

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2014.06.007

全球碳酸盐岩大油气田分布特征及其控制因素

张宁宁¹ 何登发² 孙衍鹏² 李浩武¹

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国地质大学(北京) 能源学院)

摘 要: 碳酸盐岩大油气田是以碳酸盐岩为主要储层的一类油气田。据不完全统计, 截至 2012 年底, 世界上共发现了 1021 个大型油气田, 其中碳酸盐岩大油气田 321 个。运用统计分析、资源评价、沉积学等方法理论分析了其中 226 个主要碳酸盐岩大油气田的地理位置、层系分布、储层规模与埋深及圈闭类型等。分析表明, 碳酸盐岩储层主要分布于波斯湾盆地、墨西哥湾盆地、锡尔特盆地、滨里海盆地、美国阿拉斯加北坡、二叠盆地、四川盆地和塔里木盆地等; 其中的油气资源主要集中在上古生界、侏罗系、白垩系、古近系和新近系。碳酸盐岩大油气田类型主要为生物礁类、颗粒滩类、白云岩类和不整合与风化壳类, 通常规模较大, 埋深一般小于 3000m, 埋深较大的主要为白云岩和超压石灰岩。通过对碳酸盐岩大油气田的分布特征和成藏研究, 发现碳酸盐岩大油气田的现今地理位置与垂向分布受控于碳酸盐岩的平面与地层分布, 古气候、古纬度控制了烃源岩的生成和碳酸盐岩的发育, 古构造及其演化控制了碳酸盐岩的储层规模及油气富集程度, 沉积成岩作用控制了碳酸盐岩大油气田的储集性能, 有利的生储盖配置是碳酸盐岩大油气田形成的关键。

关键词: 碳酸盐岩储层; 大油气田; 分布特征; 古气候; 沉积成岩作用; 控制因素

中图分类号: TE112.3

文献标识码: A

Distribution Patterns and Controlling Factors of Giant Carbonate Rock Oil and Gas Fields Worldwide

Zhang Ningning¹, He Dengfa², Sun Yanpeng², Li Haowu¹

(1 Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina; 2 School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing))

Abstract: Giant carbonate rock oil and gas fields are those whose reservoirs are made mainly of carbonate rock. Based on the statistical figures, at the end of 2012, a total of 1021 giant oil and gas fields were found worldwide, of which 321 ones were giant carbonate rock oil and gas fields. By means of statistical analysis, assessment of resources and sedimentology, this paper theoretically analyzes 226 giant carbonate rock oil and gas fields, focusing on their geographical locations, strata distribution, scale and buried depth of reservoirs, and types of traps. The analysis indicates that carbonate rock reservoirs are distributed mainly in the Persian Gulf Basin, the Gulf of Mexico Basin, Sirte Basin, Pre-Caspian Basin, North Slope of Alaska in the United States, Permian Basin, Sichuan Basin and Tarim Basin. Of those areas, the oil and gas resources of carbonate rock reservoirs are accumulated mainly in the Upper Paleozoic, Jurassic System, Cretaceous System, Paleogene System and Neogene System. Giant carbonate rock oil and gas fields can be classified mainly as biological reef, grain beach, dolomite, unconformity and weathering crust. Usually they are large in scale, with a buried depth of less than 3000 meters. However, the reservoirs with a large buried depth are mostly dolomite and high-pressure limestone. Based on the research on distribution patterns and accumulations of giant carbonate rock oil and gas fields, it is found that the current geophysical locations and vertical distribution of giant carbonate rock oil and gas fields are controlled by the carbonate rock plane and distribution of strata. The palaeoclimate and palaeolatitude controlled formation of hydrocarbon source rock and development of carbonate rock. The palaeostructure and its development controlled the scale of carbonate rock reservoirs and oil and gas abundance. The sedimentary diagenesis controlled reservoir functions of giant carbonate rock oil and gas fields while favorable source-reservoir-cap assemblage holds the key to formation of giant carbonate rock oil and gas fields.

Key words: carbonate rock reservoir, giant oil and gas fields, distribution pattern, palaeoclimate, diagenesis, controlling factors

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“全球常规油气资源评价研究”(2008B-060903)。

第一作者简介: 张宁宁(1987-), 男, 河南平顶山人, 硕士, 2010年毕业于中国地质大学(北京), 助理工程师, 现主要从事风险地质勘探综合研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号中国石油勘探开发研究院国际项目评价研究所, 邮政编码: 100083。

E-mail: zhangningning@petrochina.com.cn

收稿日期: 2014-03-07; 修改日期: 2014-08-13

全球大油气田的形成和分布规律一直是石油地质学家和油气勘探家探索的热点。碳酸盐岩大油气田是指以碳酸盐岩为储层且油气可采储量大于 $5 \times 10^8 \text{ bbl}$ ($6849 \times 10^4 \text{ t}$) 油当量的油气田^[1]。从全球来看,碳酸盐岩储层以其展布广、厚度均一稳定、物性好而成为重要的产油气层,全球碳酸盐岩储层中的油气储量约占油气总储量的40%,产量约占油气总产量的60%^[2,3]。从区域分布上看,中东地区石油产量约占全球产量的2/3,其中80%的含油层属于碳酸盐岩^[4];北美的碳酸盐岩储层中的石油产量约占北美整个石油产量的1/2^[5,6]。由此可见碳酸盐岩油气田的地位和重要性。

国外碳酸盐岩大油气田的发现史已超过100年,但是近年来仍时有重大发现。这表明碳酸盐岩层系的油气勘探是个长期过程,其中岩性地层圈闭、天然气田、深层油气田比例逐渐上升。目前到可预见的将来,海相碳酸盐岩油气资源将是国内外的勘探重点,而关于碳酸盐岩大油气田的分布与成藏的控制因素,尤其是对其分布特征的控制因素研究还比较少,本文通过对世界主要碳酸盐岩大油气田的系统研究来分析其分布与成藏背后的控制因素,以期加深对碳酸盐岩油气勘探理论的认识。

1 碳酸盐岩大油气田分布特征

1.1 盆地分布特征

据不完全统计,截至2012年底世界上共发现了1021个大型油气田,其中碳酸盐岩大油气田321个,这些碳酸盐岩大油气田在各种主要大地构造背景均有分布(图1)。按照Bally^[7]的盆地分类方案,前缘和下伏的地台沉积物占据了主要部分,所占比例达49%,其中具有埋藏的地堑、极少或无断块作用的类型占37%,以断块作用为主的占12%(图1),这类盆地主要包括阿拉伯地台(不含扎格罗斯褶皱带)、北美的阿拉斯加北坡、西加拿大盆地、二叠盆地、安纳达科盆地、拉丁美洲委内瑞拉盆地和中国的四川盆地等。其次为位于前中生代大陆岩石圈之上的克拉通盆地,占18%;与A型俯冲褶皱带有关的盆地和与B型俯冲带有关的弧后盆地(后渊),分别占10%和8.5%(图1)。按照Klemme^[8]盆地分类方案,碳酸盐岩大油气田主要位于封闭式拗陷小洋盆、陆内克拉通复合盆地及裂谷盆地,分别占30%,21%和17%(图2)。

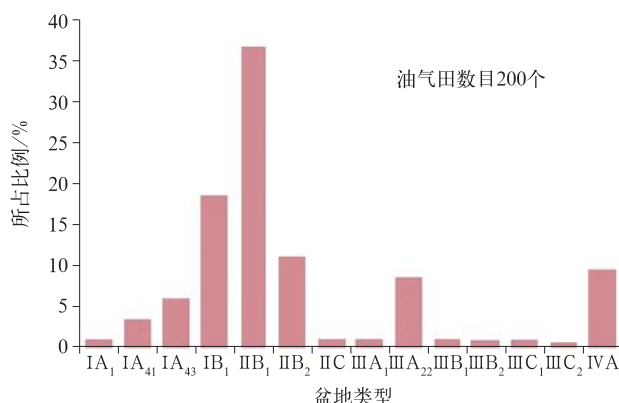


图1 Bally 方案中的碳酸盐岩沉积盆地类型

Fig.1 Types of carbonate rock sedimentary basins according to classification of Bally

IA₁—裂谷; IA₄₁—上覆在较早裂谷系上的盆地; IA₄₃—上覆于较早的潘农型和西地中海型的弧后盆地上的; IB₁—克拉通盆地; IB₂—具有埋藏的地堑、极少或无断块作用的前缘或地台沉积物; IB₃—以断块作用为主的前缘或地台沉积物; IC—A型推掩带边缘; IIA₁—弧前盆地; IIA₂₂—后渊; IIIB₁—在陆壳上的弧后盆地或潘农盆地; IIIB₂—在过渡壳或洋壳上的弧后盆地或西地中海盆地; IIIC₁—大盆地型盆地; IIIC₂—加利福尼亚型盆地; IVA—A型俯冲相关的褶皱带

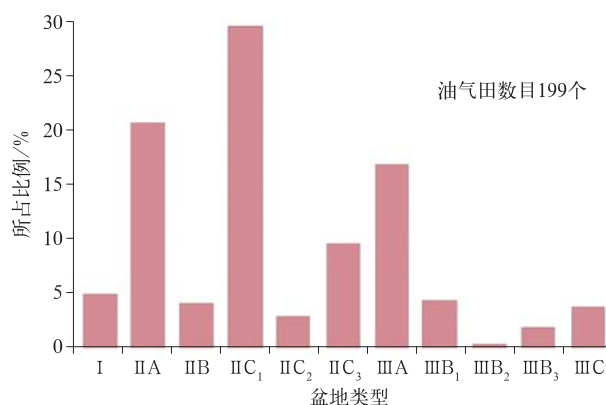


图2 Klemme 划分方案中的碳酸盐岩沉积盆地类型

Fig.2 Types of carbonate rock sedimentary basins according to classification of Klemme

I—内部简单盆地; IIA—复合盆地; IIIB—复杂盆地; IIIC₁—封闭式拗陷小洋盆; IIIC₂—槽式拗陷小洋盆; IIIC₃—开阔式拗陷小洋盆; IIIA—裂谷盆地; IIIB₁—弧后盆地; IIIB₂—弧前盆地; IIIB₃—中间盆地; IIIC—拉分盆地

1.2 地理分布特征

碳酸盐岩储层在前寒武纪至中新世均有发育,但时空分布呈现明显的不均匀性。碳酸盐岩储层主要分布于北半球,如中东波斯湾盆地、墨西哥湾盆地、锡尔特盆地、西西伯利亚盆地、滨里海盆地、美国阿拉斯加北坡、二叠盆地和中国四川盆地及渤海湾盆地等;碳酸盐岩和碎屑岩复合型储层主要分布于东西伯利亚盆地、塔里木盆地^[9]、乌拉尔前陆盆地、威利斯顿盆地、阿尔伯塔盆地以及西非等地区(图3)。

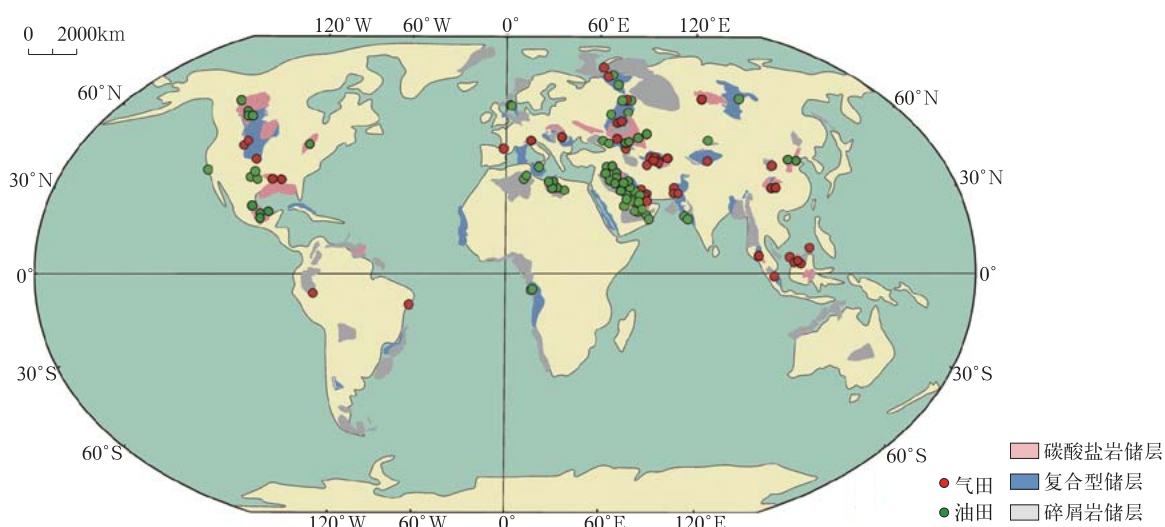


图 3 全球碳酸盐岩大油气田地理分布示意图

Fig.3 Geographical distribution of giant carbonate rock oil and gas fields worldwide

1.3 层系分布特征

碳酸盐岩储层中油气的分布,可以有效反映碳酸盐岩储层的分布。比如中东地区碳酸盐岩储层中的石油,3/4的储量集中于侏罗系、白垩系、古近系和新近系;中东地区、美国和前苏联碳酸盐岩储层中的天然气,2/3的储量集中于石炭系和二叠系。

就碳酸盐岩油气田的个数而言,白垩系的个数最多。226个碳酸盐岩大油气田中,发育白垩系碳酸盐

岩储层的油气田有66个,其数量占碳酸盐岩大油气田的29%(图4),这些油气田主要分布于中东、北海^[10]、墨西哥湾和南美等地区。其次是古近系—新近系,对应油气田数目是46个,其数量占碳酸盐岩大油气田的20%,油气田主要分布于伊拉克、伊朗、苏伊士湾、利比亚、北海和东南亚等地区。除此之外,发育石炭系碳酸盐岩储层的油气田有27个,主要位于美国阿拉斯加北坡、二叠盆地和中国四川盆地等地区。

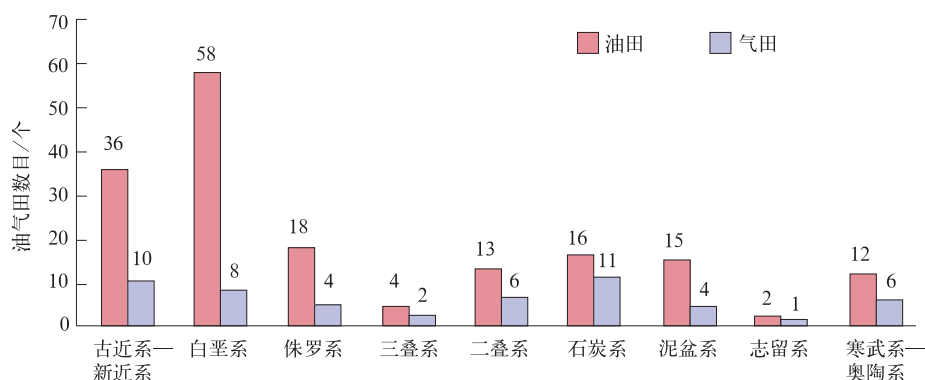


图 4 全球碳酸盐岩油气田层系分布 (油气田数目 226 个)

Fig.4 Strata distribution of carbonate rock oil and gas fields worldwide (226 fields)

对于油气可采储量而言,碳酸盐岩储层中的油气资源主要分布于石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系、古近系和新近系,其中又以侏罗系储层中的油气总储量最多(图5)。下古生界和三叠系碳酸盐岩储层中的油气资源偏少,主要原因在于下古生界的油气藏保存条件相对较差,并且缺少优质烃源岩和盖层。

1.4 碳酸盐岩储层规模

碳酸盐岩油气田储量一般比碎屑岩油气田大,单井产量高,储层规模可以从所含油气资源储量的大小来反映。从图6看,碳酸盐岩大油气田的储量分布区间较广,大多数油气田储量都在 1.0×10^8 bbl 油当量

以上。总体来看，碳酸盐岩油气田的最终可采储量值 $(10\sim 30)\times 10^8\text{bbl}$ 油当量、大于 $100\times 10^8\text{bbl}$ 油当量。主要分布在以下 3 个区间： $(1\sim 3)\times 10^8\text{bbl}$ 油当量、



图 5 全球碳酸盐岩油气田中可采油气资源的层系分布（油气田数目 215）

Fig.5 Strata distribution of recoverable resources in worldwide carbonate rock oil and gas fields (215 fields)

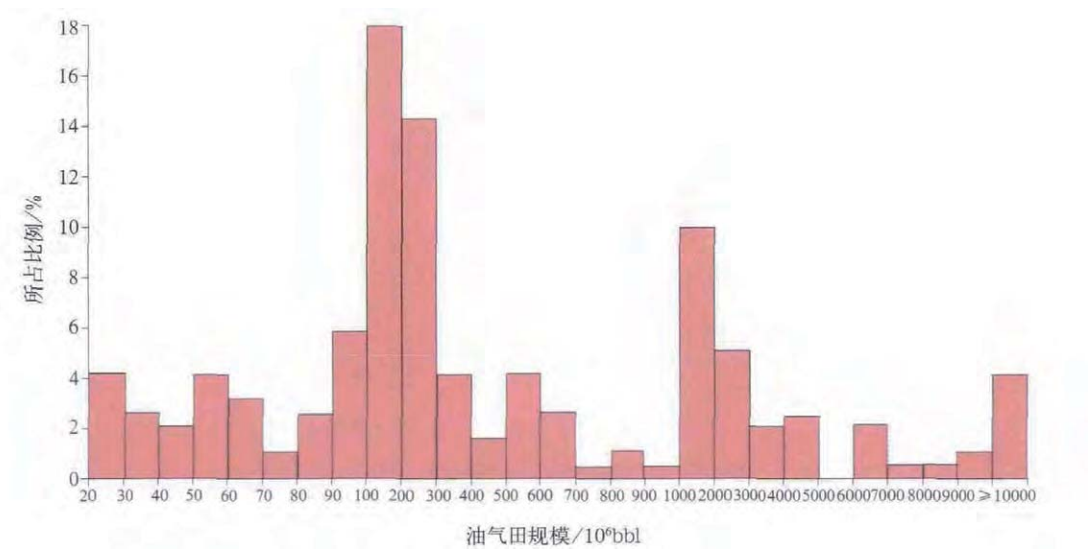


图 6 碳酸盐岩油气田最终可采储量规模分布示意图（油气田数目 189）

Fig.6 Ultimate recoverable reserves of carbonate rock oil and gas fields (189 fields)

2 碳酸盐岩储层岩石特征及类型

碳酸盐岩是由沉积的碳酸盐矿物（方解石、白云石）组成的沉积岩，绝大多数的碳酸盐岩都是在海洋环境中沉积，且主要是温暖清洁的浅海环境，以内源沉积为主。碳酸盐岩储层主要岩石类型包括石灰岩（粒

屑灰岩、礁灰岩等）和白云岩，其储集空间通常包括孔隙、溶洞和裂缝 3 类。一般来说，孔隙和溶洞是主要的储集空间，裂缝既是储集空间，也是主要的渗滤通道^[11,12]。碳酸盐岩大油气田类型主要分为生物礁类、颗粒滩类、白云岩类以及不整合与风化壳类（图 7），统计的 202 个碳酸盐岩油气田中有 179 个为此 4 种类

型，其中生物礁类 55 个，不整合与风化壳类 45 个，2、表 3 分别给出了全球最大的 10 个生物礁类油气田、颗粒滩类和白云岩类分别为 43 个和 36 个。表 1、表 10 个颗粒滩类油气田和 10 个白云岩类油气田。

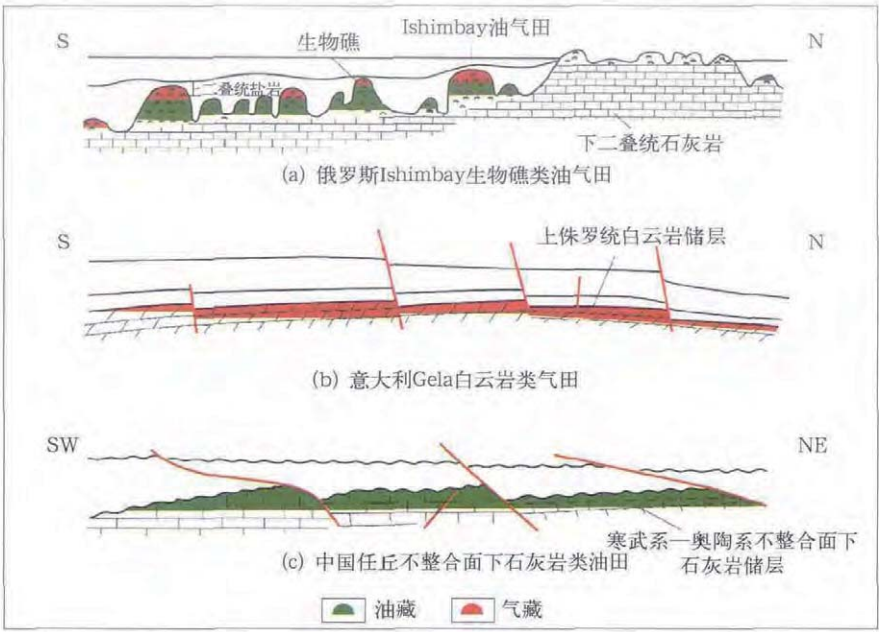


图 7 碳酸盐岩大油气田类型示意图

Fig.7 The types of giant carbonate rock oil and gas fields

表 1 全球最大的 10 个生物礁类油气田特征
Table 1 Ten top reef oil and gas fields worldwide

| 序号 | 名称 | 盆地或地区 | 可采储量 / 10 ⁸ t | 圈闭类型 | 主力层位 | 储层岩性 | 圈闭深度 /km | 发现年代 |
|----|------------------------|-------|--------------------------|------|------|--------|----------|------|
| 1 | Astrakhan 气田 | 滨里海 | 26.889 | 地层 | 石炭系 | 有孔虫礁灰岩 | 3.85 | 1976 |
| 2 | Kashagan 油田 | 滨里海 | 18.264 | 地层 | 石炭系 | 礁灰岩 | 4.00 | 2000 |
| 3 | Karachaganak 气田 | 滨里海 | 18.081 | 地层 | 石炭系 | 珊瑚礁灰岩 | 4.48 | 1979 |
| 4 | Tengiz 油田 | 滨里海 | 10.701 | 地层 | 石炭系 | 石灰岩 | 3.87 | 1980 |
| 5 | Arun 气田 | 苏门答腊 | 3.126 | 地层 | 中新统 | 石灰岩 | 3.05 | 1971 |
| 6 | Scurry 油田 | 二叠 | 2.636 | 地层 | 石炭系 | 碳酸盐岩 | 1.52 | 1948 |
| 7 | Zhanazhol 油田 | 滨里海 | 2.360 | 地层 | 石炭系 | 礁灰岩 | 3.56 | 1978 |
| 8 | Intisar (Idris) “D” 油田 | 锡尔特 | 2.055 | 地层 | 古新统 | 碳酸盐岩 | 2.87 | 1967 |
| 9 | Cerro Azul 油田 | 墨西哥 | 1.712 | 地层 | 白垩系 | 碳酸盐岩 | 0.64 | 1909 |
| 10 | Intisar (Idris) “A” 油田 | 锡尔特 | 1.644 | 地层 | 古新统 | 藻灰岩 | 2.90 | 1967 |

表 2 全球最大的 10 个颗粒滩类油气田特征
Table 2 Ten top grain beach oil and gas fields worldwide

| 序号 | 名称 | 盆地或地区 | 可采储量 / 10 ⁸ t | 圈闭类型 | 主力层位 | 储层岩性 | 圈闭深度 /km | 发现年代 |
|----|---------------|-------|--------------------------|------|------|------|----------|------|
| 1 | Ghawar 油田 | 阿拉伯 | 133.012 | 构造 | 侏罗系 | 颗粒灰岩 | 1.69 | 1948 |
| 2 | Manifa 油田 | 阿拉伯 | 24.127 | 构造 | 白垩系 | 颗粒灰岩 | 2.34 | 1957 |
| 3 | Bab 油田 | 阿拉伯 | 20.760 | 构造 | 白垩系 | 介屑灰岩 | 2.45 | 1954 |
| 4 | Abqaiq 油田 | 阿拉伯 | 17.304 | 构造 | 侏罗系 | 颗粒灰岩 | 1.70 | 1940 |
| 5 | Berri 油田 | 阿拉伯 | 15.311 | 构造 | 侏罗系 | 颗粒灰岩 | 2.33 | 1964 |
| 6 | Qatif 油田 | 阿拉伯 | 13.639 | 构造 | 侏罗系 | 颗粒灰岩 | 2.16 | 1945 |
| 7 | Khurais 油田 | 阿拉伯 | 12.312 | 构造 | 侏罗系 | 颗粒灰岩 | 1.45 | 1957 |
| 8 | Khafji 油田 | 阿拉伯 | 12.075 | 构造 | 白垩系 | 石灰岩 | 1.19 | 1959 |
| 9 | Abu Sa’fah 油田 | 阿拉伯 | 11.960 | 构造 | 侏罗系 | 颗粒灰岩 | 1.92 | 1963 |
| 10 | Asab 油田 | 阿拉伯 | 9.347 | 构造 | 白垩系 | 石灰岩 | 2.35 | 1965 |

表 3 全球最大的 10 个白云岩类油气田特征
Table 3 Ten top dolomite oil and gas fields worldwide

| 序号 | 名称 | 盆地或地区 | 可采储量 / 10 ⁸ t | 圈闭类型 | 主力层位 | 圈闭深度 /km | 发现年代 |
|----|---------------|----------|--------------------------|------|----------|----------|------|
| 1 | North 气田 | 阿拉伯 | 220.100 | 构造 | 石炭系—三叠系 | 2.76 | 1971 |
| 2 | South Pars 气田 | 阿拉伯 | 106.070 | 构造 | 石炭系 | 2.85 | 1991 |
| 3 | Samaria 油田 | 萨利纳斯、墨西哥 | 13.585 | 构造 | 白垩系 | 4.33 | 1958 |
| 4 | Kangan 气田 | 扎格罗斯 | 11.415 | 构造 | 石炭系 | — | 1972 |
| 5 | Akal 油田 | 坎普斯 | 6.671 | 构造 | 古新统 | 1.00 | 1977 |
| 6 | Hugoton 气田 | 阿纳达科 | 4.566 | 岩性地层 | 石炭系 | 0.87 | 1926 |
| 7 | Wasson 油田 | 二叠 | 3.100 | 构造 | 石炭系 | 1.89 | 1936 |
| 8 | Nasr 油田 | 阿拉伯 | 2.895 | 构造 | 侏罗系 | 2.87 | 1971 |
| 9 | Renqiu 油田 | 华北 | 2.740 | 构造 | 前寒武系、奥陶系 | 3.05 | 1975 |
| 10 | Yates 油田 | 二叠 | 2.678 | 构造 | 石炭系 | 0.62 | 1926 |

统计的 226 个碳酸盐岩油气田中，发育石灰岩储层的油气田有 124 个，占 226 个油气田总个数的 55%，储层时代主要为白垩纪、古近纪及新近纪；发育白云岩储层的油气田有 102 个，占 226 个油气田总个数的 45%，储层时代主要为早古生代、二叠纪、三叠纪和侏罗纪；泥盆纪和石炭纪碳酸盐岩储层中石灰岩和白云岩的比例相当。

3 碳酸盐岩储层埋深及圈闭类型

碳酸盐岩储层埋深从数十米（到储层或圈闭顶计算）至 6000 多米均有分布，主要集中于 1000~4000m，大约 72% 的油气田的储层埋深小于 3000m，1000m 以内的约占 10% 左右，仅有 11% 的油气田的储层埋深超过 4000m。其中较浅的如美国西得克萨斯的 McRroy 油田，埋深仅有 30m，可采储量多达 6×10⁸bbl 油当量。随着埋深的增加，储层物性会发生明显变化，机械压实、化学压实及胶结作用等会使孔隙度下降，而白云岩化作用、断裂作用等可使孔隙度增加^[13]。

埋深较大的储层主要为白云岩和超压石灰岩，对于油藏而言，白云岩和石灰岩储层的埋深分布基本一致；对于气藏而言，埋深较大的储层基本上为白云岩，这也说明白云岩相对于石灰岩更易维持高孔隙度（图 8）。

统计表明，226 个碳酸盐岩大油气田中主要圈闭类型为构造圈闭、地层圈闭和复合圈闭 3 种类型，其中一半左右为构造圈闭；复合圈闭约占 30%，其中又以构造—地层复合圈闭为主，其次为成岩—水动力为主的复合圈闭；地层圈闭约占 20%，如潜山圈闭等。

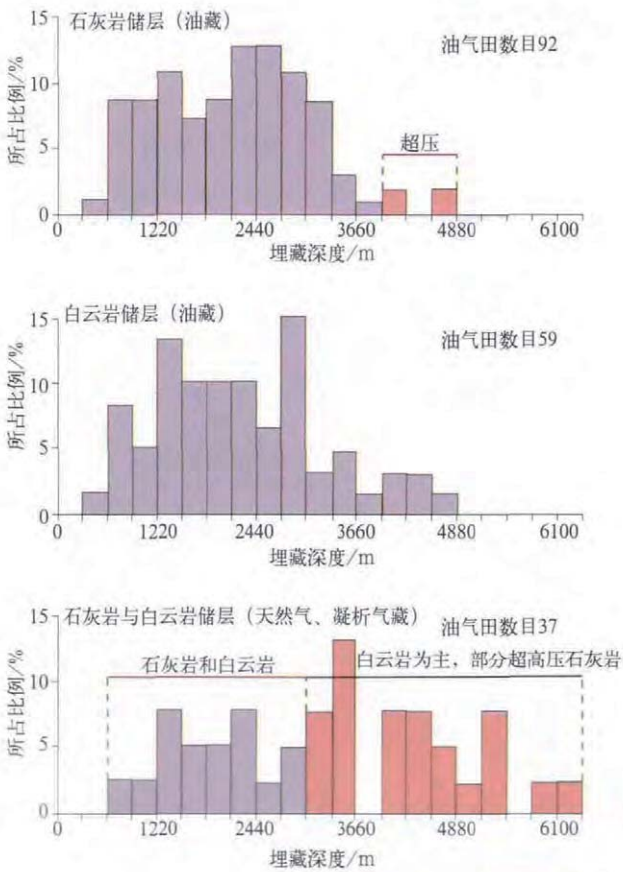


图 8 碳酸盐岩油气田不同岩石类型的储层埋深
Fig.8 Buried depths of carbonate rock oil and gas fields with different lithology types of reservoirs

4 碳酸盐岩大油气田成藏的主要控制因素

对碳酸盐岩大油气田分布特征的探讨一直是研究的热点，前人从不同的角度进行了许多研究^[14~16]。碳酸盐岩是形成于不同沉积环境的碳酸盐沉积物在后期的成岩环境中经历复杂成岩作用的综合产物，单从

储层角度来看,碳酸盐岩大油气田的现今分布受控于碳酸盐岩储层的分布,沉积作用及其演化控制了碳酸盐岩储层的平面和地层分布,这也就限定了这类大油气田的地理和垂向分布格局。后期几乎所有的碳酸盐岩又都受到不同程度的成岩作用,成岩作用可以改善储层的性能,而构造作用既是沉积演化的动力,同样也可以有效改善储层性能^[17]。碳酸盐岩大油气田的形成离不开有效的生烃环境、储集空间和有利的生储盖配置。研究发现,古气候、古纬度控制了烃源岩的生成,也影响了碳酸盐岩储层的发育;古构造及其演化控制了碳酸盐岩的储层规模及油气富集程度;沉积成岩作用控制碳酸盐岩大油气田的储集性能;有利的生储盖配置是碳酸盐岩大油气田形成的关键^[18]。

4.1 古气候、古纬度控制烃源岩的生成和碳酸盐岩的发育

中低纬度温暖湿润的气候有利于生物的生存和有机质的沉积,从而有利于烃源岩的发育^[19],从全球尺度看,烃源岩主要形成于间冰期的温暖环境,以海侵期为主(图9)^[20,21],低纬度温暖的气候下生物大量繁殖,海进减少了沉积物的输入,有利于有机质的保存。就目前的统计来看,绝大多数的大型碳酸盐岩

油气田集中分布于占全球面积17%的特提斯纬向构造域中。特提斯域(志留纪—全新世,位于冈瓦纳大陆和北部大陆间的海域)在有利的气候纬度环境中发育了丰富的烃源岩,且低纬度地区沉积的Ⅱ型干酪根烃源岩具有高效性,使得该区域油气资源十分丰富(图9)。

古气候与古海洋环境联合控制了碳酸盐岩的沉积^[22],碳酸盐岩主要形成于开阔海、蒸发潟湖和陆相蒸发湖当中,但目前发现的碳酸盐岩大油气田集中于海相碳酸盐岩中,主要形成于低纬度温暖清洁的浅海环境。碳酸盐岩大油气田发育的区域和沉积盆地都在不同的地质时期沉积了大量的碳酸盐岩,受所处纬度和气候的影响,在大陆演化过程中,由于先后进入中低纬度气候环境的时间不同,导致了碳酸盐岩油气藏地层纵向分布的差异。以碳酸盐岩大油气田集中发育的阿拉伯地区为例,从原特提斯洋、古特提斯洋到中一新特提斯洋都保持为被动陆缘环境,被浅海淹没的台地区面积广阔,地势平坦,且多为陆表海沉积。晚二叠世—三叠纪,波斯湾地区为浅海陆架,此后该地区一直处于低纬度环境,气候温暖,生物繁盛,沉积了大量的碳酸盐岩和有效烃源岩。通过对该地区碳酸盐岩大油气田的研究发现,烃源岩与油气资源的主要时代分布是大致吻合的(图9a、b)。

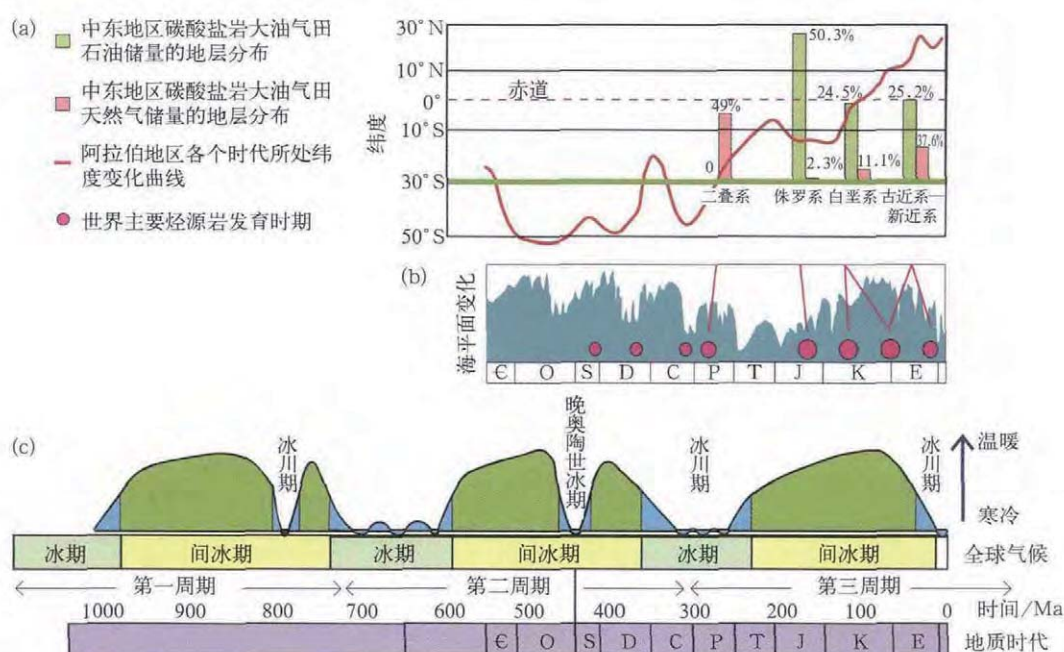


图9 阿拉伯地区所处气候、纬度的演化与烃源岩、碳酸盐岩储层及油气的分布关系

Fig.9 Relations of palaeoclimate and palaeolatitude with distribution of source rock, carbonate rock reservoirs and hydrocarbon resources in Arabian region

二叠纪末,在水体较深的沉积区边缘(伊朗中部和伊拉克西部),礁体发育。卡塔尔隆起和阿拉伯

大陆架的南部隆升区处于潮上带至潮间带,发育盐沼沉积,这一时期以大型稳定的碳酸盐台地为主,重

要的储层 Khuff 组就是在这一时期沉积的,由石灰岩、白云岩和硬石膏组成的 Khuff 组构成了海上的 Bulhanine 气田和世界上最大的独立气藏——North 气田的主力产层。三叠纪后,阿拉伯板块继续向北漂移,气候温暖,海面上升,全球海洋面积逐渐增大,形成了上侏罗统、中白垩统碳酸盐岩产层和渐新统一下中新统 Asmari 组产层,这些产层和上二叠统的 Khuff 组构成了该地区大油气田的主力产层。受中—新特提斯洋演化控制的锡尔特盆地、墨西哥湾盆地,其碳酸盐岩产层也都以中、新生界为主。

在板块演化过程中各个盆地受所处纬度和气候影响,碳酸盐岩储层发育时代分异导致西西伯利亚盆地的产层主要集中在上石炭统之下的古生界,中国的塔里木盆地和四川盆地主要为古生界,而北美的阿尔伯达盆地则主要为中、上泥盆统。盆地所处的纬度和当时的气候既控制了碳酸盐岩储层的发育,也影响着烃源岩的发育,中东地区的三叠系没有碳酸盐岩大油气田的发现可能和这一时期处于低海平面,缺乏优质烃源岩有关。

另外,古气候的变化也对蒸发岩的发育起着关键作用。在中、低纬度环境下,蒸发作用导致海水盐度

逐渐增大,最终导致各类盐类沉淀。蒸发岩作为有效的盖层在碳酸盐岩沉积盆地中是广泛存在的,如波斯湾盆地、滨里海盆地^[23]、墨西哥湾盆地等都有大面积分布,是这些地区碳酸盐岩大油气田形成必不可少的重要条件。

4.2 古构造及其演化控制碳酸盐岩的储层规模及油气富集程度

碳酸盐岩大油气田中构造圈闭占有所有圈闭总数的50%,由此可见构造活动对碳酸盐岩油气聚集成藏的重要作用。对于海相油气分布来说,古隆起、断裂和不整合面为重要的控制因素,继承性发育的大型古隆起及两翼的斜坡成为有利的油气聚集区。造成隆起的原因有多种,阿联酋、阿曼、卡塔尔、伊朗和沙特的碳酸盐岩大油气田及北海中央地堑的构造圈闭主要位于各式各样的隆起之上(图10)^[24],阿拉伯地台上的隆起主要与基底活动有关,而扎格罗斯次盆内的穹隆背斜则多为侧向挤压形成,这些隆起对油气的控制作用十分明显,受断裂的改造,圈闭样式多种多样,以背斜和断层—背斜为主(图11)。

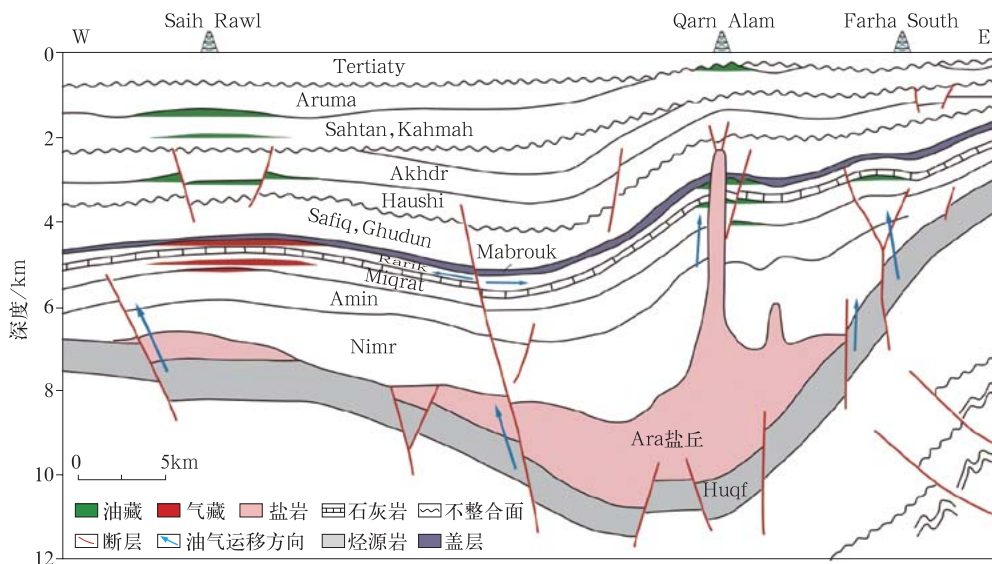


图10 阿曼北部 Ghaha 盆地碳酸盐岩油气田圈闭类型及分布

Fig.10 Types and distribution of traps of carbonate rock oil and gas fields in Ghaha Basin, Oman

受构造运动的影响,碳酸盐岩储层常常会伴生大量断裂,碳酸盐岩大油气田也多沿大的断裂和裂缝带分布,以美国帕拉多盆地里斯本油田、中国塔中油气田、加拿大 Turner Valley 油气田和土耳其 Raman 油气田为代表。大型断裂往往是油气运移的主要通道,与其伴生的一些次级裂缝和构造隆升导致顶部发育的张性裂缝成为油气储集的场所。不整合面代表一期的

构造抬升运动,被抬升的碳酸盐岩主要发生岩溶作用,北美地区多数碳酸盐岩油气田与此有关。

在构造演化过程中,圈闭的形成时间对油气的聚集成藏也至关重要,如在扎格罗斯山前凹陷地区,中新世后才开始造山运动,形成规模较大的构造圈闭,而此时也正是油气生成和运聚的初始期,圈闭几乎与油气的生成同步,十分有利于油气的大量聚集保存^[25,26]。

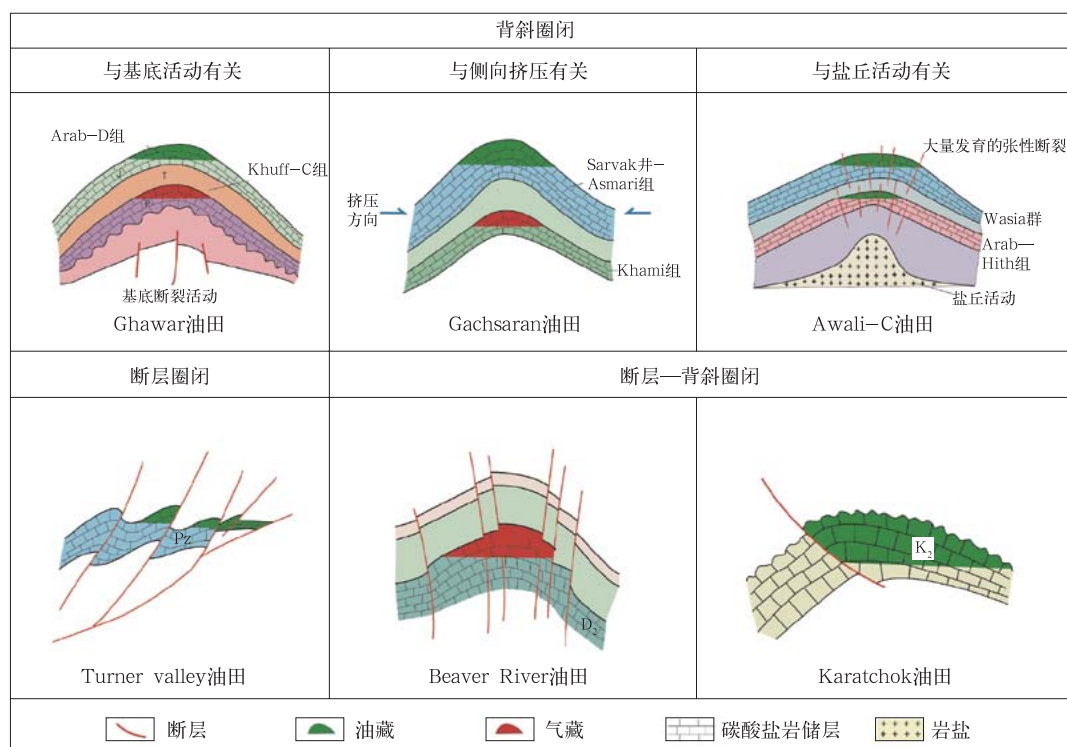


图 11 碳酸盐岩大油气田与构造活动相关的主要圈闭类型

Fig.11 Types of trap related to Palaeostructural activity in carbonate rock fields

4.3 沉积成岩作用控制碳酸盐岩大油气田的储集性能

范嘉松将世界碳酸盐储层划为 6 种类型：不整合面之下的储层；白云岩；颗粒滩；生物礁；微孔隙；微裂缝^[15]。本文统计的油气田中储层最多的是生物礁，接下来依次为不整合面之下的储层、颗粒滩和白云岩。沉积作用对储层类型的影响主要体现在对原生孔隙发育的控制，这直接影响了生物礁储层和颗粒滩储层的形成，礁滩的原生孔隙使其成为有利的潜在储层，虽然后期溶解作用普遍存在，但原生孔隙是储层发育的基础，有了原生孔隙的存在，岩溶水才可以改造储层，白云岩化作用、岩溶作用等才得以进行。滨里海盆地 Tengiz 油田是一个厚达 3.5km 的碳酸盐岩建隆，原始储层为台地内的生物骨架灰岩和鲕粒灰岩，后期频繁暴露出水面，使得溶蚀孔洞增多，极大地改善了储层性能。沙特阿拉伯、阿联酋的上侏罗统 Arab 组和美国海湾地区的 Smachover 组储层为鲕粒和团粒浅滩沉积，孔隙类型为粒间孔隙、内膜孔隙、孔洞。美国二叠盆地的石炭系—二叠系马蹄形礁储层，乌拉尔地区礁相和台地相的碳酸盐岩以及阿联酋白垩系的 Bu Hasa 生物礁储层，孔隙类型主要是骨架之间的原始孔隙、礁前角砾间的孔隙^[27]。

成岩作用越来越被认为是影响碳酸盐岩储层的重

要因素，许多大型油气藏的形成都与碳酸盐岩储层的成岩作用有关^[28,29]。其中白云岩化作用和古岩溶作用最重要，白云岩的储集空间以晶间溶蚀孔洞为主。在统计的大油气田中，下古生界的大油气田储层均为白云岩，除泥盆系外，石炭系至侏罗系中以白云岩为储层的大油气田比例均高于石灰岩，而白垩系以上石灰岩储层的油气田数远高于白云岩。这是因为下古生界碳酸盐岩储层由于形成时代早、埋藏时间长，白云岩化比较彻底。白垩系以上的碳酸盐岩储层白云岩化程度低，上古生界至侏罗系的储层一部分受到埋藏白云岩化作用，同时与这一时期的全球气候和海平面变化不无关系。这一时期全球海平面变化频繁，如波斯湾地区的准同生白云石就是高盐度海水白云岩化模式形成的，如蒸发泵和回流渗透作用。岩溶作用形成的孔隙类型以内模孔隙、孔洞、受溶解增大的裂缝、角砾孔隙为主，美国的二叠盆地、威灵斯顿盆地和中国塔里木盆地的雅克拉油田等属于这一类型。雅克拉油田的油藏主要沿着不整合面和断裂分布，构造作用形成的断裂既促进了岩溶的发育，同时也是有利的运移通道，在不整合面和断裂带附近发生的岩溶作用极大地改善了储层性能（图 12）^[30]。

中国碳酸盐岩的勘探历程和国外相比有所不同，1977—2000 年间中国碳酸盐岩油气田的探明储量主

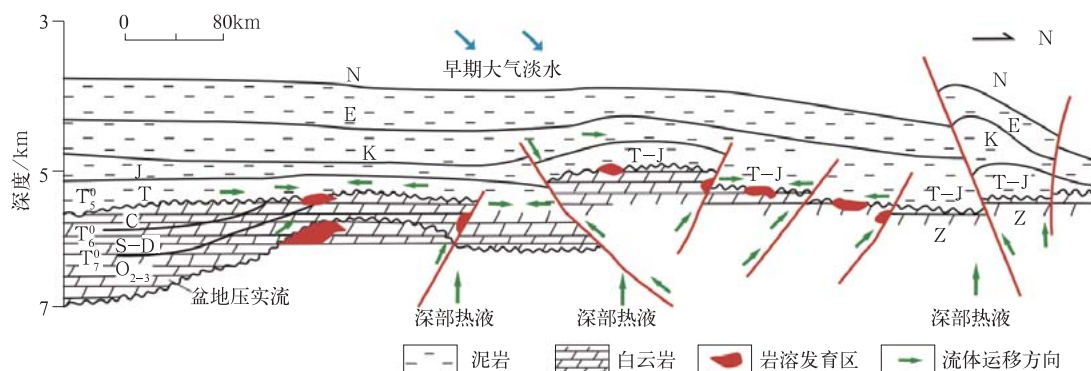


图12 不整合面和断裂对塔里木雅克拉油田岩溶发育的控制

Fig.12 Unconformity and fracture belt control distribution of oil and gas in Yakela oilfield in Tarim Basin

要以岩溶风化壳为主，目前勘探以台缘带礁滩体和岩溶风化壳并重^[31,32]。国外勘探实例表明，与台内滩及蒸发岩相关的白云岩勘探前景大，是值得国内注意的两大勘探领域。另外对于气藏，埋深较大的主要是白云岩，原因在于一方面白云岩相对于石灰岩更易维持高孔隙度，另一方面在较大埋深下白云岩储层中的开放性裂缝系统较石灰岩更为发育^[33,34]。

4.4 有利的生储盖组合是碳酸盐岩大油气田形成的关键

关于碳酸盐岩油气成藏前人已有深入研究，其中有利的生储盖组合是碳酸盐岩大油气田形成的一个重要因素。以波斯湾盆地为例，该盆地发育有多套生储盖组合（上古生界储盖组合、侏罗系储盖组合、白垩系储盖组合和古近系—新近系储盖组合），扎格罗斯盆地中侏罗统储盖组合的烃源岩为 Tuwaiq 组

泥质灰岩和 Diyab 组钙质页岩与泥质灰岩，储层为 Arab 组碳酸盐岩，盖层为上侏罗统 Hith 组硬石膏以及 Arab 组内的硬石膏夹层，这一组合有效地控制了 Thamama 群油气藏的分布。通常来说，气藏的形成较之于油藏有着更严格的条件，最主要的是盖层，天然气比油轻、活动性强、除非受到了封堵性优越的盖层，特别是膏盐层的封堵，否则天然气将向上运移散失^[35]。

North—South Pars 气田为世界上最大的独立气藏，烃源岩为下志留统 Qusaiba 组笔石页岩，气田顶部被超压的页岩、泥灰岩和下三叠统 Sudair 组致密石灰岩覆盖，这些岩层与 Khuff 组不整合接触。同时 Khuff 组内的无水硬石膏又将气藏分为5个带（K1—K5），严格的封盖条件保证了气藏的完好保存（图13）^[36]。

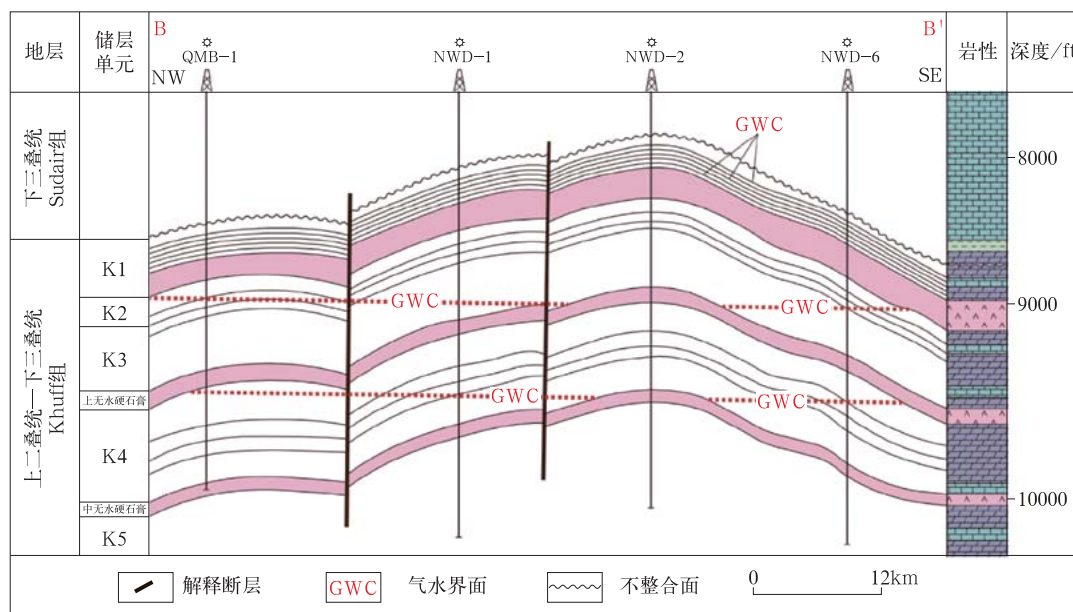


图13 North—South Pars 气田储盖配置剖面图

Fig.13 Cross-section of reservoir-cap assemblage of North—South Pars gas field

对于碳酸盐岩大油气田来说,蒸发岩作为区域盖层有着重要的作用,在碳酸盐岩储层中以蒸发岩为盖层的油气藏占到一半以上。中亚卡拉库姆盆地上侏罗统碳酸盐岩大气田为生物礁气田,上覆的上侏罗统蒸发岩就成了有效的盖层。俄罗斯 Ishimbay 油田、加拿大阿尔伯达 Zama 油田、Rainbow 油田圈闭类型都是典型的由蒸发岩包围所形成的礁复合体地层圈闭,蒸发岩对下伏油气资源进行有效封盖;另外,由于蒸发岩自身的非能干性,还可以形成许多盐相关的构造圈闭。

5 结论

(1) 碳酸盐岩大油气田主要分布于波斯湾盆地、扎格罗斯盆地、墨西哥湾盆地、锡尔特盆地、西西伯利亚盆地、滨里海盆地、美国阿拉斯加北坡、二叠盆地、中国四川盆地及渤海湾盆地,多数的油气田主要集中于特提斯纬向构造域中。碳酸盐岩储层中的油气资源主要集中在晚古生界、侏罗系、白垩系、古近系和新近系。

(2) 碳酸盐岩大油气田类型主要为生物礁类、颗粒滩类、白云岩类和不整合与风化壳类,规模通常较大,埋深一般小于 3000m,埋深较大的储层主要为白云岩和超压石灰岩。

(3) 碳酸盐岩大油气田的现今分布受控于碳酸盐岩的分布,沉积作用及其演化基本上控制了现今碳酸盐岩大油气田的分布格局,而后期几乎所有的碳酸盐岩储层受到不同程度的成岩作用,构造作用既是沉积演化的动力,又可以有效改善储层。古气候、古纬度控制了油气的生成和碳酸盐岩的发育,古构造及其演化控制了碳酸盐岩的储层规模及油气富集程度,沉积成岩作用控制了碳酸盐岩大油气田的储集性能,有利的生储盖配置是碳酸盐岩大油气田形成的重要保证。

与国外相比,中国碳酸盐岩主要表现在发育规模较小,沉积环境多样,烃源岩丰度偏低,热演化历史长;储层成层性较差,并且经历多期构造运动,受改造程度高,埋深偏大。近年来,在塔里木盆地、四川盆地已取得一系列重大发现,表明碳酸盐岩具有很大的勘探潜力,应深入研究。就目前来看,中国碳酸盐岩储层主要以岩溶风化壳型和台地边缘礁滩型为主,白云岩储层和台内颗粒滩储层的油气田也陆续有发现,勘探开发潜力较大。中国南方由于构造复杂,成熟度高,因此要重视局部的封盖条件研究并加大对岩性地层圈闭、天然气田、深层油气田的勘探。

致谢:本文采用了 IHS 公司和 USGS 的数据库资料,在此一并表示衷心感谢!

参考文献

- [1] Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the 1990s: an introduction [C]// Halbouty M T. Giant oil and gas fields of the decade 1990-1999, AAPG Memoir 78, Tulsa: AAPG, 2003:1-13.
- [2] Roehl P O, Choquette P W. Introduction: Carbonate petroleum reservoirs[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1985:1-15.
- [3] Roehl P O, Choquette P W. Perspectives on world-class carbonate petroleum reservoirs[C]. AAPG Memoir 69, Tulsa: AAPG, 1985:148.
- [4] Alsharhan A S, Nairn A E M. Sedimentary basins and petroleum geology of the Middle East [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1997:1-942.
- [5] Wilson J L. Limestone and dolomite reservoirs [C]//Hobson G D. Developments in petroleum geology. London: Applied Science Publishers Ltd, 1980:1-51.
- [6] Wilson J L. A review of carbonate reservoirs [C]//Miall A D. Facts and principles of world petroleum occurrence. Canada: Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 6, 1980:95-117.
- [7] Bally A W, Snelson, S. Realms of subsidence[C]//Miall A D. Facts and principles of world petroleum occurrence. Canada: Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 6, 1980:9-75.
- [8] Klemme H D. Petroleum basins—classification and characteristics[J]. Journal of Petroleum Geology, 1980,3:187-207.
- [9] 王招明,姜仁旗,吴金才,等.塔里木盆地寒武系—奥陶系碳酸盐岩层序地层特征[J].中国石油勘探,2011,16(1):9-14.
Wang Zhaoming, Jiang Renqi, Wu Jincai, et al. Carbonate sequence stratigraphic features of Cambrian-Ordovician, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(1): 9-14.
- [10] 刘政,何登发,童晓光,等.北海盆地大油气田形成条件及分布特征[J].中国石油勘探,2011,16(3):31-43.
Liu Zheng, He Dengfa, Tong Xiaoguang, et al. Formation and distribution of giant oil and gas fields in North Sea Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(3): 31-43.
- [11] 郑多明,李志华,赵宽志,等.塔里木油田奥陶系碳酸盐岩缝洞储层的定量地震描述[J].中国石油勘探,2011,16(5-6):57-62.
Zheng Duoming, Li Zhihua, Zhao Kuanzhi, et al. Quantitative seismic characterization of Ordovician fracture-cavity carbonate reservoirs in Tarim oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(5-6): 57-62.
- [12] 马红岩,闫宝义,于培峰,等.饶阳凹陷蠡县斜坡中部沙一下亚段碳酸盐岩沉积储层及油藏特征[J].中国石油勘探,2013,18(6):25-33.
Ma Hongyan, Yan Baoyi, Yu Peifeng, et al. Carbonate sedimentary reservoir features of lower submember of First Member of Shahejie Formation in central Lixian slope, Raoyang sag[J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(6): 25-33.
- [13] 王大兴,曾令帮,张盟勃,等.鄂尔多斯盆地台缘带下古生界碳酸盐岩储层预测与综合评价[J].中国石油勘探,2011,16(5-6):89-94.
Wang Daxing, Zeng Lingbang, Zhang Mengbo, et al. Carbonate reservoir prediction and estimation about Lower paleozoic platform margin belt in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(5-6): 89-94.

- [14] 吕修祥, 金之钧. 碳酸盐岩油气田分布规律[J]. 石油学报, 2000, 21(3):8-12.
Lv Xiuxiang, Jin Zhijun. The distribution characteristics of carbonate oil and gas fields [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(3):8-12.
- [15] 范嘉松. 世界碳酸盐岩大油气田的储层特征及其成藏主要控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3):23-30.
Fan Jiasong. Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential controlling factors for their formation [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3):23-30.
- [16] 白国平. 世界碳酸盐岩大油气田分布特征[J]. 古地理学报, 2006, 8(2):241-250.
Bai Guoping. Distribution patterns of giant carbonate fields in the world [J]. Journal of Paleogeography, 2006, 8(2):241-250.
- [17] 闫伟鹏, 杨涛, 李欣, 等. 中国陆上湖相碳酸盐岩地质特征及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(4):11-17.
Yan Weipeng, Yang Tao, Li Xin, *et al.* Geological characteristics and hydrocarbon exploration potential of lacustrine carbonate rock in China[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(4):11-17.
- [18] 周新源, 杨海军. 塔里木油田碳酸盐岩油气藏勘探开发一体化实践与成效[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(5):1-9.
Zhou Xinyuan, Yang Haijun. Practice and effectiveness of carbonate oil-gas reservoir exploration-development integration in Tarim oilfield[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(5):1-9.
- [19] Grunau H R. Abundance of source rocks for oil and gas worldwide[J]. Journal of Petroleum Geology, 1983, 6(1):39-54.
- [20] Beydoun Z R. Arabian Plate hydrocarbon geology and potential—a plate tectonic approach[C]. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, 1991, 33, 77.
- [21] Christopher G St C, Kendall, Jeffrey Chiarenzelli, *et al.* World source rock potential through geological time: a function of basin restriction, nutrient level, sedimentation rate, and sea level rise[C]. AAPG Annual Convention, 2009.
- [22] 张静, 张宝民, 单秀琴. 古气候与古海洋对碳酸盐岩储集层发育的控制[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1):121-128.
Zhang Jing, Zhang Baomin, Shan Xiuqin. Controlling effects of paleo-climate and paleo-ocean on formation of carbonate reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1):121-128.
- [23] 单中强, 王蕴, 王馨. 滨里海盆地S区块勘探实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(4):75-79.
Shan Zhongqiang, Wang Yun, Wang Xin. Exploration of block S in Pre-Caspian Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(4):75-79.
- [24] Droste H H J. Stratigraphy of the Lower Paleozoic Haima Super group of Oman[J]. GeoArabia, 1997, 2:419-472.
- [25] 贾小乐, 何登发, 童晓光. 扎格罗斯前陆盆地大油气田的形成条件与分布规律[J]. 中国石油勘探, 2013, 18(5):54-67.
Jia Xiaole, He Dengfa, Tong Xiaoguang. Formation and distribution of giant oil and gas fields in Zagros Foreland Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2013, 18(5):54-67.
- [26] 范嘉松. 中东地区形成世界级碳酸盐岩油气田的基本要素[J]. 海相油气地质, 2003, 8(1):61-67.
Fan Jiasong. essential elements for formation of giant-scaled carbonate rocks fields in Middle East [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2003, 8(1):61-67.
- [27] 贾小乐, 何登发, 童晓光, 等. 全球大油气田分布特征[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(3):1-7.
Jia Xiaole, He Dengfa, Tong Xiaoguang, *et al.* Distribution of global giant oil and gas fields[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(3):1-7.
- [28] Esteban M, Taberner C. Secondary porosity development during late burial in carbonate reservoirs as a result of mixing and/or cooling of brines [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78:355-359.
- [29] Michael Poppelreiter, Maria A Balzarini, *et al.* Structural control on sweet-spot distribution in a carbonate reservoir: concepts and 3D models (Cogollo Groupe, Lower Cretaceous, Venezuela) [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(12):1651-1676.
- [30] 李振宏, 贾建恒, 冯武军. 断裂和不整合面对古岩溶的控制作用[J]. 海相油气地质, 2003, 8(2):87-91.
Li Zhenhong, Jia Jianheng, Feng Wujun. Role of fractures and unconformities in paleo-karst[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2003, 8(2):87-91.
- [31] 罗平, 张静, 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.
Luo Ping, Zhang Jing, *et al.* Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1):36-50.
- [32] 黄福喜, 杨涛, 闫伟鹏, 等. 四川盆地龙岗与元坝地区礁滩成藏对比分析[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(3):12-20.
Huang Fuxi, Yang Tao, Yan Weipeng, *et al.* Comparison and analysis of reef-bank gas reservoirs in Longgang and Yuanba areas in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(3):12-20.
- [33] Hugman R H H, Friedman M. Effects of texture and composition on mechanical behavior of experimentally deformed carbonate rocks[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63, 1478-1489.
- [34] Schmoker J W, Krystinik K B, Halley R B. Selected characteristics of limestone and dolomite reservoirs in the United States[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69, 733-741.
- [35] 白国平, 郑磊. 世界大气田分布特征[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(2):161-167.
Bai Guoping, Zheng Lei. Distribution patterns of giant gas fields in the world [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(2):161-167.
- [36] 贾小乐, 何登发, 童晓光, 等. 波斯湾盆地大气田的形成条件与分布规律[J]. 中国石油勘探, 2011, 16(3):8-22.
Jia Xiaole, He Dengfa, Tong Xiaoguang, *et al.* Formation and distribution of giant oil and gas fields in the Persian Gulf Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2011, 16(3):8-22.