petroleum resources in the deep of superimposed basins in China^①

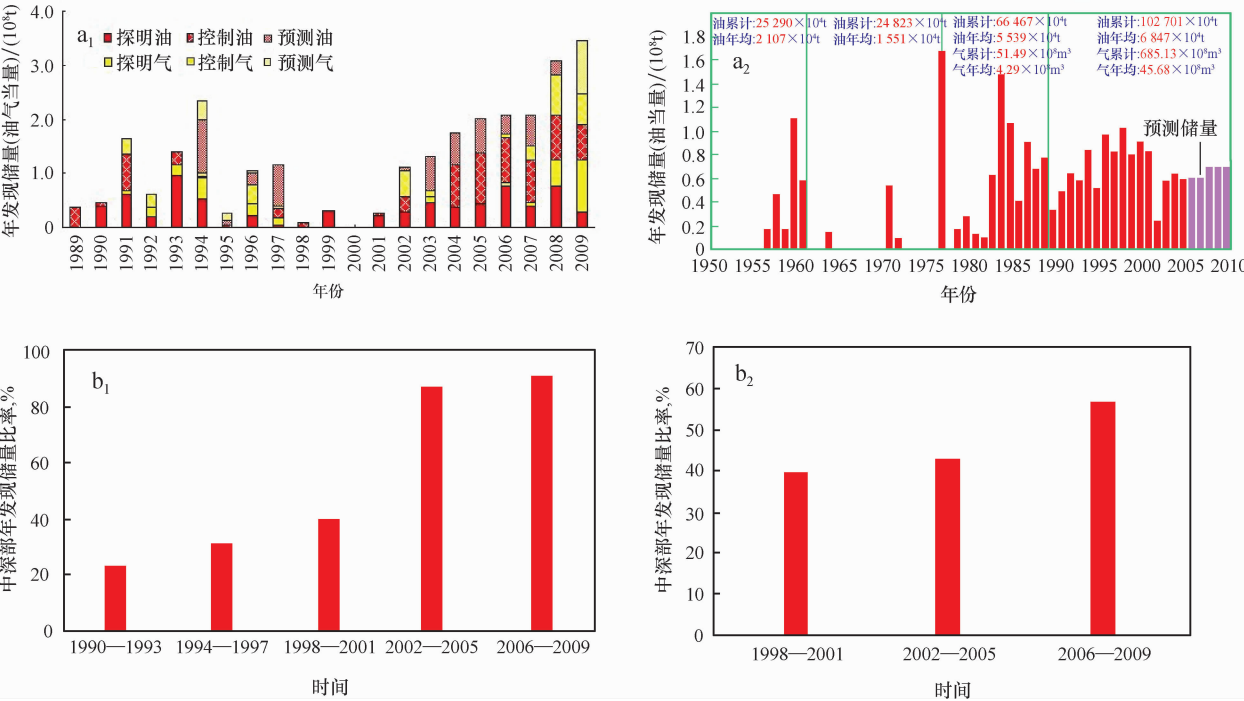


图 2 中国西部主要叠合盆地深部油气储量增长变化

Fig. 2 Reserve growth pattern in the deep of main superimposed basins in western China

a. 西部主要盆地年发现储量增长变化:a₁. 塔里木盆地,b₁. 准噶尔盆地;b. 西部主要盆地中深部年发现储量比率增长变化:
b₁. 塔里木盆地,b₂. 准噶尔盆地

① 国土资源部,国家发展与改革委员会,财政部. 新一轮全国油气资源评价:常规油气资源评价成果图册. 2005. 1 ~ 35

2 沉积盆地深部油气勘探的重大进展为成藏研究奠定了基础

2.1 温度很高,油气的生成机制与浅部地层不同

由于深部油气藏突破了传统的干酪根晚期成油理论液态烃(窗)的温度范围($60\sim 120^{\circ}\text{C}$, $R_o=0.60\%\sim 1.35\%$),其油藏温度比中浅层要高,温度分布范围要广。据统计,意大利发现了油层温度为 153°C 的油田;英国北海地区部分油层温度为 $165\sim 175^{\circ}\text{C}$;美国威利斯顿(Wiliston)盆地发现的油层温度为 180°C ,美国的华盛顿油田、巴尔湖油田及墨西哥湾盆地的帕拉顿油田、别尔油田的油层温度已超过 200°C ;波斯湾马伦油田产层的温度超过 230°C ;俄罗斯滨里海盆地布拉海油藏在 $7\,550\text{ m}$ 深度、温度 295°C 条件下仍有液态烃聚集^[2];我国塔里木盆地东河塘油田油层(埋深 $5\,689\sim 6\,029\text{ m}$)温度也达到 140°C 。对于油气藏和气藏来说,其赋存的温度及范围比油层更高、更宽。

研究表明,当地层温度高达 120°C 以上后,有机母质的镜质体反射率 R_o 通常超过 1.35% ,此时源岩进入了高温热裂解生湿气和干气阶段;已经生成的高分子烃类也会在这一阶段裂解成分子量

较小的气态烃。Pusey(1973)的研究表明,不同的沉积盆地其地温梯度不同,因此有机母质大量转化生烃的门限深度不同,大量热解生油和大量热裂解生气的深度范围也不相同。世界上目前发现的液态石油主要分布在有机母质大量热解生油的范围内(图3)。他将这一范围称之为有利于石油生成、成藏和保存的“石油液态窗”^[32]。

2.2 压实作用强度大,地层的原生孔隙度很小

深部地层埋深大、压实作用强,地层孔隙度普遍偏小(表1;图4)。统计结果显示,深部地层的孔隙度大多在 $10\%\sim 12\%$ 以下。对于碎屑岩而言,自浅而深,地层孔隙度逐步减小,表现出极好的规律性。Ehrenberg(2005)统计了全球除加拿大以外的30 122个碎屑岩油藏孔隙度随深度的变化,发现它们的孔隙度在埋深 $0\sim 2\,500\text{ m}$ 时为 $13.0\%\sim 31.0\%$,埋深 $2\,750\sim 3\,250\text{ m}$ 时为 $10.5\%\sim 23.9\%$,埋深 $4\,750\sim 5\,250\text{ m}$ 时为 $6.8\%\sim 18.0\%$ ^[33]。对于碳酸盐岩而言,由浅至深,虽然孔隙度变化规律复杂,但也呈现出地层孔隙度逐步减小的趋势。统计分析发现,碳酸盐岩储层的孔隙度在埋深 $0\sim 2\,500\text{ m}$ 时为 $6.0\%\sim 28.0\%$,埋深 $2\,750\sim 3\,250\text{ m}$ 时为 $4.9\%\sim 16.0\%$,埋深 $4\,750\sim 5\,250\text{ m}$ 时为 $1.2\%\sim 12.0\%$ 。

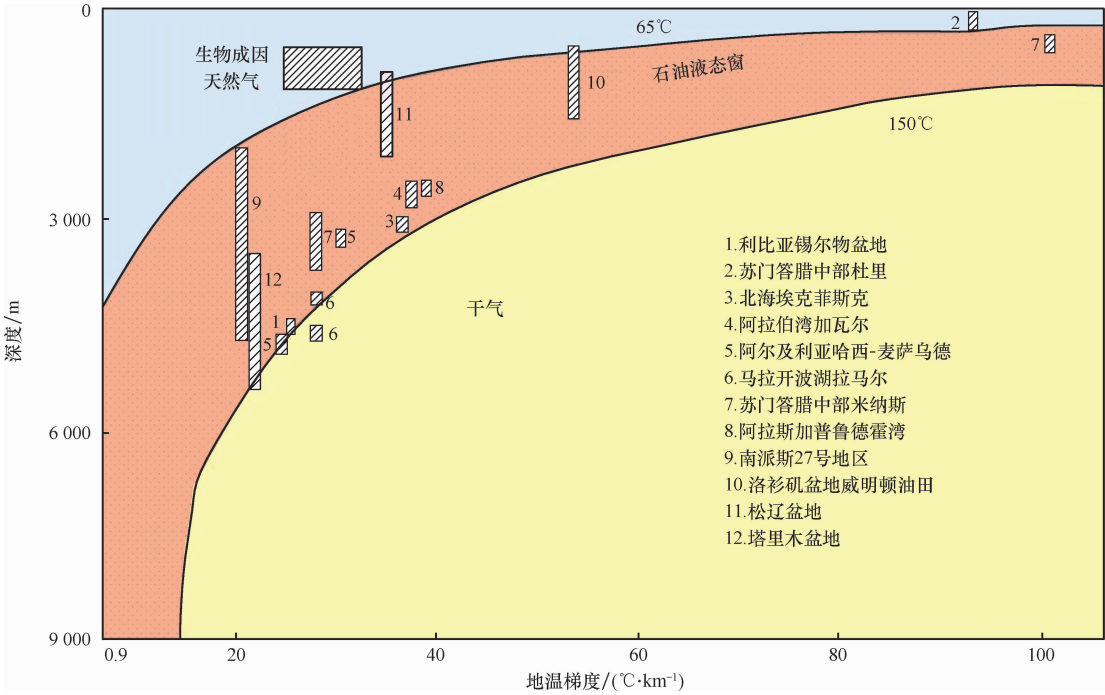


图3 沉积盆地地温梯度差异与液态石油分布^[32]

Fig. 3 Differences of geothermal gradient and distribution of liquid hydrocarbons in sedimentary basins^[32]

表 1 沉积盆地碎屑岩和碳酸盐岩储层孔隙度随深度变化特征

Table 1 Porosity variation with depth of clastic rocks and carbonate rocks in sedimentary basins

储层埋藏深度/km	不同概率条件下对应储层孔隙度统计结果,%					
	概率 90%		概率 50%		概率 10%	
	碎屑岩	碳酸盐岩	碎屑岩	碳酸盐岩	碎屑岩	碳酸盐岩
0 ~ 0.25	13.0	6.0	24.0	18.0	31.0	28.0
0.25 ~ 0.75	14.0	6.0	22.0	16.0	30.5	28.0
0.75 ~ 1.25	14.0	10.0	20.0	12.2	30.0	20.0
1.25 ~ 1.75	12.6	8.0	20.0	12.0	28.0	19.0
1.75 ~ 2.25	12.0	5.1	20.0	10.1	27.0	19.5
2.25 ~ 2.75	11.0	4.5	18.0	10.0	27.0	19.0
2.75 ~ 3.25	10.5	4.9	16.0	8.7	23.9	16.0
3.25 ~ 3.75	10.0	4.9	15.0	7.8	24.5	14.2
3.75 ~ 4.25	8.5	3.0	13.9	8.0	24.0	14.0
4.25 ~ 4.75	8.3	2.6	12.9	8.0	22.0	15.0
4.75 ~ 5.25	6.8	1.2	11.0	7.3	18.0	12.5
5.25 ~ 5.75	6.8	0.9	10.3	6.2	20.0	10.8

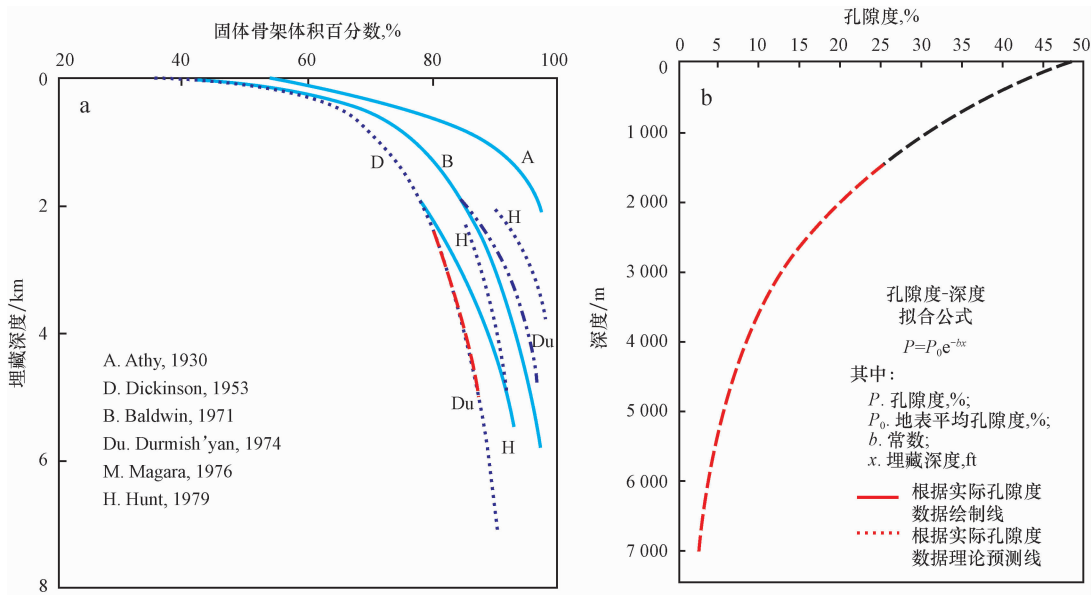


图 4 沉积盆地地层孔隙度随埋深变化特征 a) 及基本模式 b) [35 ~ 38]

Fig. 4 Porosity variation with depth and its basic model in sedimentary basins [35 ~ 38]

实际地质条件下,储层的孔隙度与诸多地质因素有关,其中包括地温梯度、碎屑颗粒粒径、地层年代等^[34]。

2.3 储层孔隙类型多,成因机制复杂

深部油气藏由于埋藏深,成岩程度较高,原生孔隙几乎因机械压实损失殆尽,形成工业性油气藏要靠次生孔隙或次生裂缝(或缝洞、溶洞)来弥补。异常高压、断裂、深部热流体活动等都会对深

部次生孔隙的发育产生有益的影响^[39]。塔里木盆地塔河油田深部奥陶系油藏(5 400 ~ 5 600 m)储层就是典型的次生溶蚀缝洞体,油气储集于巨大的缝洞体系之中(图 5);塔里木盆地轮南地区石英岩石英砂岩储集层,尽管埋深已达 6 000 m,仍保持极高的次生孔隙度。国外勘探也表明,深部油气多聚集于次生孔隙发育的储层中^[28]。加拿大新斯科舍盆地的文图尔气田在上侏罗-下白垩统砂岩储层中发现 3 个次生孔隙带,其中最深的一

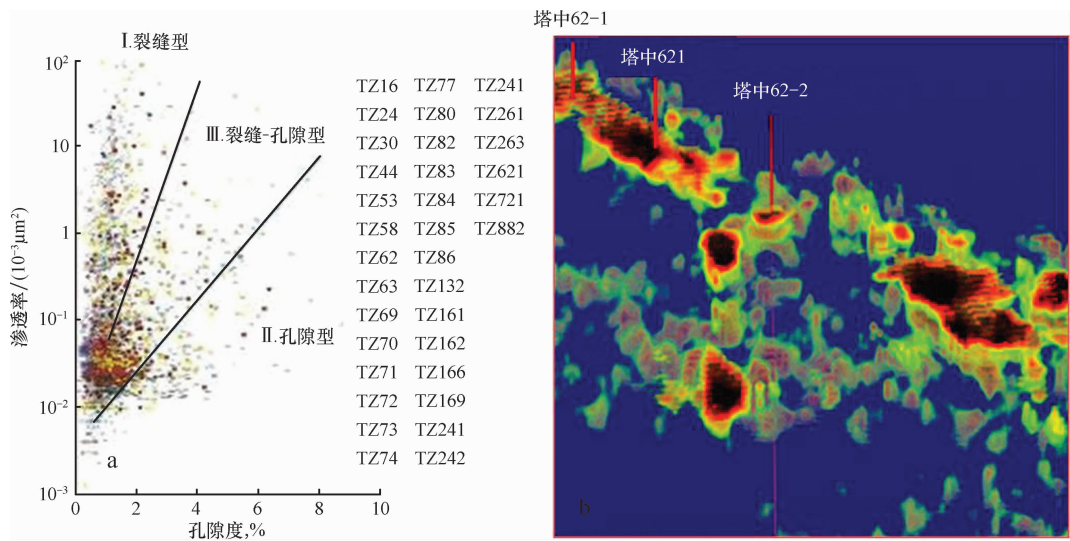


图5 塔里木盆地塔中地区深部碳酸盐岩储层缝洞特征与分类

Fig. 5 Characteristics and classification of fractures and vugs in deep carbonate reservoirs in Tazhong area, the Tarim Basin

a. 碳酸盐岩储层孔、渗关联性 & 分类; b. 碳酸盐岩储层溶蚀孔洞分布

个次生孔隙带(深度大于4 600 m)的孔隙度高达32%;墨西哥湾盆地的华盛顿湖油田埋深6 540 m的中新统储油层次生孔隙和裂缝发育,孔隙度达35%,渗透率达到 $620 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;美国贾伊费尔德气田埋深8 088 m的寒武-奥陶系碳酸盐岩储气层,次生孔、洞、缝大量发育,孔隙度达25%,渗透率为 $1\,020 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;美国墨西哥湾巨型盆地密西西比拗陷的费尔兹河油气田,埋深6 075 m,次生孔隙发育,孔隙度达27%,渗透率为 $1\,290 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.4 油气藏多具异常压力

国外勘探实践表明,深部油气多具异常压力^[40~42]。我国深部优质储油层多存在异常高压^[6,43~47]。库车拗陷大北地区深部气藏埋深超过5 000 m,压力系数为1.2~2.2;南堡凹陷高柳地区深部油藏(3 000~4 100 m),压力系数多介于1.00~1.35,最高达1.5;济阳拗陷东营凹陷深部油气藏[深度大于4 000 m的沙三(沙河街组三段)、沙四油层]压力系数多在1.2以上,个别高达1.8~2.0。近年来的研究及勘探实践表明,沉积盆地的超压体系与油气藏,特别是深部油气藏的关系非常密切。据不完全统计,在全世界21个盆地中目前已经发现了75个与超压有关的埋深大于6 000 m的工业油气藏^[48],寻找超压油气藏将成为

今后深部油气勘探的一个重要目标。除超压外,深部油气藏的另一个特征是显示出异常低的地层压力,这些油气藏往往是一些深盆油气藏或其他非常规油气藏(图6),它们的形成机制与常规油气藏有很大的不同。

2.5 油气相态变化复杂

据不完全统计,世界上199个含油气盆地中共发现深部油气藏1 000多个^[28]。由于处于高温、高压条件,深部油气藏相态较为复杂,主要由气态烃类、石油蒸汽、石油、水蒸汽和水组成。通过对全球范围内70个深部油气藏相态的统计,54%的深部油气藏为油-气混相;40%为气相,即以油-气相或气相为主;油相极少,仅占6%^[16]。这些深部油气藏还具有下述特点:①主要集中在5 000~5 600 m深度范围内;②由于异常高压的存在,使大量石油溶于天然气之中,形成大量凝析气藏;③以油-气混合相和气相为主,油相集中在相对较浅的埋深范围内;④目前所发现的深部油气储量,大多数分布于古老的被动大陆边缘(63%的石油、53%的天然气和86%的凝析气),所有不同大地构造类型的含油气盆地均发现了深部油气田,但富集程度大不相同,年青地台的深部油气资源远多于老地台。图7是塔里木盆地轮南地区油气分布及相态特征比较,不难看出,情况非常复

向西,油气的粘度和密度增大,分别由天然气、凝析天然气向正常油气和稠油变化。整个塔里木盆地都是如此,油气呈现出多种相态特征。它们有时共生,有时独存,受地质条件、自身化学组成和物性特征等多方面因素控制。

3 西部叠合盆地深部油气勘探面临着三方面重大挑战

3.1 多期构造过程叠加复杂,深部油气成藏条件演化历史重建困难

对多期次构造变动过程的恢复与叠合的认识是分析盆地深部油气成藏条件的前提^[50,51]。盆地是油气赋存的场所,盆地的演化控制了油气藏形成的动力学条件和背景^[52]。与盆地形成过程相对应的充填过程和层序的发育是对盆地整体动力学过程的响应,受到盆地构造作用、气候条件、物源体系变化等多因素综合作用的控制^[53]。构造运动与演化是最重要的控制因素。尽管人们对于西部叠合盆地深部构造发育的大地构造背景、成因机制和地表与地下的耦合机制都有了一定程度的认识,但由于经历了多次构造变革,中国西部叠合盆地深部构造相当复杂,目前仍有一些基本构造问题没有得到很好的解决,如多期构造过程叠加与深部地层埋藏历史恢复、多期构造过程叠加与深部温压场演化历史恢复、多期构造过程叠加与深部地层应力应变响应等,

都有待深入研究。不搞清它们的形成和演化就不可能搞清深部油气藏的形成和分布。中国晚期的构造变革运动,尤其是近代喜马拉雅山的隆升对早期形成的构造格局有着重大的影响^[54~56]。不考虑这些因素对西部叠合盆地油气藏形成、演化和最终分布的影响,就不可能阐明当前油气的分布规律。

3.2 深部油气来源与演化复杂,有利勘探领域预测困难

国内外大量的研究成果表明,油气是沉积盆地中的有机母质在适当的温度(60~135℃)和压力(埋深间于1 500~4 500 m)条件下主要由热降解作用生成^[38,57,58]的。这一传统的生烃模式不能解释塔里木盆地目前在塔北隆起、塔中隆起和巴楚隆起上发现的大量的高温裂解天然气(图8)。研究表明,这些热裂解成因的天然气来源于盆地深部,目前提出了可能的5种成因机制,它们分别是烃源岩干酪根热裂解成因^[59,60]、原油裂解成因^[61~65]、可溶有机质生气/有机质“接力”生气^[66~68]、生物降解沥青砂热裂解成因^[69,70]和生物成因气^[71]。这些成因类型的深部天然气可在同一盆地并存。不少人认为塔里木盆地海相混源油气

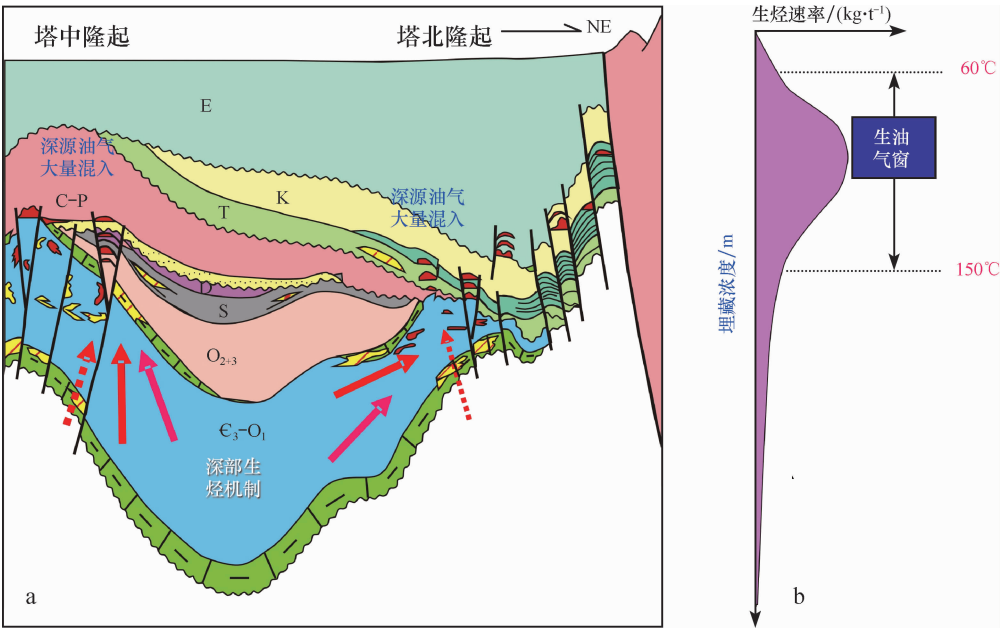


图8 传统的热降解生烃模型不能解释塔里木盆地深部油气来源

Fig. 8 Origins of oil/gas in the deep of the Tarim Bain cannot be interpreted by traditional thermal degradation model
a. 深部油气藏聚集了大量深源高温裂解气;b. 干酪根热解生烃模型(据 Tisso 和 Welte,1978;Hunt,1979)

普遍,其中干酪根裂解气主要分布在雅克拉、东河塘、轮南、解放渠东、桑塔木、塔中和巴楚构造带;原油裂解气分布在塔北隆起、北部坳陷、中央隆起和塔西南坳陷^[59,72]。综合多种实验发现,低温降解以甲烷快速增长为标志,高温裂解以丙烷迅速递减为主要表现,用于区分原油与干酪根裂解气^[73]。基于我国海相地层时代老、演化程度偏高、高-过成熟干酪根热降解生气潜力有限,赵文智等(2005)提出有机质“接力成气”模式,并将其扩展到地质体的评价,即气源灶的分布、演化和变迁研究,将“分散可溶有机质”的定义进行了厘定、含义进行了深化,明确提出分散可溶有机质是高演化阶段的最主要气源,具有广阔的勘探前景^[67,74]。

不同学者关于深部油气的来源与成因的认识尚不统一。动力学模拟实验表明,在150℃时海相碳酸盐岩烃源岩生成的原油将开始热裂解并生成大量天然气,温度达到220℃时裂解生气基本结束,天然气就全部取代石油^[75,76]。虽然多数石油存在于65.5~149℃温度范围内,但在塔里木盆地的一些油藏中,储层目前温度高于原油裂解温度而油藏并未发生裂解^[77]。TSR(硫酸盐热化学还原反应)作用过程对原油氧化降解成气具有明显的促进作用,结果导致烃类气体的生成时间提前、干燥系数增大^[78],目前对TSR的作用机理及其在原油裂解成气中的作用程度的研究仍很薄弱。相当多的学者支持塔里木盆地海相古油藏原油裂解成气的观点^[79],塔中地区干酪根与原油的裂解气的含量分别为13.2%和86.8%。存在的问题是,目前尚不能明确指出发生过原油裂解的古油藏的分布,也似乎未曾见到诸如四川地区威远及资阳震旦系古油藏裂解后储层中存在的大量焦沥青。通过研究,初步界定了海相干酪根天然气生成成熟度上限与生气潜力。封闭热模拟实验揭示,海相I、II型干酪根的天然气生成成熟度上限或“生气死亡线”为镜质体反射率 R_o 3.0%。生烃动力学模拟实验显示,I型干酪根主生气期的 R_o 值为1.4%~2.4%;II型干酪根主生气期的 R_o 值为1.5%~3.0%^[80]。海相油气的来源和相对贡献与油气资源评价、油气勘探领域休戚相关,但研究难度很大。

3.3 深部相对高孔渗储层成因机制复杂,勘探目标分布预测困难

随着中国西部叠合盆地深部油气勘探的深入,储层地质问题已上升为制约深部油气勘探主要的瓶颈之一。储层物性的好坏受控于原始沉积相带和后期埋藏过程中的成岩演化、构造叠加和深部热流体作用。有效储层成因机制与发育模式研究一直受到勘探地质学家的高度重视。由于中国西部叠合盆地深部埋藏深,地质条件多变,影响次生孔隙、裂缝发育的地质因素和形成机理复杂^[81],因此形成相对高孔渗的机制和地质控制因素研究难度大,包括储层发育的主控因素研究、成岩作用的动力机制、成岩流体-岩石相互作用研究等,使得有效储层发育特征和分布规律难以预测。图9为塔里木盆地塔北隆起塔河油田的分布模式,反映出深埋条件下高孔渗储层的存在及其复杂的成因机制。

3.4 深部油气成藏机制复杂,圈闭含油气性预测困难

对于油气在浅层运聚成藏过程的研究,已取得普遍共识。油气自烃源岩排出之后的运移和聚集实际上是一系列流体流动动力学过程的不同表现形式,发生在一个由储集层、断层及不整合面相互交错和影响所构成的复杂的立体运移通道系统内,是沿当时具有流体动力学连通性输导体系发生运移、在动力条件平衡部位暂时聚集的地质过程^[84]。优势运移路径的形成不仅取决于运移的动力背景,还明显受控于通道环境:地层的起伏特征、储集层的非均质性、断裂或裂缝的发育和分布都起着十分重要的作用^[84]。对此复杂系统的研究,仅靠定性的分析远远不够,定量的成藏动力学研究已成为目前该领域研究的前沿^[85~87]。由于西部叠合盆地深部油气藏的形成经历了由浅到深,从早到晚至现今,长期、多期构造运动和成岩演化,多源、多阶段、多机制成藏过程相互叠加复合,导致了十分复杂的油气成藏过程,油气的生、运、聚、散机理也十分复杂(图10)。因此,要弄清深部油气藏成藏与分布规律,揭示高温、高压条件下深部油气藏形成的复合成藏机制十分关键;而深部油气藏成藏机理的研究也成为深部油气藏研究的主要焦点之一,急需深入。

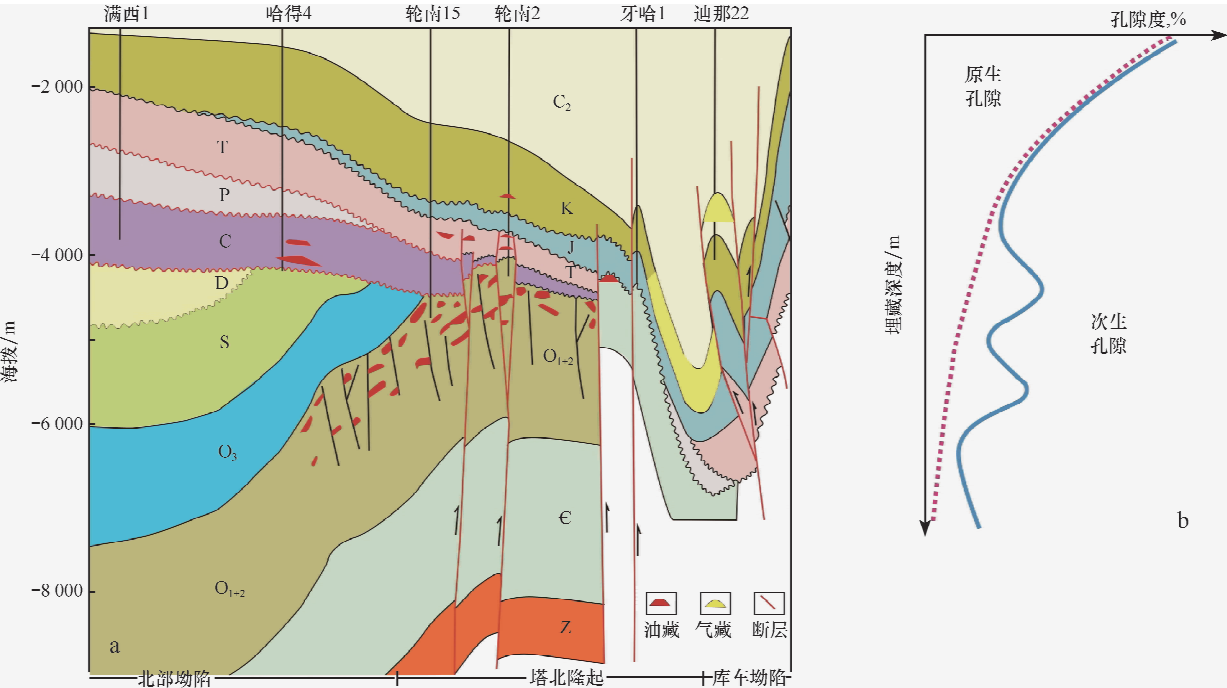


图9 塔里木盆地深部高孔渗碳酸盐岩储层成藏特征

Fig.9 Characteristics of hydrocarbon accumulation in deep carbonate reservoirs with high porosity and permeability in the Tarim Basin

a. 塔北隆起塔河油气田分布模式;b. 储层孔隙度变化模型(据 Hubbert 等,1959;Magara 等,1968) [82,83]

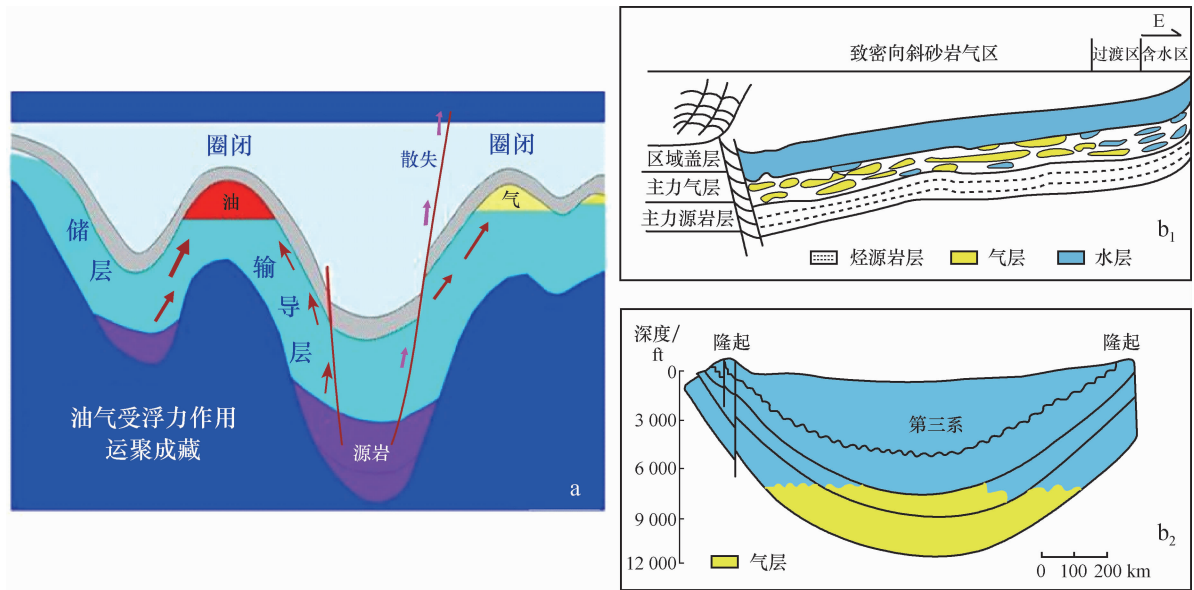


图10 背斜成藏理论不能阐明深部坳陷区油气藏形成与分布

Fig.10 Anticline accumulation theory cannot clarify pool forming and distribution in deep depressions

a. 浮力成藏理论指导背斜油气藏勘探;b. 不同国家发现的非背斜类深盆气藏:b₁. 中国鄂尔多斯盆地,b₂. 美国红色沙漠盆地

4 选择西部开展三方面研究、发展成藏理论并促进储量增长

本文提出的需要解决的核心科学问题是,中

国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律,它包括了3个层面:一是中国西部叠合盆地多期构造过程叠加与深部油气生成演化;二是中国西部叠合盆地深部有效储层形成机制与发育模式;三是中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机

制与油气富集规律。这一核心科学问题的解决是阐明中国西部叠合盆地深部油气富集和分布规律的前提和基础。

4.1 开展成藏研究,解决三方面科学问题

4.1.1 中国西部叠合盆地多期构造过程叠加与深部油气生成演化

叠合盆地深部构造过程叠加与演化是造成深部油气地质条件与浅部油气地质条件差异的根源,也决定着深部和浅部油气成藏与富集规律的不同。叠合盆地形成过程中不同类型盆地的叠加和复合导致了深部构造过程的叠加和复合,主要表现在深部构造形态的变化和埋藏深度的变化,包括褶皱形变、断裂产生和地表地层被剥蚀。与此同时,盆地内部应力场、流体动力场和地温场发生改变。应力场的作用产生断裂和裂缝,形成油气运移的优势通道和高孔滞储层;流体动力场作用导致低势区的形成和油气的运聚;地温场的作用使源岩发生热降解作用并形成油气,在埋藏较深的领域发生古油气藏的裂解破坏和沥青砂的二次生烃,甚至发生无机生烃作用;关键构造变革时期深部热流体活动及其与岩石的相互作用形成大量次生孔隙,有利于优质储层的形成和深部油气

的聚集成藏。因此,搞清叠合盆地深部构造过程特征,研究地应力场、流体动力场和地温场的演化,阐明多元油气的生成,对于揭示叠合盆地深部油气地质特征具有十分重要的意义。它是本研究关注的第一个关键科学问题。图 11 为复杂构造过程解析的概念模型。图 11a 是塔里木盆地中的一个横切盆地的大剖面,多个不整合的存在反映多期构造过程叠加;图 11b 是平衡剖面解析柴达木盆地构造演化过程特征的实例^[88,89]。

要解决这一科学难题涉及到诸多相关的问题,其中包括构造过程叠加、温压场的演化、应力与应变响应、高温压条件下油气的生成与演化等。本文认为,最关键也最困难的问题是构造演化过程叠加与高温压条件下油气的生成与演化,它包括油气来源判识、不同来源油气的生成机制、油气相态转化机制、油气相对贡献评价等。通过生标绝对定量对比和岩石包裹体单体烃碳同位素分析,可搞清深部裂解天然气的来源及不同来源的相对贡献量大小;通过高温压条件下的物理模拟实验,可揭示不同来源的深部天然气的成因机制和潜力。为此,建议采用地质过程分析与构造过程模拟相结合的方法解决构造问题(图 11)。通过地质过程分析,可以搞清构造变动期次、强度、变形特征、动力来源和性质;通过构造过程模拟,

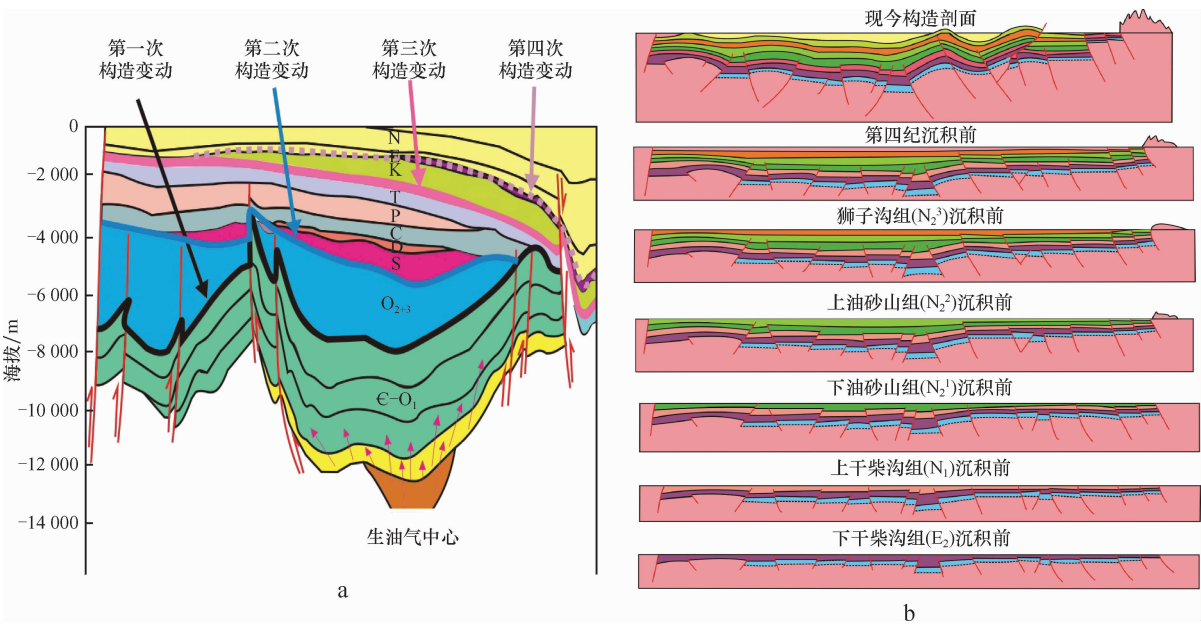


图 11 叠合盆地深部构造过程叠加与演化历史恢复方法概念模型

Fig. 11 Conceptual models for reconstructing overprinting of tectonic processes and evolution history in deep superimposed basins

a. 塔里木盆地多个不整合面反映多期构造运动叠加; b. 平衡剖面解析柴达木盆地构造发育过程

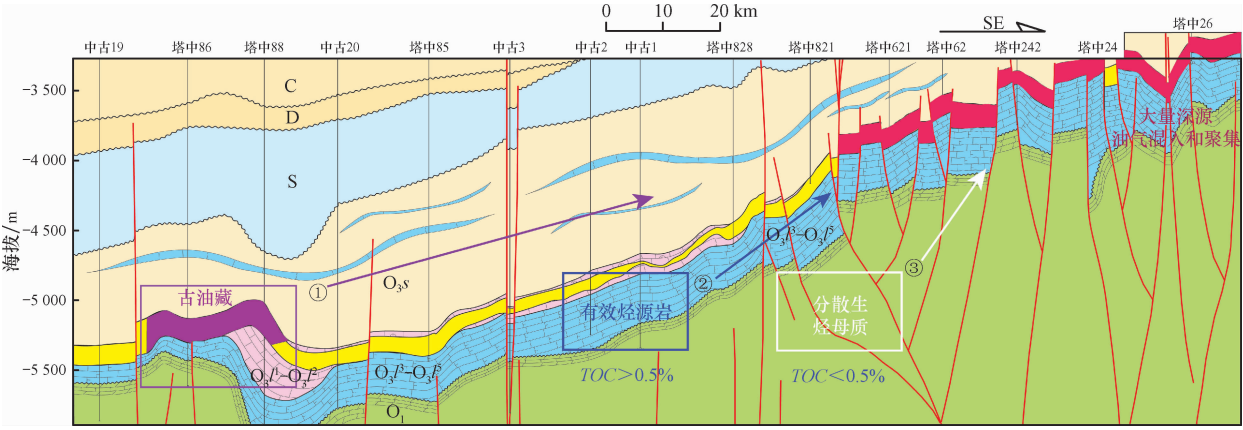


图 12 深部油气来源与成因机制研究概念模型

Fig. 12 Conceptual models for the study of hydrocarbon origin and generation mechanisms in the deep of basins

① 古油藏破坏和裂解提供油气;② 源岩层深部继续生、排烃;③ 分散有机母质接力生、排烃

可以揭示应力应变机制、地层变形过程、应力与应变关系。将两方面的成果相互检验和印证,就可以达到解决第一个关键科学问题的目的。建议采用现代高精度分析测试技术和高温压条件下物理模拟实验技术,解决与油气生成和演化相关的问题(图 12)。

4. 1. 2 中国西部叠合盆地深部有效储层形成机制与发育模式

在深部地质条件下,沉积岩相的控油气作用减弱,次生孔隙的控油气作用增强,甚至变为主导。勘探实践证明,在西部叠合盆地深部存在的高孔渗有效储层多种多样,构造裂缝、成岩裂隙、溶蚀孔洞、灰岩礁滩体、有利岩相带等是决定储层物性好坏的主要因素。这些储层因埋藏较深、演化历史较长、成因机制较多,分布规律复杂,地质-地球物理探测困难。它们的形成既与原始的沉积岩相有关,也与后期的构造变动(包括期次、强弱、形式)有关,还与深部高温压作用和热流体活动有关。成功预测这些有效储层还必须发展与其相关的地质-地球物理探测技术,尤其是要发展深部裂隙介质的探测技术、薄互砂岩层的探测技术、礁滩体的探测技术和含气流体的探测技术。搞清深部有效储层的基本类型、阐明它们的成因机制、建立它们的分布发育模式、研发它们相关的探测技术,对于提高深部有效储层探测的成功率、降低油气勘探风险具有十分重大的现实意义。它是本项研究关注的第二个关键科学问题。

要解决第二个关键科学问题涉及到诸多相关

问题的研究,其中裂缝和溶洞复合型储层成因机制的研究最为关键和重要,它涉及到多期构造变动和多期流体活动及其关联性。在实际工作中,建议采用地质分析与成因模拟相结合的方法来解决。通过地质分析,可搞清构造裂缝与溶蚀孔洞的分布特征及二者的共生性与关联性;通过模拟实验,可揭示构造裂缝与溶蚀孔洞成因机制及高温压条件下流体-岩石作用机制。结合两方面的研究成果,可以达到解决第二个科学难题的目的。

4. 1. 3 中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与油气富集规律

叠合盆地深部油气成藏作用与浅部油气成藏作用的不同首先表现在成藏条件的差别上。浅部地层内温度低、压力低,介质条件相对高孔渗,油气运聚主要受浮力控制,盖层是形成油气藏必不可缺的地质要素;而深部地层的温度高、流体压力大,介质条件相对致密,油气运聚受多种动力条件的控制,盖层有时不起作用。在浅部地质条件下,油气分布常常表现出高层位封盖、高孔渗内富集和构造高点成藏的特征;在深部条件下,除了表现出具有浅部一样的成藏特征外,还常常表现出气水倒置、相对低孔渗内聚集、相对低凹区成藏的特征。事实上,深部地层的成藏作用往往是浅部成藏和深部成藏作用的叠加和复合,具体包括埋深过程中多源成藏过程的叠加和复合、多阶段成藏过程的叠加和复合、多动力成藏过程的叠加和复合等,情况比浅部成藏复杂得多。在宏观上,浅部油气分布受烃源灶、古隆起、区域盖层和有利相带

四大要素的匹配关系控制;而深部油气除受这些要素的控制外,还受深部裂解烃源灶、深部次生孔隙发育带等更多地质要素的控制。因此,搞清深部油气复合成藏机制和富集规律,对于指导深部油气勘探并提高勘探成效具有十分重要的现实意义。它是本项研究关注的第三个关键科学问题。

要解决这一问题涉及到诸多相关的研究内容,其中包括深部与浅部成藏的动力学边界条件判别、深部成藏动力学机制模拟、深部和浅部成藏过程的叠加与复合等。在这些问题中,深部与浅部成藏的动力学边界条件判别的研究最为关键,也最为困难,建议采用统计分析、物理模拟和数值模拟三方面相结合的方法予以解决(图 13)。通过统计分析,可以搞清浅部油气藏与深部油气藏之间的差异性以及二者之间的界限标准;通过物理模拟实验,可以揭示深盆油气藏的形成机制与成藏范围^[90];通过数值模拟,可以揭示深部致密气藏形成的顶界埋深及其变化规律^[91]。

4.2 开展成藏研究的学术思想和研究方法

4.2.1 学术研究思想与技术路线

开展叠合盆地深部油气成藏研究要紧紧围绕

“叠合盆地深部油气复合成藏机制”这一核心问题,确立“深部成藏条件—深部复合成藏机制—深部成藏规律与分布预测”为主线的学术研究思想和动力学过程研究方法,重点选择剩余资源最大的塔里木盆地和准噶尔盆地的深部领域开展研究。以多期构造过程叠加和深埋背景下的高温高压场和多相态流体场演化研究为前提,以多元油气生成机制和多类有效储层成因机制研究为基础,以多源多阶段多动力成藏过程复合叠加研究为主线,展开上列三个层面的关键科学问题研究。在实际工作过程中,采用正演模拟和反演追溯两种基本途径相结合的技术路线,揭示叠合盆地深部油气藏形成机制和分布规律。通过正演模拟,可搞清盆地演化过程中油气地质条件的发育、演化和对油气藏形成和分布的控制;通过对已发现深部油气藏的剖析,可揭示油气藏的组成特征、富集条件和主控因素。将正演和反演成果结合起来,可揭示深部油气藏的分布规律(图 14)。

4.2.2 研究内容与研究区选择

围绕一个核心科学问题、三个层面的关键科学问题,拟设立六个课题、四方面内容的研究(图 15)。图 15 中的问题之一、问题之二和问题之三

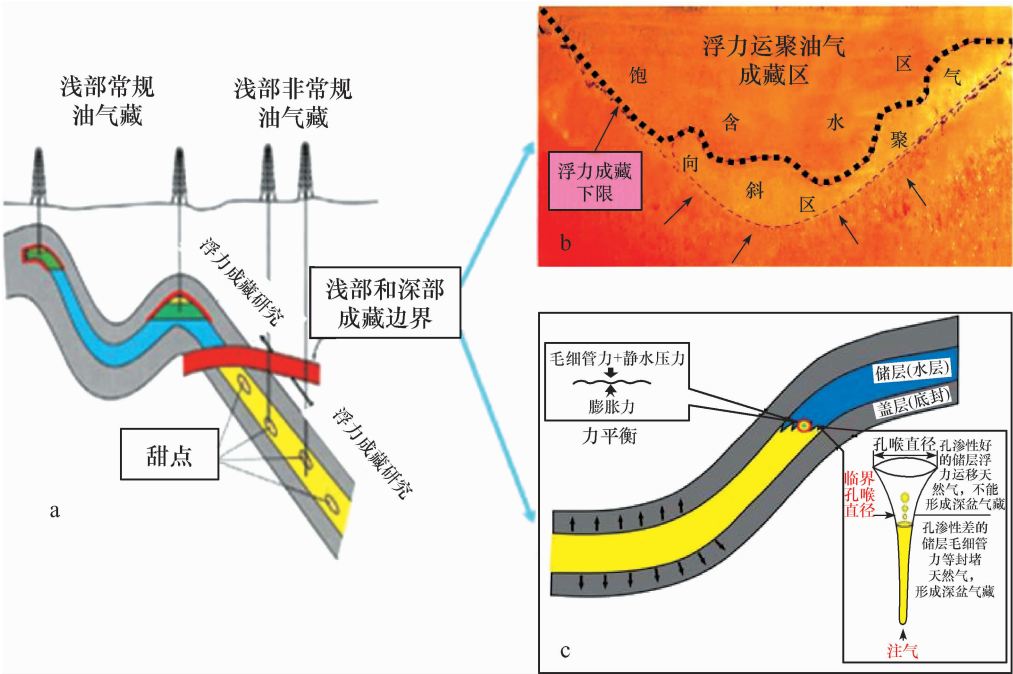


图 13 深部与浅部成藏动力学边界研究概念模型

Fig. 13 Conceptual models for the study of dynamic boundaries between the deep and shallow hydrocarbon accumulations

a. 深部与浅部成藏特征差异性分析;b. 深盆气成藏机制与范围物理模拟;c. 深盆气成藏顶界与变化数值模拟

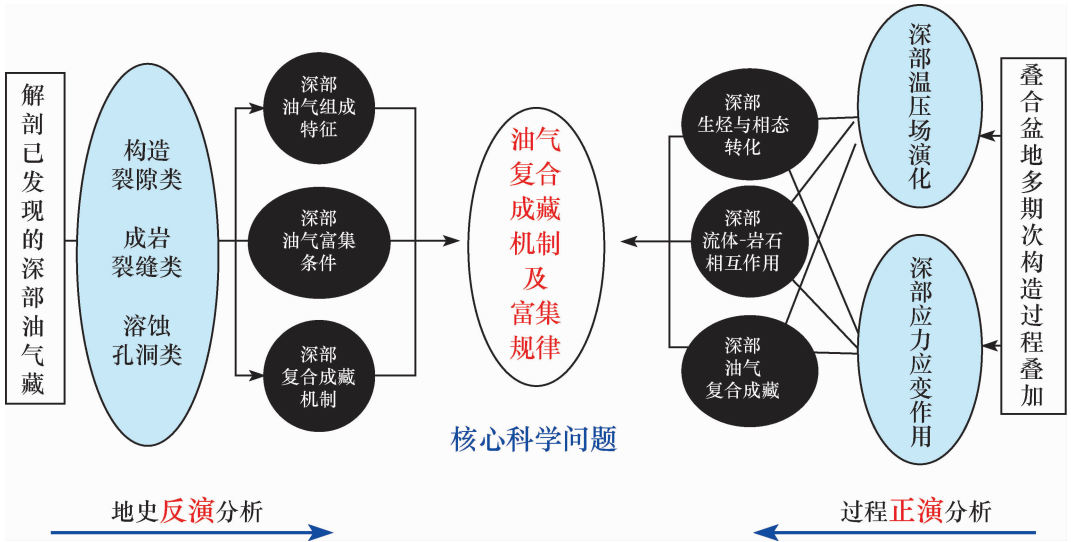


图 14 叠合盆地深部油气成藏机制与富集规律研究技术路线

Fig. 14 Technical route of research on accumulation mechanism and enrichment pattern of hydrocarbons in the deep of superimposed basins

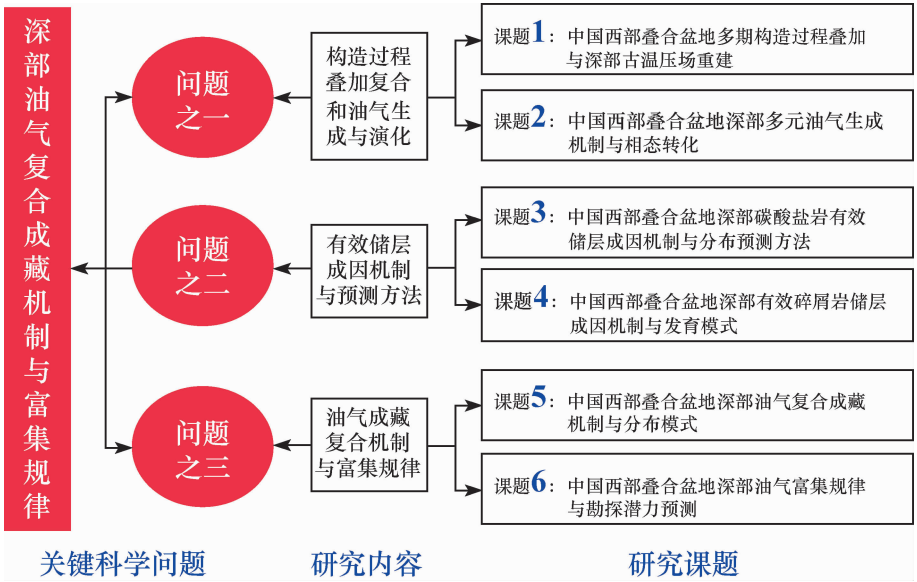


图 15 盆地深部油气成藏研究的关键科学问题、主要内容与相关课题

Fig. 15 Key scientific issues, main contents and relevant subjects of hydrocarbon accumulation in the deep of superimposed basins

就是指前面提到的三个关键科学问题。课题 1 和课题 2 重点研究构造过程叠加复合和油气生成与演化两方面的内容,主要是解决第一个关键科学问题;课题 3 和课题 4 集中研究有效储层成因机制与预测方法,主要是解决第二个关键科学问题;课题 5 和课题 6 集中研究油气成藏复合机制与富集规律,主要是解决第三个关键科学问题。在解决了这三个科学问题之后,最终实现核心科学问题的解决。

1) 研究切入点

从多期构造变形和深埋演化过程两个关键环节入手,研究深部高温压场和多相态流体场演化;从深部多因素的联合作用过程分析入手,揭示深部多孔隙类型的发育序列及有效储层的成因机制;从多元油气生成演化机制入手,搞清深部油气的来源与潜力;从多源多阶段多动力成藏过程的叠加和复合入手,阐明深部复杂油气藏的形成机制和分布发育规律。

2) 研究方法和手段

通过野外考察、地质分析、典型实例剖析和油气成藏定量(物理/数值)模拟等手段,研究油气成藏过程的复合叠加机制,阐明深部油气富集规律。通过剖析已发现的深部油气藏,反演追溯叠合盆地油气藏形成的过程与特征。采用高分辨率地震、分子标志物绝对定量、同位素和包裹体定年、特殊非烃组分参数等最新技术,综合研究油气藏的地质特征,确定它们的成藏期次、油气来源、油气充注途径及主要源灶相对贡献。

3) 研究区选择

主要选择塔里木盆地和准噶尔盆地为重点地区展开研究。通过对目前已发现的油气富集区带和具有代表性的重要区带的深部油气藏进行深入细致的解剖,从点到线、由线及面、自面入体,实现对叠合盆地深部油气复合成藏机制的整体认识。之所以选择这两个盆地,主要有两个理由。一是因为它们均属典型的复杂叠合盆地,两者差异大,多年的油气勘探已积累了大量资料和研究成果,目前深部勘探难度大、问题比较明确,对它们展开研究有利于前面提到的关键科学问题的解决。二是这两个盆地内深部的剩余油气资源约占西部叠合盆地深部剩余资源总量的85%以上,对这两个盆地开展研究有利于国家发现更多的油气资源。

4.2.3 研究目标和创新成果

开展叠合盆地深部油气成藏机制与分布规律研究的最终目的是发展叠合盆地深部油气富集理论,预测潜在的油气藏分布,指导当前的油气勘探生产,加快我国西部深层油气勘探进程,促进储量和产量的快速增长。具体来说,就是通过恢复深部地层的构造过程叠加史、高温压场油气生成演化史、多孔洞有效储层与复杂圈闭演化史和油气生排运聚史,揭示不同阶段、不同来源和不同动力机制的油气成藏过程特征,在此基础上探索油气藏在同一地区、同一目的层内的叠加和复合机制及其油气分布规律,为叠合盆地深部油气勘探提供理论指导。通过对叠合盆地深部油气复合成藏机制和分布规律的研究,期望实现下列四个目标:

1) 揭示中国西部叠合盆地深部高温压环境下油气生成与演化机制,为深部油气勘探提供地质依据;

2) 揭示中国西部叠合盆地深部致密背景下

有效储层的成因机制与发育模式,为深部油气勘探提供有效目标;

3) 揭示中国西部叠合盆地深埋条件下多源多阶段多动力成藏过程的复合特征并建立油气藏分布模式,为深部油气勘探提供理论指导;

4) 研发适合中国西部叠合盆地深部油气勘探新的配套技术,通过应用指明西部叠合盆地深部油气勘探潜力和最有利领域,为西部叠合盆地深部油气储量的快速增长提供地质保障。

5 开展西部叠合盆地深部成藏研究具有重大现实意义

1) 选择我国西部叠合盆地具有巨大资源潜力的塔里木盆地和准噶尔盆地的深部领域开展研究,有利于缓解我国油气资源的短缺,对于改善我国以煤炭占70%的能源结构具有积极意义。该项研究将推动西部叠合盆地油气勘探进程,加快实现我国油气生产基地由东部向西部、由浅层向深部的重点转移。

2) 文中建议解决的关键科学问题既是当前中国西部叠合盆地油气勘探中遇到的、急需解决的重大课题,也是当前国际含油气盆地分析和石油地质研究的前沿性课题。“中国西部叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律”这一核心科学问题的研究,涉及到“叠合盆地多期构造过程叠加与深部油气生成演化”、“叠合盆地深部有效储层的形成机制与分布模式”、“叠合盆地深部油气复合成藏机制与富集规律”等三个关键科学问题,它们同时也是世界油气地质研究领域前沿的学术难题。解决这些难题将使我国在复杂叠合盆地深部油气地质与勘探领域的研究处于世界领先水平,实现从地质大国向地质强国的转变。

3) 文中建议研究的科学难题,需要组织产、学、研相结合的研究队伍开展持续的攻关研究。我国科技部已经组织了几个有关叠合盆地的油气成藏研究,在相关资料和成果的基础上开展深部油气成藏研究有利于问题的快速解决和取得更大成效^[92,93]。通过国内优势单位和长期合作学者的共同努力,可以集中更多人的智慧解决与叠合盆地油气勘探相关的世界级难题;通过油田专家的参与,可以更快更准地切入问题、收集资料,有利于产业部门及时应用理论成果解决生产问题、推

动储量和产量的快速增长。此外,通过产、学、研结合,还可以加快年轻人才的培养,保障叠合盆地油气勘探事业的可持续发展。

致谢:本文是在国家重点基础研究规划(973)项目“中国西部叠合盆地深部复合成藏机制与富集规律”的形成和论证过程的基础上形成的,得到了相关部门领导和专家的指导,汇集了国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB202300)全体参加人员和指导专家们的智慧和辛劳,在此深表感谢和敬意!

参 考 文 献

1 Sugisaki R. Deep-seated gas emission induced by the earth tide-basic observation for geochemical earthquake prediction [J]. Science, 1981, 212: 1264 ~ 1266

2 康玉柱. 塔里木盆地塔河大油田形成的地质条件及前景展望 [J]. 中国地质, 2003, 30(3): 315 ~ 319

3 马永生, 郭彤楼, 赵雪凤, 等. 普光气田深部优质白云岩储层形成机制 [J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(A02): 43 ~ 52

4 Ma Yongsheng, Zhang Shuichang, Guo Tonglou, et al. Petroleum geology of the Puguang sour gas field in the Sichuan Basin, SW China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25: 357 ~ 370

5 妥进才. 深层油气研究现状及进展 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 565 ~ 569

6 譙汉生, 方朝亮, 牛嘉玉, 等. 中国东部深层石油地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 24 ~ 162

7 Barker C, Takach N E. Prediction of natural-gas composition in ultra-deep sandstone reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(12): 1859 ~ 1873

8 康竹林. 中国深层天然气勘探前景 [J]. 天然气工业, 2000, 20(5): 1 ~ 4

9 郝芳, 邹华耀, 倪建华. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件 [J]. 地球科学, 2002, 27(5): 610 ~ 615

10 Dyman T S, Riee D D, Schmoker J W, et al. Geologic studies of deep natural resource in the United States [A]. In: The Future of Energy Gases [C]. US Geological Survey Professional Paper 1570, 1993. 171 ~ 203

11 李小地. 中国深部油气藏的形成与分布初探 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(1): 34 ~ 39

12 佐恩 M C. 预测深部储集层类型 [J]. 关福喜, 译. 石油地质信息, 1995, 16(2): 39 ~ 42

13 罗德任芙斯卡娅 М И. 深埋层的含油气性 [J]. 史斗, 译. 天然气地球科学, 2001, 12(4 ~ 5): 49 ~ 51

14 张之一. 更新勘探观念, 开拓深层油气新领域 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 193 ~ 196

15 迈哈蒂耶夫 П Г. 深埋层含油气性的地温前提条件 [J]. 史斗, 译. 天然气地球科学, 2001, 12(4 ~ 5): 60 ~ 67

16 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

17 赵文智, 张光亚, 王红军. 石油地质理论新进展及其在拓展勘探领域中的意义 [J]. 石油学报, 2005, 26(1): 1 ~ 12

18 刘池阳, 赵重远. 活动性强, 深部作用活跃: 中国沉积盆地的两个重要特点 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 1 ~ 6, 23

19 萨姆维洛夫 P Г. 深部油气藏的形成特点与分布 [J]. 关福喜, 译. 西北油气勘探, 1997, 9(1): 52 ~ 57

20 刘光鼎. 试论残留盆地 [J]. 勘探家 (石油与天然气), 1997, 2(3): 1 ~ 4

21 朱光有, 张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力 [J]. 石油学报, 2009, 30(6): 57 ~ 60

22 谢晓安, 周卓明. 松辽盆地深层天然气勘探实践与勘探领域 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 113 ~ 119

23 Bally A W, Snelson S. Realms of subsidence [A]. In: Miall A D, ed. Facts and principles of world petroleum occurrence [C]. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memory, 1980. 9 ~ 94

24 Kutcherov V. Theory of abyssal abiogenic petroleum origin: challenge for petroleum industry [J]. AAPG European Region Newsletter, 2008, 3: 2 ~ 4

25 Burruss R C. Stability and flux of methane in the deep crust a review [A]. In: The future of energy gases [C]. US Geological Survey Professional Paper 1570, 1993. 21 ~ 29

26 冯志强. 松辽盆地庆深大型气田的勘探前景 [J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 1 ~ 6

27 宋传春, 彭勇民, 乔玉雷, 等. 准噶尔盆地中国石化探区油气勘探方向探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 453 ~ 455

28 吴富强, 鲜学福. 深部储层勘探、研究现状及对策 [J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(2): 68 ~ 71

29 蔡立国, 金之钧, 陈孔全, 等. 中国海相层系油气基本特点与潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 557 ~ 564, 573

30 马永生, 蔡勋育, 郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素 [J]. 科学通报, 2007, 52(A01): 149 ~ 155

31 刘树根, 汪华, 孙玮, 等. 四川盆地海相领域油气地质条件专属性问题分析 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 781 ~ 792, 818

32 Pusey W C. The ESR-kerogen method: how to evaluate potential gas and oil source rock [J]. World Oil, 1973, 176(5): 71 ~ 75

33 Ehrenberg S N, Nadeau P H, Sandstone V S. Carbonate petroleum reservoirs: a global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(4): 435 ~ 445

34 Scherer M. Parameters influencing porosity in sandstones: a model for sandstone porosity prediction [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 485 ~ 491

35 Athy L F. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks [J]. AAPG Bulletin, 1930, 14: 1 ~ 21

36 Dickinson G. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast, Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(2): 410 ~ 432

37 Magara K. Water expulsion from clastic sediments during compac-

- tion—directions and volumes[J]. AAPG Bulletin, 1976, 60: 543 – 553
- 38 Hunt J M. Petroleum geochemistry and geology[M]. San Francisco, USA: W H Freeman and Company, 1979. 25 – 189
- 39 黄洁. 深部碎屑岩储层层次孔隙发育机理研究进展[J]. 地质科技情报, 2007, 26(6): 76 ~ 81
- 40 Spencer C W. Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in western United States[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(5): 613 – 629
- 41 Surdam R C, Jiao Z S, Heasler H P. Anomalously pressured gas compartments in Cretaceous rocks of the Laramide basins of Wyoming: a new class of hydrocarbon accumulation[J]. Seals, Traps, and the Petroleum System, 1997, 67: 199 – 222
- 42 Ryder R T, Zagorski W A. Nature, origin, and production characteristics of the Lower Silurian regional oil and gas accumulation, central Appalachian basin, United States[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(5): 847
- 43 查明, 张卫海, 曲江秀. 准噶尔盆地异常高压特征、成因及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 31 ~ 39
- 44 郝芳, 邹华耀, 倪建华. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件[J]. 地球科学, 2002, 27(5): 610 ~ 615
- 45 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 113 ~ 131
- 46 Pang Xiongqi, Li Sumei, Jin Zhijun, et al. Origin and accumulation of the oils from Bamianhe Oilfield, Bohai Bay Basin, Eastern China[J]. Science in China (Ser D: Earth Sciences), 2004, 47: 177 – 189
- 47 王震亮, 张立宽, 施立志, 等. 塔里木盆地克拉2气田异常高压的成因分析及其定量评价[J]. 地质论评, 2005, 51(1): 58 ~ 63
- 48 Hunt M J. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1 – 12
- 49 王晓梅, 张水昌. 轮南地区奥陶系原油特征及其控制因素[J]. 海相油气地质, 2008, 13(3): 43 ~ 48
- 50 张一伟, 金之钧. 塔里木盆地环满加尔地区主要不整合形成过程及剥蚀量研究[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 449 ~ 457
- 51 何登发, 贾承造, 周新源, 等. 多旋回叠合盆地构造控油原理[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 1 ~ 9
- 52 吴冲龙, 林忠民, 毛小平, 等. “油气成藏模式”的概念、研究现状和发展趋势[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(6): 673 ~ 683
- 53 Reed J S, Spotila J A, Eriksson K A, et al. Burial and exhumation history of Pennsylvanian strata, central Appalachian basin: an integrated study[J]. Basin Research, 2005, 17(2): 259 – 268
- 54 林畅松, 刘景彦, 张燕梅. 库车坳陷第三系构造层序的构成特征及其对前陆构造作用的响应[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(3): 177 ~ 183
- 55 刘池洋, 赵红格, 杨兴科. 油气晚期—超晚期成藏——中国含油气盆地的重要特点[A]. 见: 中国工程院, 环太平洋能源与矿产资源理事会, 中国石油学会, 编. 21世纪中国暨国际油气勘探展望[C]. 北京: 中国石化出版社, 2003. 57 ~ 60
- 56 贾承造, 何登发, 陆洁民. 中国喜马拉雅运动的期次及其动力学背景[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 121 ~ 125
- 57 Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence: a new approach to oil and gas exploration[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978. 1 – 356
- 58 Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1984. 1 – 699
- 59 赵孟军, 张水昌. 塔里木盆地天然气成因类型及成藏条件[J]. 中国石油勘探, 2001, 6(2): 27 ~ 31
- 60 孙永革, 肖中尧, 刘德汉, 等. 塔里木盆地库车凹陷天然气富集控制因素[J]. 科学通报, 2004, 49(增刊I): 59 ~ 64
- 61 Barker C. Calculated volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1254 – 1261
- 62 Mango F D. The stability of hydrocarbons under the time/temperature condition of petroleum genesis[J]. Nature, 1991, 352: 146 – 148
- 63 Domine F, Dessort D, Brevart O. Towards a new method of geochemical kinetic modeling: implications for the stability of crude oils[J]. Organic Geochemistry, 1998, 28: 576 – 612
- 64 Darouich T, Behar A, Largeau C. Thermal cracking of the light aromatic fraction of Safaniya crude oil—experimental study and compositional modelling of molecular classes[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 1130 – 1154
- 65 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 油裂解生气是海相气源灶高效成气的重要途径[J]. 科学通报, 2006, 51(5): 589 ~ 595
- 66 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1 ~ 7
- 67 刘文汇, 陈孟晋, 关平, 等. 天然气成藏过程的三元地球化学示踪体系[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(7): 908 ~ 915
- 68 王红军, 赵文智, 胡国艺, 等. 塔里木盆地海相成因天然气的两种聚集模式[J]. 科学通报, 2007, 52(A01): 167 ~ 173
- 69 官色, 彭平安, 卢玉红, 等. 生物降解沥青砂再次热作用的实验模拟[J]. 科学通报, 2004, 49(A01): 39 ~ 47
- 70 付小东, 秦建中, 腾格爾, 等. 固体沥青——反演油气成藏及改造过程的重要标志[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2): 167 ~ 173
- 71 郭建军, 陈践发, 段文标, 等. 塔中I号构造带奥陶系天然气成因[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 793 ~ 797
- 72 韩剑发, 梅廉夫, 杨海军, 等. 塔里木盆地塔中奥陶系天然气的非烃成因及其成藏意义[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 314 ~ 325
- 73 王晓梅, 张水昌. 轮南地区天然气分布特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(2): 204 ~ 209
- 74 王兆云, 赵文智, 张水昌, 等. 深层海相天然气成因与塔里木盆地古生界油裂解气资源[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 153 ~ 163
- 75 Hill R J, Tang Y C, Isaa R. Kaplane insights into oil cracking based on laboratory experiments[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 1651 – 1672