

## 中国沉积盆地油气立体综合勘探论

何登发<sup>1</sup>,李德生<sup>2</sup>,童晓光<sup>2</sup>,吴晓智<sup>2</sup>

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083; 2. 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083]

**摘要:**中国油气勘探近15年来进入发现高峰期,在成熟区精细勘探、新区、新层系、新类型、新领域勘探中不断取得突破,常规与非常规油气勘探取得重要进展,剖析这一阶段勘探的性质与思维方法将为中国油气勘探持续深入开展奠定重要基础。从沉积盆地系统论与油气勘探方法论的角度,通过剖析沉积盆地的油气地质基础,结合现阶段油气勘探实践,提出了新时期的勘探理念与方法。研究表明,中国的沉积盆地多为多旋回叠合盆地,沉积盆地的演化受周缘板块构造作用、陆内构造变形及其深部地幔地质过程的控制,复杂构造背景下油气多层系规模聚集。中国沉积盆地有常规油气、低熟油、生物气、致密气、页岩油气、煤、煤层气、盐类、天然气水合物和金属等多种矿产资源,资源潜力大。中国的油气勘探经历了构造油气藏、岩性-地层油气藏勘探阶段,现今进入常规与非常规油气并举的“立体综合勘探”阶段。这一阶段是针对“全盆地、多层系、多尺度储集体、多类型资源”的全链条的整体勘探,钻探进入万米尺度,海域进入深水区。立体综合勘探的理论基础是多旋回叠合盆地油气地质学、油气成藏动力学与非常规油气地质学,技术手段是多尺度(微米-纳米)储集体分析技术、“两宽一高”高精度地震勘探技术与“水平井+体积压裂”技术,主要工作方法是地质-工程一体化与勘探-开发一体化。立体综合勘探思维与方法将是常规与非常规油气一体化高效勘探与油气-煤-盐-金属等矿产资源综合勘探的重要保证。

**关键词:**勘探思维;沉积盆地系统;盆地动力学;统一油气系统;多旋回叠合盆地;非常规油气;立体综合勘探

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

## Integrated 3D hydrocarbon exploration in sedimentary basins of China

He Dengfa<sup>1</sup>, Li Desheng<sup>2</sup>, Tong Xiaoguang<sup>2</sup>, Wu Xiaozhi<sup>2</sup>

[1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China]

**Abstract:** Oil and gas exploration in China has entered the peak of discovery with breakthroughs made in mature regions, frontier areas, new plays, new types of rock assemblages and new domains for both conventional and un-conventional hydrocarbon reservoirs in recent 15 years. Discussing the nature and guiding notion of the exploration during this period is of significant referential value to the on-going hydrocarbon exploration in China. Viewing from sedimentary basin system theories and petroleum exploration methodology, the paper puts forward exploration scenarios and methodology for the coming era based on a combination of oil and gas geologic condition analyses of sedimentary basins with current exploration activities in China. It shows that the sedimentary basins in China are chiefly of multi-cycle superimposed type under the joint control of the adjoining plate tectonics, the intra-continental structural deformation, and the deep mantle geologic processes, which together have resulted in large-scale oil and gas accumulation in multiple reservoirs or plays. The sedimentary basins in China are rich in variety of resources, including conventional oil and gas, low-maturity oil, bio-methane gas, tight gas, shale oil and gas, coal, coal-bed gas, salt and gypsum, hydrate, and metals etc. Petroleum exploration in China, after stages for structural oil and gas pools and lithologic-stratigraphic oil and gas pools, is now entering a stage for both conventional and unconventional oil and gas—also called the “integrated 3D reservoir exploration” stage. The stage is characterized by a full-chain and integrated exploration that scans the basin as a whole and takes multiple plays, multi-scale reservoirs, hybrid resources as its targets. It drills into subsurface over 10,000 meters deep and explored the deep waters. It is based theoretically upon petroleum geology advancements in multi-cycle

收稿日期:2020-03-18;修订日期:2021-02-08。

第一作者简介:何登发(1967—),男,教授、博士生导师,盆地分析与油气地质综合研究。E-mail:hedengfa282@263.net。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003);国家自然科学基金重点项目(41430316)。

superimposed basins, deeper understanding to the dynamics of oil and gas accumulation, and progress in unconventional petroleum geology. It employs technologies including the multi-scale (micro-to-nano meter scale) analytical methods for reservoirs, the high-resolution seismic exploration featuring wide-frequency, wide-azimuth, and high-density, as well as the massive fracturing in horizontal wells. It is performed by integrating geology and engineering, exploration and production. It thus guarantees an integrated exploration of both conventional and unconventional oil and gas as well as other resources like coal, salt and metals in the basins.

**Key words:** exploration strategy, sedimentary basin system, basin dynamics, unified petroleum system, multi-cycle superimposed basin, unconventional oil and gas, integrated 3D reservoir exploration

自1907年延1井喷油以来,中国油气工业经历了113年艰苦卓绝的岁月,发现了一系列大型-巨型油气田,有力地推动了中国国民经济的稳定发展。长期的勘探实践不但催生建立了富有中国特色的石油地质理论,也涌现了独步世界的油气勘探思想、理论与方法。

在20世纪50—70年代,开展的中国陆相断陷与拗陷湖盆碎屑岩油气勘探,中国的地质家与油气勘探家提出并完善了“陆相生油理论”、“源控论”与“复式油气聚集区(带)理论”<sup>[1-9]</sup>,在准噶尔、松辽和渤海湾等盆地发现了以克拉玛依、大庆、胜利、任丘等油田为代表的一大批陆相油田<sup>[9-15]</sup>。自20世纪80年代以来至21世纪初,随着油气工业战略西移,勘探由中浅层陆相进入到中深层海相、海陆过渡相,在鄂尔多斯、四川、塔里木等盆地发现了以靖边、苏里格、普光、元坝、塔河、轮南和塔中等油气田为代表的海相大油气田<sup>[16-18]</sup>,建立了古老海相碳酸盐岩的油气地质理论;同时,在陆相盆地深层,发现了庆深、蓬莱19-3、克拉美丽、克拉2、大北等为代表的油气田。面对日益复杂的勘探对象,逐渐建立了岩性-地层、前陆冲断带和叠合盆地等油气勘探理论<sup>[19-21]</sup>,明确提出了中国“岩性地层、海域、海相和前陆4大油气勘探领域”的概念,推动了中国油气勘探开发的持续稳定发展。

近20年来,世界油气工业及中国的油气勘探逐渐进入了一个崭新的历史时期。世界上以美国煤层气、致密油气和页岩油气等为代表的非常规油气勘探与开发引领了能源领域的一场深刻革命<sup>[19,22-23]</sup>,改变了世界油气供需格局,改变了油气勘探的根本理念与方法。中国则是在常规油气精细勘探的同时,开展致密油气的规模勘探,逐渐突破页岩油气,实现“中浅层与深层、超深层”和“常规油气与非常规油气”的勘探并举,可将这一勘探思路称为“立体综合勘探”。这一阶段打破常规、开拓创新,在新区、新层系、深部、深水、特殊岩性类型中相继取得突破,在鄂尔多斯、四川、塔里木、准

噶尔、松辽、渤海湾、珠江口等盆地发现了一系列大型-巨型油气田,如姬嫫、华庆、西峰、环江、玛湖、昌吉、蓬莱19-6、安岳、焦石坝、蜀南和庆城等大油气田<sup>[24-25]</sup>,推动了中国油气储量增长的又一高峰。

如何认识这一新的勘探阶段的特点,剖析新阶段下油气勘探的地质基础、勘探实践的经验与教训,从油气勘探活动本身把握勘探遵循的规律、理念与思维方式,是中国油气地质家与勘探家共同思考的问题<sup>[26-29]</sup>。本文在早期《中国多旋回叠合盆地立体勘探论》一文的基础上<sup>[30]</sup>,从中国近20年来立体勘探实践出发,遵循“实践—认识—再实践—再认识”的哲学方法论,讨论立体综合勘探的内在规律与实践。

## 1 中国沉积盆地的油气地质基础

### 1.1 中国沉积盆地的大地构造背景

中国大陆是全球最新形成的大陆,夹持于北侧的西伯利亚大陆、西南侧的印度大陆与东侧的太平洋板块之间<sup>[31]</sup>,受到多期、不同方向、不同性质的构造作用。中国的沉积盆地主要发育在华北、华南、塔里木等地块及准噶尔、吐哈、柴达木、阿拉善、佳木斯和松-嫩等一系列微地块之上<sup>[4,32-35]</sup>。沉积盆地与周缘造山带呈镶嵌式分布<sup>[36]</sup>(图1),造山带的形成与演化对沉积盆地的发育施加了重要影响,沉积盆地具有多期发育、旋回式演化背景<sup>[7,37-41]</sup>。

### 1.2 中国沉积盆地的地质结构

受不同时期大地构造背景的制约,中国境内的沉积盆地多为叠合沉积盆地<sup>[7,40-44]</sup>(图1)。具有5种典型的地质结构。

#### 1.2.1 下部海相碳酸盐岩、中部海陆过渡相与上部陆相碎屑岩巨厚叠置型

包括塔里木、四川、鄂尔多斯和渤海湾等盆地<sup>[20,44-45]</sup>,沉积岩厚度可达15 km以上。所不同的是



谷型)断陷盆地之上,形成下窄上宽的“牛头式”组合结构。所不同的是,准噶尔盆地石炭纪一早二叠世断陷发育海相火山岩、海陆过渡相含煤岩系,其上拗陷范围逐渐扩大,但在新生代晚期遭受强烈挤压,盆地向南急剧掀斜;松辽盆地则是在晚侏罗世一早白垩世湖相火山岩断陷基础上,在晚白垩世急剧热冷却沉降,发育了以青山口组和嫩江组沉积为代表的大型拗陷湖盆,在晚白垩世晚期—新生代遭受中等程度的挤压反转。

### 1.2.3 下部陆相碎屑岩、中部海陆过渡相与上部海相碎屑岩巨厚叠置型

包括东海、珠江口、琼东南、莺歌海、中建南等沉积盆地。中生代陆相盆地,其内充填火山碎屑岩与含煤岩系;向上叠置古近纪断陷,受伸展程度控制,可形成多组拆离断层之上的盆地,以河流—湖泊沉积充填为主;再向上到渐新世—中新世早期演化为海陆过渡相;在中新世中晚期—第四纪发育成为被动大陆边缘盆地,大型三角洲沉积体系充填,偶有碳酸盐岩礁滩。

### 1.2.4 下部薄层海相、上部厚层陆相迁移叠置型

包括柴达木、潮水、雅布赖、巴彦浩特等盆地。其下以石炭系为主的海相沉积较薄,其上叠置较厚的中—新生代沉积,中—新生代的沉积、沉降中心则不断迁移(“跷跷板”式)。柴达木盆地,早侏罗世断陷偏于南祁连山前,而中—晚侏罗世断陷则向南迁移至冷湖—南八仙—鄂博梁一带;古近纪大型湖泊发育在柴西南地区,有湖相碳酸盐岩与混积岩充填<sup>[46]</sup>;而新近纪沉降中心迁移到盆地中央,第四纪沉降、沉积中心则迁移至盆地东部三湖地区。这样一种沉降迁移型叠置样式决定了该盆地独特的油气地质条件。阿拉善地块上的一系列沉积盆地,如潮水、雅布赖盆地,在侏罗纪和白垩纪为断陷沉积,沉积中心则呈典型的跷跷板式迁移,上覆新生界较薄。

### 1.2.5 下部厚层断陷火山碎屑岩与上部薄层拗陷碎屑岩叠置型

发育于一系列褶皱带上的沉积盆地,如天山带的伊犁、尤尔都斯、焉耆、库米什等盆地,内蒙—外蒙过渡带一带的海拉尔、塔木察格、二连和银根—额济纳旗等盆地。前者发育在天山复合造山带褶皱基底之上,在早二叠世(伊犁)、早—中侏罗世(尤尔都斯、焉耆、库米什)强烈断陷;中—晚侏罗世拗陷;晚白垩世—新生

代发生改造,新生界沉积厚度不大。后者发育在海西期褶皱基底之上,早白垩世呈宽裂谷式断陷,受造山带地壳厚度与拉张强度控制,后期断陷终止发育,拗陷层也较薄。一个断陷为一个独立的含油气单元。

## 1.3 中国沉积盆地的油气地质条件

中国的沉积盆地虽然发育在小地块之上,经历多期构造运动,但仍然具有较好的油气地质条件。

### 1.3.1 具有4种类型“优质烃源岩”

在海侵初期,高生产力模式下及厌氧环境保存了好的烃源岩,如下寒武统(塔里木盆地的玉尔吐斯组、四川盆地的麦地坪组和筇竹寺组);在海相台地层序发育期,因构造—沉积分异作用<sup>[47-48]</sup>,可形成断陷或深水陆棚,如川西北二叠系大隆组。在前陆盆地发育早期的深水环境中,也可沉积黑色页岩,如川东五峰组—龙马溪组<sup>[23]</sup>。在海陆过渡期,发育煤层、煤系泥岩,如鄂尔多斯盆地本溪组、太原组,四川盆地龙潭组。在断陷盆地发育早期,半深湖—深湖相泥岩发育,虽面积有限,但厚度较大,且往往有特殊生物组合赋存,形成优质烃源岩,如玛湖凹陷风城组;断陷盆地的湖沼相也可形成较好的烃源岩,如塔里木、准噶尔、吐哈盆地的中—下侏罗统,海拉尔、松辽盆地早白垩世断陷带,以及近海盆地的深层断陷等。在拗陷期,因火山活动或与海洋幕式沟通,可发育大面积分布的湖相烃源岩,如准噶尔盆地中二叠统下乌尔禾组、芦草沟组、平地泉组,鄂尔多斯盆地中—上三叠统延长组,松辽盆地上白垩统青山口组、嫩江组等。

### 1.3.2 发育多种类型储集体

从太古界(辽河拗陷的片麻岩、混合岩)、中元古界(伊盟隆起)、新元古界(四川盆地安岳气田)、古生界、中生界、新生界乃至第四系(柴东三湖地区生物成因气田)都可以成为储集体。砂岩、砂砾岩、泥岩、页岩、煤层、火山岩、花岗岩和变质岩等均可作为储集体。而在有效储集体深度方面,碳酸盐岩储集体可达8 882 m(轮探1井),顺北鹰1井、塔深1、塔深2、塔深3井和川深1井等实钻结果证实,在7 000~8 000 m的超深层,白云岩、缝洞体、生物礁滩仍可作为好的储集体,碳酸盐岩风化壳早已在靖边、塔河、塔中等地区证明是有利的储集体。碎屑岩有效储集体可深达8 000 m<sup>[49]</sup>,在塔里木盆地库车拗陷克深气田在超深层仍具有较好的孔、渗性能,博孜—大北地区近年发现5个含气构造,探明千亿方超深层凝析气藏(如博孜9

气藏),是近8 000 m碎屑岩超深层天然气勘探的重大突破;在准噶尔盆地腹部6 000 m以下孔隙度可以达到12%以上(沙1井百口泉组);在东部老区,渤海湾盆地济阳坳陷丰深斜101井证实4 200 m以下仍具有良好储集条件(探获日产油 $17\text{ m}^3$ ,气 $3\times 10^4\text{ m}^3$ ,估算总资源量 $2\times 10^8\text{ t}$ 以上)。勘探实践不断打破以往对于储层“死亡线”的认识。湖盆中央的重力流砂体,如鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆中央(延长组的庆城油田)、准噶尔盆地盆1井西凹陷早侏罗世三工河期湖泊内部(如前哨1,前哨2井)和松辽盆地高台子油层等也发育非常好的储集体。

### 1.3.3 纵向上多套区域性盖层

在海相盆地的海退期,发育膏岩、盐岩沉积,常呈区域性展布,构成优质的盖层,如:塔里木盆地中寒武统(阿瓦塔格组、沙依里克组)、石炭系中部的膏盐岩呈区域性分布,前者封存了轮探1井的高产油气,后者是塔河-轮南、塔中I号带等油田的区域盖层;鄂尔多斯盆地中东部的马五<sup>6</sup>亚段(马家沟组五段六亚段)膏盐岩厚达150 m,分布面积达 $5\times 10^4\text{ km}^2$ 以上,对该地区整体封盖,目前在盐下已发现气田;四川盆地构造变形复杂,天然气的聚集、保存得益于中-下寒武统、下三叠统嘉陵江组、中三叠统雷口坡组膏盐岩的多层整体封盖。碳酸盐岩、火山岩、变质岩的风化壳也被证明是良好的盖层,如靖边气田、克拉美丽气田等。在湖泊水进期,超覆砂体常为高位期泥岩封盖,形成良好的储盖组合,如准噶尔盆地上乌尔禾组的地层油田与百口泉组砂砾岩油田。对于生-储-盖一体型的煤层和页岩油气,其自身已具备好的封盖能力。

### 1.3.4 横向复合、垂向叠置的多套成藏组合

沉积盆地的地质结构决定了源-储组合或生-储-盖组合的配置关系<sup>[42]</sup>。垂向上主体有:下部海相碳酸盐岩、中部海陆过渡相含煤岩系、上部陆相湖盆碎屑岩油气成藏组合(鄂尔多斯、四川和塔里木盆地型)<sup>[20,50]</sup>,油气聚集有多个“黄金带”;或下部火山岩断陷、上部湖盆坳陷砂(砾)岩的油气成藏组合(以松辽、准噶尔盆地为代表),石油全盆地分布,天然气在其下独立分布;或下部断陷湖盆、中部海陆过渡相含煤岩系、上部被动大陆边缘三角洲体系的油气成藏组合,如珠江口、东海、琼东南盆地等,下伏断陷自成含油气单元,如白云凹陷,上部大型三角洲体系砂体、浊积砂体、礁滩体等形成上部油气成藏组合。在同一构造层,可能由多个断陷组成,断陷可形成“富油凹陷”,如东营、沾化、东濮、

饶阳、长岭、徐家围子、拜城、阳霞等断陷;也可由多个凹陷构成,如准噶尔盆地中央坳陷包括玛湖、盆1井西、沙湾、阜康、东道海子、吉木萨尔等凹陷,每一凹陷为一富油单元,以岩性、地层、低幅度背斜聚油为主,类似的如松辽盆地中央坳陷等。这些断陷或凹陷横向联合形成连片分布的油气藏区(带),构成复式聚集。

## 2 中国油气立体综合勘探实践

近10年来,中国的油气勘探取得重要进展。在松辽盆地深层、渤海湾盆地潜山、四川盆地深层古生界一新元古界、鄂尔多斯盆地低渗透油气、准噶尔盆地深层砂砾岩与火山岩油气、塔里木盆地超深层碳酸盐岩石油、碎屑岩天然气,珠江口与琼东南盆地深水天然气、天然气水合物等领域不断取得突破<sup>[23,51]</sup>,发现了一批大中型-巨型油气田。油气勘探突出“中浅层与深层并重、常规与非常规并举”的立体、综合与整体勘探大好局面。下面以松辽盆地与鄂尔多斯盆地为例进行讨论。

### 2.1 松辽盆地的“岩性-构造+非常规”油气勘探

#### 2.1.1 基本石油地质条件

松辽盆地地处中亚造山带东段,经历了石炭纪—早二叠世伸展、晚二叠世—三叠纪挤压,侏罗纪—早白垩世伸展、晚白垩世(晚期)—新生代挤压两个大的伸展-聚敛旋回(图2)。盆地基底为松嫩、大兴安岭与佳木斯等(微)地块拼合而成,石炭系-二叠系浅海相碎屑岩、海陆过渡相含煤岩系在盆地大部分地区均有分布。晚侏罗世—早白垩世(火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组一、二段沉积期)发育36个NNE走向、间距不等的断陷,构成宽裂谷发育模式,主要充填断陷湖盆碎屑岩沉积,在火石岭组、营城组一段、三段发育中基性、中酸性火山岩。早白垩世晚期—晚白垩世早期(泉头组三、四段,青山口组、姚家组、嫩江组沉积期)为热冷却沉降拗陷期,发育一套拗陷湖盆碎屑岩沉积。盆地自姚家组沉积期开始反转,在四方台组、明水组沉积期达到反转高峰,缺失古新统和始新统。渐新世—第四纪沉积(依安、大安、泰康组)较薄(图2)。新生代地层主要发育在松辽盆地东部的依-舒地堑和虎林等走滑伸展盆地,为一套含煤碎屑岩。这种大型拗陷叠置在下伏分布式断陷之上的盆地结构为其主要特色。

松辽盆地断-拗叠合结构决定了中浅层拗陷为石油聚集、深层断陷主要为天然气聚集。其石油地质条件具有以下特点:

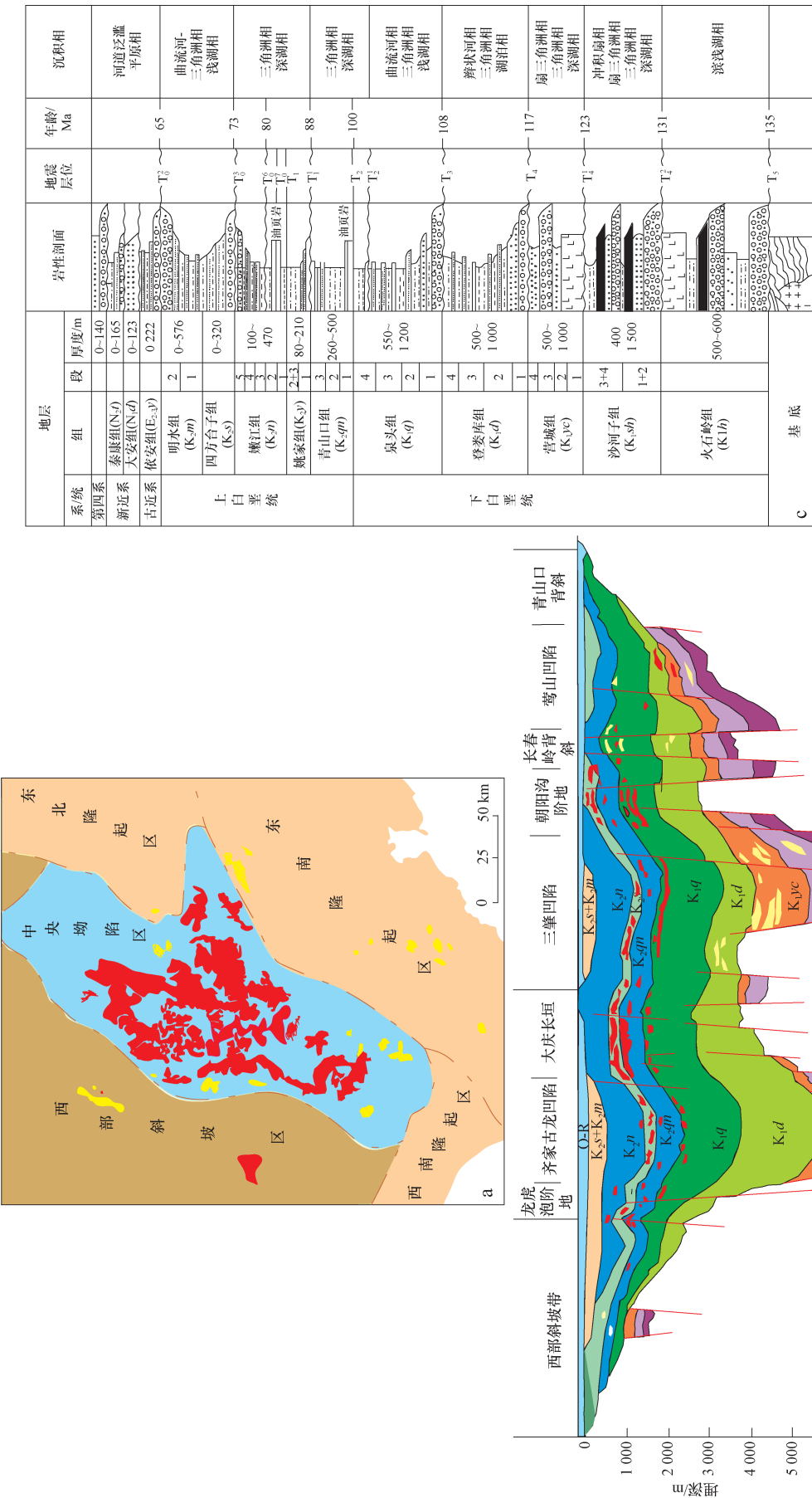


图2 松辽盆地多层系油气成藏模式与立体综合勘探格局  
a.油、气田分布；b.东西向构造地质剖面；c.油、气藏分布综合柱状图

Fig.2 Oil and gas accumulation pattern for multiple plays and the integrated 3D reservoir exploration framework in the Songliao Basin

1) 烃源岩:拗陷期两次大规模水进形成了青山口组和嫩江组两套源岩。青山口组沉积时气候温凉潮湿,以藻类有机质输入为主,青一段暗色泥岩厚度大于40 m,分布面积为 $5.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,东部盆缘区厚度大。嫩江组沉积时气候相对温暖湿润,有机母质有陆生和水生有机质的双重贡献。松科1井钻探表明,嫩江组一、二段为 Coniacian 晚期—Santonian 期,该段的浮游有孔虫证明湖、海曾发生沟通;嫩一、二段暗色泥岩厚度大于40 m,分布面积为 $10.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,覆盖整个盆地。油源岩已成熟,断陷期发育气源岩,发育沙河子组、营四段等多套源岩,沙河子组有机质丰度高、成熟度高,是深层主力生烃层系。

2) 储集岩:拗陷发育期,环坳分布6大水系,其中北部、西南、西部水系规模大,延伸远;2次低位域沉积形成了泉三—泉四段、姚一段2套区域性分布砂岩;3次高位域沉积形成了青二—青三段、姚二—姚三段及嫩二—嫩三段3套局部分布砂岩。三角洲前缘相带砂泥岩交互,紧邻油源,形成大面积岩性油藏(群)。围绕2套有效油源岩(青一—青二段、嫩一段),形成了5套含油层系:黑帝庙、萨尔图、葡萄花、高台子和扶余油层(图2)。断陷期,发育泉头组砂砾岩、登娄库组砂砾岩、营城组砂砾岩、营城组火山岩、沙河子组砂砾岩、火石岭组砂砾岩或火山岩,以及基底潜山等多套储集体。

3) 成藏组合:松辽盆地的上、下二元结构,早期为断陷盆地,发育泉二段以下地层,以生气为主,形成天然气成藏组合,发现了庆深气田;晚期为拗陷盆地,发育泉三段以上地层,以生油为主,形成成油组合,发现了大庆油田。每一组合可以进一步依据源、储组合的相互关系,进一步划分为源下、源内和源上等次级成藏组合。

4) 油气分布:松辽盆地中央拗陷富油,迄今99%的探明储量皆聚集于此。构造、岩性油藏并存,喇(嘛店)、萨(尔图)、杏(树岗)构造油藏共计探明 $42 \times 10^8 \text{ t}$ ;外围以大面积岩性油藏为主,探明 $36 \times 10^8 \text{ t}$ 。

### 2.1.2 油气立体综合勘探实践

松辽盆地油气资源丰富,石油资源量为 $134.28 \times 10^8 \text{ t}$ ,天然气资源量为 $4.96 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,是中国重要原油生产基地。截至2016年底,松辽盆地累计探明石油 $78.4 \times 10^8 \text{ t}$ ,占中国21%;2016年松辽盆地原油产量 $4060 \times 10^4 \text{ t}$ ,占中国20%;原油累计采出量 $24.7 \times 10^8 \text{ t}$ ,占中国38%。

松辽盆地自1959年大庆油田发现以来,经历了大型构造油藏勘探(1959—1964年)、构造油藏勘探

(1965—1984年)、构造—岩性油藏勘探(1985—2000年)、岩性、地层—构造油藏勘探(2001—2010年)、多类型油藏精细勘探、非常规油气勘探(2011年以来)等阶段,可以简化为构造油气藏、岩性—构造油气藏、常规油气精细勘探与非常规油气勘探并重3个阶段,并将走向非常规油气勘探之路,即使在常规油气勘探中也是多应用非常规的理念进行勘探。勘探对象可以概括为常规油(黑帝庙、萨尔图、高台子油层)、致密油(扶余、杨大城子油层)、页岩油(青山口组、嫩江组页岩)、油页岩(盆地边缘的青山口组、嫩江组页岩)、致密气(沙河子组砂砾岩)、页岩气(沙河子组、营城组页岩)、火山岩及基岩气藏(断陷、中央隆起带等)等类型。勘探已不再囿于某一对象,而是在某一地区,开展多个层系、多种油气藏类型、多种成因油气的“立体综合勘探”,综合考量,整体实施。

#### 1) 常规油藏精细勘探

常规油精细勘探以浅层的萨尔图、葡萄花、高台子(局部)和黑帝庙油层为主。在松辽盆地北部,常规油资源量为 $88.7 \times 10^8 \text{ t}$ ,经过60年勘探,明显构造和大规模岩性油藏已探明 $61.3 \times 10^8 \text{ t}$ ,呈满凹含油态势。剩余的待探明资源 $19.9 \times 10^8 \text{ t}$ ,主要分布在葡萄花、萨尔图油层的三角洲前缘相带油田的周边;潜力区油藏规模小、分布零散、隐蔽性强。而西部斜坡带、盆地北部斜坡带、东部断陷带仍是常规油勘探领域。

萨尔图油层(S):该油层储层物性好,具有“小而肥”油藏群分布特征。萨一、萨二—萨三油层组发育构造、岩性—构造复合油藏;萨零油层组砂体以重力流水道为主,发育岩性油藏。北东向断裂构造带油气富集,发育源内和源外两种成藏模式。

葡萄花油层(P):葡萄花油层(姚一段)沉积期盆地整体抬升形成了低位域沉积,发育大型浅水湖盆三角洲,砂体广泛分布。北部水系发育大型浅水三角洲,前缘相砂体分布面积达 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。因此,该油层具相带控藏特点,受三角洲平原、内前缘、外前缘沉积相带控制,依次形成了构造、复合和岩性3种类型油藏,即:第一油藏带为三角洲平原相,砂地比大于50%,发育构造油藏,上油下水;第二油藏带为三角洲内前缘相,砂地比在20%~50%,发育复合油藏,油水关系复杂;第三油藏带为三角洲外前缘相,砂地比小于20%,发育岩性油藏,纯油,但储层薄。葡萄花油层储层埋藏适中,夹持在泥岩中形成良好的储盖组合,物性整体较好,大面积含油,总体为特低—低丰度(特低丰度占81%,低丰度占13%)。在喇—萨—杏以外的葡萄花(P)油层已探明 $11.4 \times 10^8 \text{ t}$ 。

黑帝庙油层(H):该油层受东部物源三角洲前缘砂体和成熟烃源岩控制,发育鼻状构造背景下构造、岩性-构造油藏,斜坡背景下的上倾尖灭岩性油藏。

此外,东部断陷带也是石油聚集有利区。在双城断陷,双66、双68、双70等井近年获重大突破,证实了双城南登娄库组三段在有效烃源岩控制范围内构造带整体含油,是受不同主控断裂分割的构造油藏。

## 2) 致密油勘探

包括扶余、杨大城子油层与高台子油层(部分)。

扶、杨油层(F,Y):该油层组沉积时发育河流-浅水三角洲沉积体系,全盆地分布,储集砂体类型主要为曲流河、网状河及分流河道,盆地主体满盆含砂,厚度普遍大于20 m。河流相砂体物性总体较差,1500 m对应渗透率小于 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,1750 m以下总体致密,以特低渗为主,构造、主砂带富集。油气沿通源断裂向下运移,断砂匹配的疏导体系及异常压力包络面等控制油气分布。物性控藏明显,盆地主体埋藏深、物性差,发育致密油;边部埋藏浅、物性好,发育常规油。致密油区含油连片,边部常规油油水关系复杂。扶余油层致密油主要分布在孔隙度小于12%的中央坳陷区中南部,储层类型主要以河道砂体为主。评价结果表明,致密油Ⅰ类区:孔隙度为8%~12%,分布在龙西、长垣中南部、三肇、安达、长岭凹陷等地区;致密油Ⅱ类区:孔隙度为5%~8%,分布在齐家-古龙及双城地区。致密油资源量为 $11.2 \times 10^8 \text{ t}$ ,已探明 $1.2 \times 10^8 \text{ t}$ ,待探明资源 $9.9 \times 10^8 \text{ t}$ 。

高台子油层(G):处于青山口组烃源岩内,高台子油层为高位体系域沉积,发育多种类型沉积体,源、储一体形成多种类型油气藏。高三、高四油层组含油性好,北部埋藏浅、物性好,为常规油,南部埋藏深物性差,易于形成致密油。油藏类型为岩性、构造-岩性复合油藏。在松辽盆地南部,保乾、英台三角洲前缘带控制高台子油层岩性油藏分布,探明石油 $2.88 \times 10^8 \text{ t}$ ;英台主体、乾安和大情字井一带,局部构造、断裂带控制其富集。

## 3) 页岩油勘探

松辽盆地拗陷期,青山口组和嫩江组沉积时期发生过两次大的湖侵,深湖区广泛发育,形成两套厚层泥岩,其中青山口组有机质丰度高、演化程度适中,是页岩油勘探的重要领域。

青一段厚度大于50 m的分布区,在松南地区约 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,松北地区约 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;TOC(总有机碳含量)大于2.0%的地区,在松南地区约 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,松北地区约 $4.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;R<sub>o</sub>大于0.7%的分

布区,在松南地区约 $0.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,松北地区约 $2.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,松北地区R<sub>o</sub>为0.7%~1.5%,松南地区R<sub>o</sub>为0.7%~1.1%。

嫩江组烃源岩,厚度大于8 m的面积约为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ;TOC平均为6%~8%;R<sub>o</sub>为0.5%~0.8%,面积约 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

页岩油按成熟度划分,可分为成熟和低熟页岩油。松辽盆地中的成熟页岩油(R<sub>o</sub>>0.7%)主要分布在中央坳陷区青一、二段,低熟页岩油(R<sub>o</sub><0.7%)分布于中央坳陷区嫩一、二段。

松辽盆地北部青山口组泥岩,包括黑色页岩、灰黑色含介形虫泥岩及含粉砂泥岩;泥岩中夹有泥质粉砂岩、介形虫层两类。青山口组发育规模介壳岩,沿湖岸线分布,可与泥页岩兼探。

2019年,松辽盆地松页油1HF、松页油2HF和吉页油1HF三口参数井均获日产超10 m<sup>3</sup>工业油流。2020年,在松辽盆地北部古龙凹陷青一段地层的纯页岩内实施水平井,试油获高产工业油气流,定产试采表现出稳定高产能力,平面上15口直井试油证实古龙页岩油平面分布范围广,规模立体含油,轻质油带具有较好的产油能力,轻质油带页岩油气资源量达到几十亿吨。也初步建立了以古沉积环境控制原始优质烃源岩发育、适中的热演化程度控制油气富集、成岩作用控制优质储层分布的“三控”页岩油富集地质理论。

## 4) 油页岩勘探

松南油页岩资源量为 $7142 \times 10^8 \text{ t}$ ,油资源量为 $445 \times 10^8 \text{ t}$ ,其中,已查明油页岩储量为 $277.49 \times 10^8 \text{ t}$ ,油储量为 $13.66 \times 10^8 \text{ t}$ ;潜在油页岩资源量为 $6864 \times 10^8 \text{ t}$ ,油资源量为 $432 \times 10^8 \text{ t}$ 。

油页岩沉积于半深湖-深湖环境中,夹泥灰岩薄层,分布于青一段、嫩一、二段,青一段厚度、含油率高于嫩江组。青一段、嫩二段油页岩有机碳值为2.6%~19.9%,平均为6.4%;含油率在3.5%~16.4%,平均为5.2%。

初步钻探表明,青一段的油页岩埋深:0~2700 m;矿层:5层;单层厚:0~6.93 m;累厚:3.0~31.4 m;含油率:3.51%~9.31%;平均:6.53%;体重:2.1 t/m<sup>3</sup>;平均发热量:1106 cal/kg,最高发热量:1528 cal/kg。嫩一段油页岩埋深:0~2100 m;矿层:3层;厚度:0~4.00 m;含油率:3.51%~4.85%;体重:2.0 t/m<sup>3</sup>;发热量:667 cal/kg。嫩二段油页岩埋深:0~1700 m;矿层:3层;厚度:0~7.25 m;累厚:1.2~14 m;含油率:3.51%~8.53%,平均含油率:5.95%;体重:2.0 t/m<sup>3</sup>;平均发热量:1332 cal/kg。

### 5) 致密气勘探

在松辽盆地徐家围子深层断陷沙河子组砂砾岩发育致密气藏,具有“源控区、相控储、储控藏”和“满凹含气”特征。

在松南地区,深层致密气具有埋深大(3 000 ~ 6 000 m)、岩性复杂(碎屑岩、火山碎屑岩)、物性差 [ $\Phi = 4\% \sim 7\%$ ,  $K = (0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ]、试气产量低(约  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )等特征,动用难度大。资源量约  $1.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占该区天然气总资源量的60%,目前发现率为10%。在德惠断陷致密气完钻探井64口,工业气井20口。三级储量为  $1.165 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。长岭断陷神字井洼槽致密气勘探取得重要发现。

### 6) 页岩气勘探

松辽盆地深层断陷,沙河子组一段、三段烃源岩品质较好,TOC值为1%~5%, $S_1 + S_2$ 为1~6 mg/g,具备页岩气勘探潜力。松南深层断陷页岩气层位为营城组、沙河子组、火石岭组,资源量为  $(8\,800 \sim 9\,500) \times 10^8 \text{ m}^3$ ,面积为2 830 km<sup>2</sup>。梨树断陷梨页1HF井在纹层状页岩中获得工业产能。

### 7) 火山岩、基岩天然气勘探

松辽盆地深层发育36个断陷,徐家围子、长岭、英台、王府等4个断陷是千亿方探明储量分布区,营城组、火石岭组火山岩已被证明是较好的储层。徐家围子断陷为徐东、徐中和徐西3条北北西向断裂控制的复式箕状断陷,断裂带控制火山岩分布,火山口区主要分布在断裂带上;发育营一、营三段两套火山岩,厚度一般在500~2 500 m。营一段分布在断陷中南部,以酸性岩为主;营三段主要分布在北部的安达-宋站地区,以中-基性岩为主。以断裂带为基础形成了3个气藏富集带,探明天然气为  $2\,475.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。松南地区,火山机构控藏,火山岩气藏复杂,含气饱和度低,探明储量为  $2\,011 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

中央古隆起的花岗岩、糜棱岩、浅变质岩已被证明含气。隆平1井压后日产气  $11.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,中央古隆起基岩风化壳勘探实现重大突破。

此外,在松辽盆地西斜坡,砂岩型铀矿资源丰富。同时,在油页岩和油砂资源中,其他稀有金属、稀土金属矿产也较丰富,需要密切关注。

## 2.2 鄂尔多斯盆地“岩性-地层油气藏+页岩油气”勘探

鄂尔多斯盆地北起阴山,南抵秦岭,西自六盘山,东达吕梁山,面积为  $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地内油、气、煤、钾盐、铀矿同盆共生,矿产资源丰富,是中国重要的矿

产资源、能源化工基地。就资源勘查而言,浅层铀矿、煤炭、煤层气与石油,中深层天然气与钾盐等展现出“多种资源、多层系立体勘查”局面。

### 2.2.1 油气地质条件

鄂尔多斯盆地地处华北克拉通西部,具有太古界一下元古界结晶基底,其上发育中元古界长城系—蓟县系、寒武系—中下奥陶统、上石炭统一二叠系、三叠系—白垩统、新生界(局限于盆地西南部)<sup>[52]</sup>。其内发育新生界底界、白垩系底界、侏罗系底界、石炭系底界、寒武系底界、蓟县系底界、长城系底界等7个区域性不整合面。相应地,盆地经历了中元古代裂陷、新元古代挤压隆升,寒武纪—早奥陶世伸展沉陷、中晚奥陶世—早石炭世挤压隆升,晚石炭世—中三叠世伸展拗陷、晚三叠世(弱)挤压,早侏罗世—早白垩世伸展拗陷、晚白垩世挤压隆升,新生代周缘断陷、本部隆升等5个伸展—聚敛旋回。区域性不整合面为不同性质盆地的叠合界面,因此,鄂尔多斯盆地为典型的多旋回叠合盆地。盆地内部构造相对简单,周缘构造复杂,为不同时期的褶皱带叠加而成。

鄂尔多斯盆地具有优越的油气地质条件(图3),主要表现在以下4个方面。

#### 1) 烃源岩多层系发育,覆盖全盆地,供烃能力强。

油源岩主要为上三叠统延长组7段(长7段)烃源岩、长9段作为补充。长7段沉积期盆地热液活动强,供给大量营养物质,生物繁茂,湖盆水体深60~120 m,沉积的黑色页岩面积达  $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要分布于湖盆南部;暗色泥岩面积达  $6.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,主要分布于湖盆北部。长7段具整体生烃的特征,页岩、泥岩和泥质粉砂岩均具备良好的生烃能力。有机质丰度高(黑色页岩TOC=13.81%;暗色泥岩TOC=3.75%),类型好(I—II<sub>1</sub>),成熟度较高( $R_o = 0.6\% \sim 1.0\%$ )。长7段烃源岩排烃效率高,黑色页岩排烃率达77.3%,暗色泥岩排烃率为42.7%;石油运聚系数高达10.1%。广覆式分布的烃源岩奠定了盆地中生界富油的物质基础。

气源岩主要为分布在古生界和中元古界的不同类型源岩,为大气田的形成奠定了物质基础。石炭纪—二叠纪广泛分布煤系烃源岩,覆盖全盆地,煤层厚6~20 m,暗色泥岩厚40~120 m,主要处于成熟—过成熟阶段( $R_o = 1.3\% \sim 2.0\%$ )<sup>[53]</sup>。天然气近距离运移,聚集效率高,在生气强度大于  $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$  的地区可以形成大规模天然气聚集,天然气运聚系数达4.90%。奥陶系气源岩的分布在盆地东、西有别。盆地东部奥

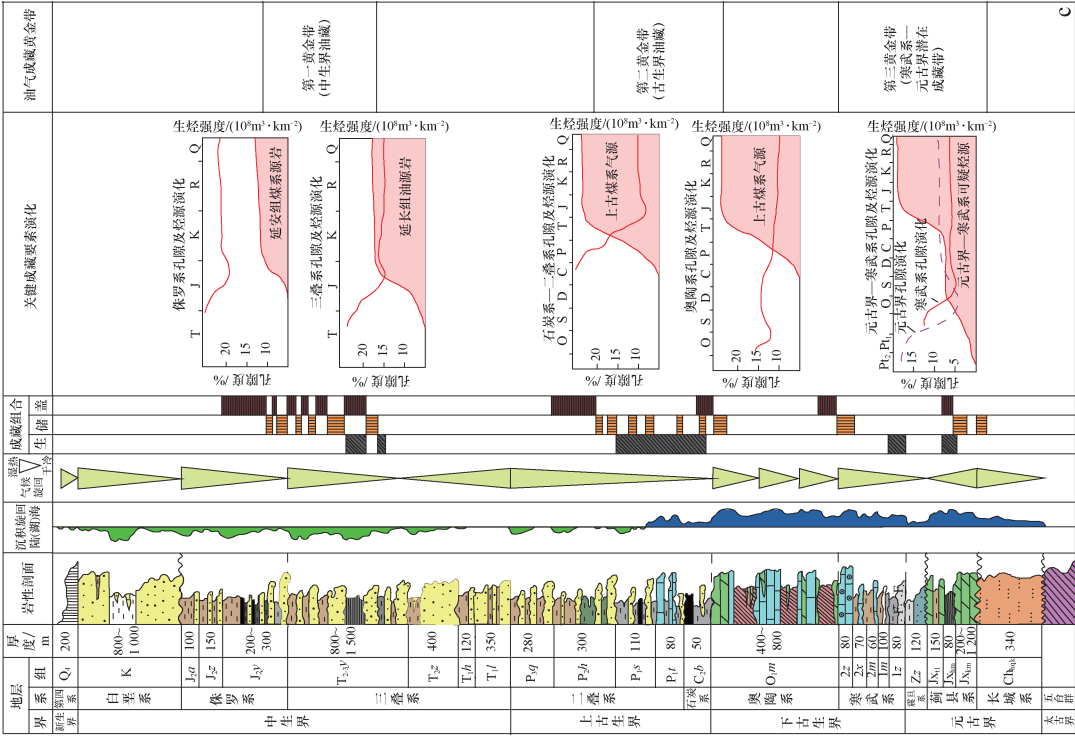
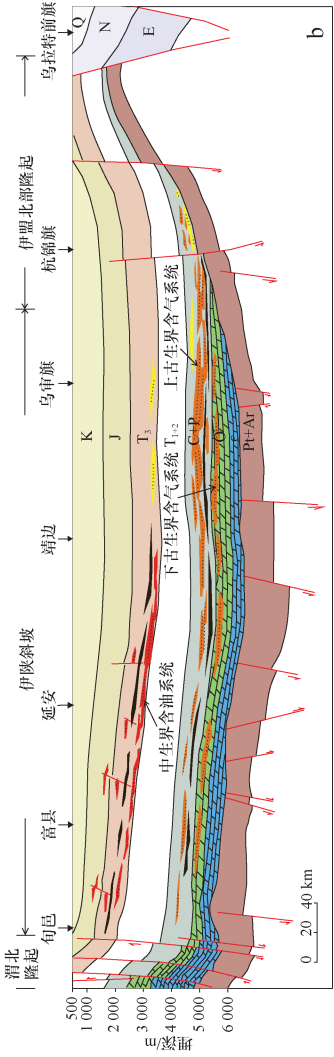
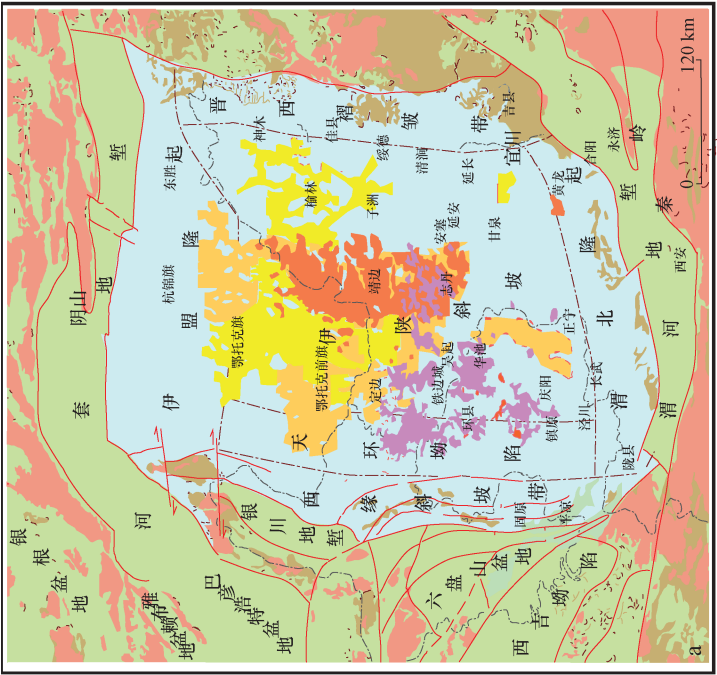


图3 鄂尔多斯盆地多层系油气成藏模式与立体综合勘探格局  
a.鄂尔多斯盆地油气田分布; b.鄂尔多斯盆地南北向油气地质大剖面; c.鄂尔多斯盆地油气成藏组合分布柱状图

陶系马五<sup>6</sup>亚段盐下多个层段发育泥岩、泥质碳酸盐岩,有机碳含量在0.2%~1.31%(平均为0.36%);有效烃源岩单层厚度一般为1~3 m,累计厚20~40 m,如大深1井在膏盐层及盐下钻遇烃源岩厚28.65 m;地球化学分析表明,奥陶系盐下天然气甲烷碳同位素普遍小于-38‰,氢同位素普遍小于-180‰,证实了奥陶系存在规模性生烃贡献;奥陶系成烃生物组合以浮游生物为主,成烃潜力好;同时,马家沟组发育有机酸盐,模拟实验成烃转化率高达74%,为奥陶系盐下规模生烃进一步奠定了基础。盆地西部和南缘中-上奥陶统发育盆地-斜坡相的暗色泥灰岩、页岩及泥质碳酸盐岩,厚度为60~200 m,有机碳含量为0.40%~2.91%,生烃能力较好。

此外,盆地最底层长城系断陷中也发育较好烃源岩,热演化程度较高。

2) 储集层系众多,纵向上发育5套含油气层系,具有“上油下气”的分布格局。

主要包括中生界两套含油层系:侏罗系延安组(延1—延10)和三叠系延长组(长1—长10);古生界两套含气层系:上古生界碎屑岩和下古生界碳酸盐岩;中元古界长城系砂岩。

大型三角洲沉积体系构建了多类型、多成因储集砂体,是该盆地的一个重要特色。

晚石炭世—二叠纪,经加里东期长达1.5亿年的抬升剥蚀,形成了开阔、平缓的古地形。沉积充填经历了早期海相潟湖—潮坪沉积体系到陆相河流—三角洲沉积体系的演变,主要发育3种类型的三角洲。①海侵型三角洲:本溪期—太原期,在幕式海侵背景下,北部物源供给较为充足,发育一定规模的海相三角洲沉积;②海退型三角洲:山西期,受海西运动影响,北部阴山古陆进一步抬升,海平面整体下降,物源供给能力增强,三角洲沉积向南不断扩大;③湖泊型三角洲:石盒子期,北部山系持续隆升,物源供给充足,在平缓沉积底形上,湖平面频繁波动,形成大型缓坡三角洲沉积。从本溪期到石盒子期,北部物源供给增强,水体变浅,河流水动力增强,盆地砂体规模持续向南扩大,形成了平面上大面积分布、纵向上多层系叠置的“满盆砂”分布格局。受物源与沉积环境控制,不同地区砂体组合特征差异性较大:苏里格地区沉积旋回相对较少,单层砂体厚度大,分布稳定,以石英砂岩为主;盆地东部多层砂体复合叠置,单层厚度较大,分布稳定;盆地西南部沉积旋回相对较少,单层厚度较薄,砂体变化较快。盆地东部和南部以岩屑石英砂岩为主。

晚三叠世,延长组沉积期发育4个沉积物源体系。

①西南体系:受陇西古陆—秦岭近源控制,发育辫状河三角洲;②西部体系:受陇西古陆近源控制,发育小型扇三角洲沉积;③西北体系:受阿拉善古陆近源控制,发育辫状河三角洲;④东北体系:受阴山古陆远源控制,发育曲流河三角洲。

下古生界发育碳酸盐岩储集层。以中央古隆起为界,早古生代存在华北海域与秦祁海两大海域,其沉积体系差异明显。中央古隆起以西秦祁海域,奥陶系发育齐全,岩性主要为深水盆地相和斜坡相灰岩;古隆起以东华北海域,缺失中-上奥陶统,马家沟组发育陆表海碳酸盐岩与局限海蒸发岩旋回性沉积。其中马一、马三、马五段为膏云岩与盐岩、膏岩发育段;马二、马四、马六段为灰岩、白云岩发育段。经成岩改造与暴露岩溶,发育风化壳、内幕白云岩、礁滩体等3种主要储集体。

长城系断陷中的砂岩气层储集物性较好,在杭锦旗地区已获工业气流。

3) 近距离运聚或源内油、气成藏,岩性、地层型油气藏复式聚集。

盆地主要发育上古生界碎屑岩岩性气藏(如榆林、苏里格气田)及下古生界风化壳型气藏(如靖边气田)和白云岩型气藏(如奥陶系中组合)3种类型气藏。

下古生界主要发育奥陶系马五<sup>1+2</sup>、马五<sup>4</sup>、马五<sup>5</sup>、马五<sup>6</sup>、马五<sup>7</sup>、马五<sup>9</sup>亚段等含气层系,形成奥陶系顶部风化壳及白云岩型气藏,以靖边气田(包括靖西地区)为代表。石炭系—二叠系生成的煤系气可以向下运聚在奥陶系风化壳中,有“上生下储、侧生旁储”两种聚集类型,第一种成藏取决于石炭系的异常压力,第二种成藏依赖于石炭系与奥陶系直接接触的供烃窗口(图3b)。

上古生界主要发育石炭系本溪组、二叠系太原组、山西组、石盒子组以及石千峰组等含气层系,石炭系—二叠系煤系烃源岩广覆式生烃与大面积储集砂体的有效配置,近距离运聚,形成大面积分布的致密砂岩气藏,以苏里格、榆林、神木等气田为代表。

盆地主要发育延长组岩性、侏罗系河道砂岩及侏罗系低幅度背斜、岩性等油藏。

延长组大型岩性油藏,长7优质烃源岩与长6、长8等大型储集砂体的有效配置,在安塞、西峰、姬塬等地区形成了大型三角洲岩性油藏群,在湖盆中部华庆地区形成了大型重力流岩性油藏,以庆城大油田为代表。

4) 区域不整合面附近形成大规模油气聚集。

目前已在石炭系底部不整合面上(本溪组与马家

沟组之间)、侏罗系底部不整合面上(延安组与延长组之间)分别发现了靖边气田和马岭油田,其他不整合面有待继续探索。

### 2.2.2 中生界“砂岩常规油与页岩油并举”的石油立体综合勘探实践

鄂尔多斯盆地中生界的石油勘探历经长期艰苦探索,始终坚持理论和技术创新,形成了“陆相低渗透油田”勘探的鲜明特色。中生界石油多层系“立体”聚集,共8个聚集层位;多种资源同盆共生,有常规油、致密油、页岩油、油层气等类型。按孔隙直径、渗透率大小,可将盆地中生界油藏分为低渗透油藏[渗透率  $K = (1 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ]、致密油[ $K = (0.3 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ]、页岩油( $K < 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )3类油藏。目前,依赖于技术进步,已经从低渗透、致密油走向了页岩油勘探时代,即全盆地多层系(段)、多类型(砂岩、粉砂岩、页岩)、不同尺度孔径油藏的综合、立体勘探时代。

在长期实践中形成了:①古地貌成藏理论(1970—1993年),以侏罗系马岭油田为代表;②曲流河三角洲成藏理论(1984—1994年),以长6段安塞、靖安油田为代表;③辫状河三角洲多层系复合成藏理论(1995—2006年),以长8段西峰油田、长4+5段姬塬油田为代表;④浅水三角洲理论、致密油成藏理论、湖盆中部页岩油成藏理论(2007至今),以长8段镇北、环江油田、长7段庆城油田、长6段华庆油田为代表。截至2018年底,全盆地总资源量为  $158.38 \times 10^8 \text{ t}$ ,已探明储量为  $61.7 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中,中国石油长庆油田公司发现32个油田,已有探明储量为  $48.76 \times 10^8 \text{ t}$ ,控制储量为  $13.70 \times 10^8 \text{ t}$ ,预测储量为  $11.41 \times 10^8 \text{ t}$ ,占有资源量为  $146.5 \times 10^8 \text{ t}$ 。已有探明储量主要分布在侏罗系、长4+5、长6、长8(占比87%),剩余石油资源量为  $97.74 \times 10^8 \text{ t}$ ,主要分布于长6、长7及长8段(占比70%)。

#### 1) 长8油层

长8段沉积期,湖盆底形控制了砂体展布格局。长8<sup>1</sup>亚段沉积期湖盆底形平缓,平面上西部较陡,发育3个北东—南西向展布的小洼槽,控制了砂体大面积展布;长8<sup>2</sup>亚段沉积期湖盆底形起伏较大,发育3个北西—南东向沉积洼槽,控制了3期砂体平行湖岸线发育的格局。根据沉积组合、砂体成因和砂体结构等特征,确立了连续叠置型、间隔叠置型和砂泥互层型3种砂体结构类型,连续叠置型、间隔叠置型为优势砂体类型。连续叠置砂体与绿泥石膜成岩相是有利沉积、成岩相带。长8段砂体与长7段烃源岩直接接触,

受过剩压差驱动,烃源岩向下排烃,当压力增大到一定程度,石油会通过缝、孔双重输导,向低渗致密储层中运移,分流河道砂体稳定分布,储层物性好,“上生下储”形成大型岩性油藏。

2003年以来,盆地长8段实现了从西峰到姬塬、镇北—环江的拓展,近年来逐步向储层更致密的合水、南梁—华池、陕北地区挺进。通过整体勘探,盆地长8油藏实现了大连片。截至2018年,长8段已有探明石油储量  $12.41 \times 10^8 \text{ t}$ 。

#### 2) 长6油层

长6段勘探始于20世纪90年代,在东北部发现了安塞、靖安油田。近年来,通过深化重力流和辫状河三角洲成藏理论认识,在湖盆中部发现了华庆油田,西北部姬塬地区落实了规模储量,实现了长6油层勘探新突破。

截至2018年,已累计提交石油探明储量  $18.42 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中,陕北老区探明储量为  $9.15 \times 10^8 \text{ t}$ ,华庆油田探明储量为  $6.47 \times 10^8 \text{ t}$ ,姬塬地区探明储量为  $2.66 \times 10^8 \text{ t}$ 。

#### 3) 长9和长10油层

长9油层,在姬塬地区提交探明储量为  $7600 \times 10^4 \text{ t}$ ,在陕北老区发现高产含油富集区,勘探潜力大。长10油层,在陕北地区新增探明、预测储量  $1.01 \times 10^8 \text{ t}$ ,同时在姬塬和陇东地区勘探发现新苗头。

#### 4) 长4+5—侏罗系油层

长4+5—侏罗系油层距离长7段烃源岩略远,小断距(隐性)断裂与砂体复合输导石油,运移途中物性相对较好的砂体优先聚集成藏。截至2018年,长4+5段探明石油  $5.9 \times 10^8 \text{ t}$ ,以马岭油田为代表;长3段探明石油  $1.71 \times 10^8 \text{ t}$ ,以镇北油田为代表;长2、长1段分别探明石油  $2.31 \times 10^8 \text{ t}$ ,  $0.38 \times 10^8 \text{ t}$ ,以城壕油田为代表。

侏罗系构造—古地貌油藏:长7段生成的石油通过裂缝、不整合面、叠置砂体侧向运移,形成侏罗系等多层系高产富集区。受侏罗纪古地貌形态控制,石油沿古河道向上运移,在河间丘、丘咀、高地等古地貌富集成藏。侏罗系油层厚度  $5 \sim 10 \text{ m}$ ,埋深  $800 \sim 1500 \text{ m}$ ;以马岭、元城等油田为代表。富县组、延10段油藏富集主要受古地貌条件控制,在丘咀、斜坡等有利圈闭富集成藏;延9段以上层系油藏受控于低幅度构造及有利相带,在裂缝的沟通下,石油通过不整合面在有利圈闭聚集成藏。因此,有古地貌控制型(延10段、富县组)、沉积相控制型(延9段以上)及断层控制型(西缘断块)等油藏类型。石油分布呈斜坡式、古河

式、高地式、河间丘式、分流河道、河道边部及地层断块等。侏罗系探明石油  $5.57 \times 10^8$  t, 主要在延 9、延 10、延 1-8、富县组、直罗组等层组(段), 也具有多层系聚集特征。

#### 5) 长 7 页岩油

长 7 段沉积期湖盆广泛发育富有机质泥页岩, 薄层砂岩夹持于泥页岩之中<sup>[54]</sup>, 自生自储、源内成藏, 为典型的页岩油。

长 7 页岩油田以庆城油田为代表。该油田的发现经过了近 50 年的曲折勘探历程。1970 年, 庆 6 井为延长组 7 段第一口油层井, 压裂后试油见油花; 1972 年, 岭 3 井长 7 段压裂求产获日产  $4.7 \text{ m}^3$  纯油, 成为长 7 段首口工业油流井; 20 世纪 70 年代—21 世纪初, 分别在庆阳井组、合水地区固 3 井区等区块多井获工业油流, 产量低, 难动用; 2011 年至今: 深化研究, 明确页岩油田的地质基础, 西 233、庄 183、宁 89 和宁 46 等试验区提高了单井产量, 带动规模勘探开发, 发现了庆城大油田。

长 7 油层赋存于长 7 烃源岩层系内, 黑色页岩厚度为 5~25 m; 暗色泥岩厚度为 5~40 m。长 7 段半深湖—深湖区主要发育重力流沉积, 多薄层粉细砂岩叠合分布, 砂地比平均值为 17.8%, 单砂层厚度一般 0.5~2 m, 叠置砂体厚 10~15 m, 分布范围广, 是页岩油勘探的主要甜点区。在甜点区, 砂质岩类孔隙度为 8.3%, 渗透率  $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。长 7 页岩油含油饱和度达 70% 以上, 原始气油比为 70~120  $\text{m}^3/\text{t}$  (生产气油比 300  $\text{m}^3/\text{t}$ ), 原油粘度平均 1.35  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ , 有利于页岩油产出。

2019 年, 庆城油田新增石油探明储量  $3.58 \times 10^8$  t、预测储量  $6.93 \times 10^8$  t, 合计  $10.51 \times 10^8$  t, 探明了中国最大的页岩油田。2018 年以来, 开展页岩油水平井规模开发, 完钻水平井 154 口, 建产能  $114 \times 10^4$  t, 目前投产 97 口, 日产油超千吨, 是中国第一个突破百万吨产建规模的页岩油田。

#### 2.2.3 “古生界多层系多类型”的天然气立体综合勘探实践

鄂尔多斯盆地的天然气勘探也有半个多世纪历程。20 世纪 60 年代—80 年代中期, 以构造圈闭成藏理论为指导, 发现了刘庆 1、镇川 1 等小型气藏。80 年代末期, 在煤成气、岩溶古地貌成藏理论指导下发现了靖边大气田。90 年代后期在三角洲成藏理论指导下发现了乌审旗和榆林千亿方气田, 2000 年苏 6 井的钻探发现了苏里格气田。进入 21 世纪, 随着致密气成藏

理论不断发展, 天然气勘探进入大规模整体勘探阶段, 气田面积持续扩大。截至 2018 年, 探明天然气地质储量  $6.21 \times 10^{12} \text{ m}^3$  (含基本探明  $2.86 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ), 而近 10 年新增探明、基本探明储量  $5.37 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 占盆地总探明储量的 78%; 已先后探明 11 个气田, 主要分布在伊陕斜坡次级构造单元带内。其中, 靖边、榆林、乌审旗、苏里格、子洲、神木均为超千亿方的大型气田; 形成了苏里格、下古生界和盆地东部 3 个万亿方大气区, 落实了盆地南部、西部接替领域。

自上而下, 鄂尔多斯盆地主要发育上古生界碎屑岩、下古生界碳酸盐岩两套含气层系, 除此之外, 还发育中元古界砂岩气藏。

#### 1) 上古生界碎屑岩岩性气藏成藏组合

气层厚度 10~15 m, 埋深 2 600~3 800 m。石炭系—二叠系煤系烃源岩广覆式生烃与大面积储集砂体构成有效配置, 近距离运聚形成大面积分布的致密砂岩气藏。根据源—储的组合关系, 可划分 3 类成藏组合。①源内组合: 本溪、太原组及山 2 段, 平均含气饱和度 70%, 局部高产富集, 是寻找高效储量的勘探目标。②近源组合: 以苏里格气田为代表, 储层为石英砂岩, 以盒 8、山 1 段气藏为主, 厚度大, 平均含气饱和度 65%, 气藏大面积连续分布, 目前累计探明(含基本探明)储量达  $4.72 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , 是规模储量主要勘探目标与开发建产的现实目标区。③远源组合: 上石盒子组及千 5 段以次生气藏为主, 平均含气饱和度 50%, 气藏规模相对较小。

上古生界致密砂岩气藏平面具有明显的分带性。其中: ①盆地东部储层为岩屑石英砂岩, 多层系含气、气藏纵向叠置、横向复合连片分布, 是增储上产的有利目标区; ②盆地南部受南部物源控制, 储层为岩屑石英砂岩, 以盒 8、山 1 气藏为主, 埋藏深、规模较小、连续性相对较差, 勘探程度低, 是下一步提交规模储量潜力区; ③盆地西部受西北部物源控制, 储层为石英岩屑砂岩。2019 年, 在青石岭地区提交预测储量  $2 036 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 是宁夏首个千亿方大气区。

#### 2) 下古生界碳酸盐岩气藏成藏组合

主要发育风化壳岩溶缝洞型、白云岩型、台缘高能滩相等 3 种储集体类型。

马五段是盆地奥陶系最重要的勘探目的层系。盆地中东部马五段表现为高频旋回的沉积特征, 由于沉积期海平面的振荡发生海进—海退频繁变化, 在其内部形成了膏盐岩—碳酸盐岩互层状沉积, 为多类储层的叠合发育创造了条件。其中, 马五<sup>4</sup>、马五<sup>6</sup>、马五<sup>8</sup>、马五<sup>10</sup>亚段为海退期沉积, 岩性以蒸发岩为主; 马五<sup>5</sup>、

马五<sup>7</sup>、马五<sup>9</sup>亚段为夹在蒸发岩层序中的短期海侵沉积,以碳酸盐岩沉积为主。

马五段风化壳气藏:以靖边气田为代表,产层主要发育在马五<sup>1</sup>—马五<sup>4</sup>亚段含膏白云岩段,气层厚度6~10 m,埋深3 300~3 700 m。加里东期,形成西高东低的古地貌,岩溶作用使膏盐矿物溶解形成溶孔、孔洞型储集体,储层物性较好,横向分布稳定。风化壳孔洞型储层的上倾方向受致密岩性或侵蚀古沟槽泥岩遮挡,形成风化壳型气藏。2019年,靖西地区马五段风化壳新增探明储量 $2\,210 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、预测储量 $2\,007 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,使靖边气田累计探明储量达到 $8\,671 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,已形成万亿方大气区。

奥陶系(马五<sup>6</sup>亚段)盐层之下白云岩:自靖边气田发现以来,构建了“上组合垂向运聚、中组合侧向运聚”的双向运聚模式。在新认识的指导下,2019年部署26口井,有11口井在盐下马五<sup>6</sup>、马五<sup>7</sup>亚段钻遇气层,8口井试气获工业气流(其中4口井产量大于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ),在乌审旗—吴起地区新增控制储量 $736 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;在靖边地区发现新的高产富集区,有利含气面积为 $2\,000 \text{ km}^2$ 。盆地中东部靖边—榆林地区的马四、马三段等均发育白云岩夹层,向东发育岩性相变,有利于形成自生自储型白云岩岩性气藏。

奥陶系台缘礁滩相带:沿盆地西缘、南缘展布,资源基础良好,近期勘探已经获得工业气井,并在多个新层系见到新苗头,是碳酸盐岩勘探的接替领域。主要发育礁滩型储集体为基础的成藏组合。

### 3) 盆地深层中元古界裂陷槽领域

杭锦旗地区中元古界断陷残留地层厚度最大达3 000 m。残丘潜山构造是成藏有利位置,发育低幅度潜山气藏,断陷近源区、陡坡区是充注有利部位。近期,锦142井获气层和含气层59.1 m,自然求产日产气 $7\,809 \text{ m}^3$ ,日产液 $1.2 \text{ m}^3$ ;初步落实圈闭资源量 $242.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。表明中元古界深层裂陷槽领域良好的勘探潜力。

## 3 立体综合勘探的思维与方法

### 3.1 资源基础的重新认识

中国油气资源丰富,待发现资源数量巨大,未来勘探开发潜力仍较大。截至2018年底,石油的可采资源量为 $300.7 \times 10^8 \text{ t}$ ,累计探明技术可采储量为 $105.3 \times 10^8 \text{ t}$ ,待探明可采资源量为 $195.4 \times 10^8 \text{ t}$ ;天然气的可采资源量为 $50.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ;累计探明技术可采储量为 $7.87 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,待探明可采资源量为 $42.21 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

天然气资源潜力大于石油,天然气待探明可采资源量约为石油的1.7倍。

油气资源的分布体现出勘探具有以下特点:

1) 陆上大盆地仍是常规油气勘探主战场。塔里木、准噶尔、柴达木、鄂尔多斯、四川、松辽与渤海湾(陆上)等7个盆地的待探明石油地质资源量合计 $505 \times 10^8 \text{ t}$ ,待探明天然气地质资源量合计 $54 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。从油气探明率来看,石油处于勘探中期阶段,天然气处于勘探早期阶段,勘探前景广阔。

2) 深层—超深层资源潜力大,具备发现大型—特大型油气田潜力。其中,常规石油地质资源量为 $182 \times 10^8 \text{ t}$ 、可采资源量为 $44 \times 10^8 \text{ t}$ ,常规天然气地质资源量为 $33.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、可采资源量为 $18.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。深层—超深层已成为勘探重要领域。

3) 海域勘探走向深水。近海总体处于勘探高峰前期阶段,是增储上产的现实领域。近海石油资源量为 $239 \times 10^8 \text{ t}$ ,待探明 $189 \times 10^8 \text{ t}$ ,天然气资源量为 $20.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,待探明 $19.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。深水勘探处于起步阶段,是未来战略接替领域,其中,珠江口盆地石油地质资源量为 $24.8 \times 10^8 \text{ t}$ ,天然气地质资源量为 $2.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ;琼东南盆地石油地质资源量为 $4.6 \times 10^8 \text{ t}$ ,天然气地质资源量为 $3.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

4) 非常规油气资源潜力巨大,勘探逐渐取得突破与进展。其中,致密油资源量为 $146.6 \times 10^8 \text{ t}$ ,页岩油为 $397.5 \times 10^8 \text{ t}$ ,致密气为 $22.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,页岩气为 $121.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,煤层气为 $30.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。非常规油气勘探开发处于起步阶段。

5) 油气资源品质降低,勘探开发“低、深、隐、难”,全面走向“常规+非常规”立体勘探时代。近10年中国新增探明储量不同类型占比体现出这一重要趋势。在石油资源品质方面:中小型规模占55%,低渗和特低渗占75%,低丰度占46%,中浅层和浅层占51%,岩性油藏占55%;在天然气资源品质方面:大型整装占87%,低渗透占76%,低丰度占38%,深层和超深层占50%,岩性气藏占46%。

随着油气勘探深入与技术进步对油气资源量的认识逐渐加深,资源规模也不断扩大。如前述对松辽盆地的页岩油气、深层砂砾岩致密气、火山岩天然气,鄂尔多斯盆地致密油、页岩油、盐下白云岩天然气,玛湖凹陷致密砂砾岩天然气,济阳坳陷、黄骅坳陷的深层页岩油,江汉盆地盐间页岩油等的勘探发现了一批大中型油气田,有力推动了中国非常规油气的勘探进程。

### 3.2 勘探理论与勘探阶段

#### 3.2.1 油气勘探阶段

油气勘探实践经历了“实践—认识—实践—认识”的循环反复、螺旋式上升的过程。中国油气勘探历程突出地体现了这一过程(表1)。从中国油气发现历程来看,可以简略地划分为3个阶段。

##### 1) 构造油气藏勘探阶段

以埋藏较浅的背斜为勘探对象,发现了延长、老君庙、独山子、冷湖、克拉玛依、大庆、威远、胜利、任丘、河南等一批油气田,陆相砂岩为主要储层;这一阶段以背斜学说、圈闭成因学说为指导,在中国还形成了独特的陆相生油理论和源控论与复式油气聚集区(带)理论。

##### 2) 岩性、地层油气藏勘探阶段

勘探的对象为盆地中浅层的岩性、地层油气藏、背斜—岩性、断裂—岩性、复杂构造和岩性—地层—构造油气藏等,陆相与海相地层均探,发现了克拉2、塔河—轮南、靖边、西峰、安岳和普光等一大批大中型油气田,创新形成了多种针对不同勘探对象的理论,如非构造油气藏理论,煤成油、煤成气理论,三角洲大面积成藏理论,前陆冲断带油气成藏理论,克拉通海相油气成藏理论等。

这一阶段出现了几个亮点:一是通过梳理明确提出了“岩性地层、海域、海相和前陆4大勘探领域”的概念<sup>[15,19-20]</sup>,认为这4大领域是未来勘探重点。二是出现了油气储量持续增长高峰。以济阳坳陷为代表的岩性、地层、小断块油气藏勘探年增储 $1 \times 10^8$  t持续20年的勘探奇迹,以鄂尔多斯盆地三角洲岩性油气藏勘探年增三级储量 $10 \times 10^8$  t持续8年的壮举。

##### 3) 立体综合勘探(常规+非常规油气藏)阶段

中国沉积盆地大多刚跨入或即将进入这一阶段,松辽、鄂尔多斯等盆地走的稍远一些。其勘探对象是小断块、薄层砂体、深潜山、内幕潜山、白云岩、礁滩体、介壳滩、砂砾岩体、火山岩、变质岩等,页岩、油页岩、煤层、油砂等也成为勘探对象,共同特点是“低、深、隐、难”,勘探走向了深层、深水等复杂领域。勘探的做法是“常规油气精细勘探+致密油气规模勘探+页岩油气、煤层气、油砂、油页岩突破勘探”;勘探的理念突破生、运、聚相对独立的概念,合而为一,走向“全层系、多类型、多资源、全链条整体勘探”的新时代。发现了以克深、顺北、轮探1、玛湖、昌吉、姬嫫、庆城、英雄岭、渤中19-6、焦石坝和蜀南页岩气田等为代表的一大批大中型油气田,其中庆城页岩油田、焦石坝与蜀南页岩气田独具特色,为巨型油气田。

表1 中国油气勘探阶段的划分

Table 1 Petroleum exploration stages in China

| 勘探阶段                           | 石油地质理论                                                                       | 勘探对象                                                                                                 | 勘探理念                                                                                                                            | 核心技术                                                                                                                                     | 典型油气田                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 构造油气藏                          | 背斜学说<br>圈闭成因学说<br>陆相生油理论<br>源控论<br>复式油气聚集区(带)理论<br>(浮力为运移动力)                 | 背斜为主<br>背斜、断块、岩性等<br>复式油气藏(陆相碎<br>屑岩为主)                                                              | 以背斜为主的圈闭<br>(圈闭是油气聚集的<br>基本单元)                                                                                                  | 地面地质调查、重、磁、<br>电、地震、常规测井、钻<br>探技术                                                                                                        | 延长、老君庙、独山子、<br>克拉玛依、石西、彩南、<br>陆梁、大庆、胜利、任<br>丘、河南、柯克亚、冷<br>湖、涩南、威远、卧龙<br>河、罗家寨                                                                                         |
| 岩性、地层油气藏<br>(非构造油气藏、<br>隐蔽油气藏) | 非构造油气藏理论<br>煤成油、气理论<br>三角洲大面积成藏理论<br>前陆冲断带成藏理论<br>克拉通海相成藏理论(生-<br>运-聚-保过程控制) | 岩性、地层油气藏,<br>背斜—岩性、断裂—<br>岩性、岩性—地层—<br>构造油气藏等(陆相<br>+海相)                                             | 多类型圈闭复式油气<br>藏(含油气系统概念:<br>从生油岩—圈闭,运<br>聚过程中复式油气成<br>藏;厘定了岩性地层、<br>海域、海相和前陆4<br>大勘探领域)                                          | 高分辨率地震技术<br>山地地震勘探技术<br>山地快速钻探技术<br>超深井钻井技术<br>油藏描述技术<br>缝控储层改造技术                                                                        | 克拉2、塔河—轮南、哈<br>德逊、克拉美丽、安塞、<br>靖边、西峰、华庆、环<br>江、延安、大吉、柳杨<br>堡、鄂东、安岳、普光、<br>元坝、成都、中江、庆<br>深、龙深、大情字井、荔<br>湾3-1                                                            |
| 立体综合勘探<br>(常规油气藏+<br>非常规油气藏)   | 叠合盆地油气地质理论<br>非常规油气成藏理论<br>煤层气(瓦斯)地质学                                        | 小断块、薄层砂体、<br>深潜山、内幕潜山、<br>白云岩、礁滩体、介<br>壳滩、砂砾岩体、火<br>山岩、变质岩等,页<br>岩、油页岩、煤层、油<br>砂等(低、深、隐、难;<br>深层、深水) | 常规油气精细勘探+<br>致密油气规模勘探+<br>非常规(页岩油气、煤<br>层气、油砂、油页岩、<br>油气—煤—盐—金属<br>等)突破勘探(突破<br>生、运、聚独立概念,<br>合而为一;全层系、多<br>类型、多资源、全链条<br>整体勘探) | “两宽一高”地震技术<br>低频可控震源勘探技术<br>地震采集—处理—解释<br>一体化<br>储层岩石力学评价技术<br>水平井+体积压裂技术<br>地质—工程一体化<br>勘探—开发一体化<br>油气—煤—煤层气—钾<br>盐—铀共采技术<br>天然气水合物开采技术 | 克深、哈拉哈塘、顺北、<br>轮探1、玛湖、昌吉、姬<br>嫫、镇北—合水、南梁<br>—华池、陕北、庆城、英<br>雄岭、东坪、昆北、蓬萊<br>9-1、渤中19-6、双鱼<br>石、彭州、焦石坝、蜀南<br>页岩气田、陵水17-2、<br>25-1、流花29-1、29<br>-2、宁波17-1、22-<br>1、东方13-2 |

勘探发现和突破带来了油气储量新的增长高峰期,油气储量高峰增长,石油新增探明储量连续12年超 $6 \times 10^8$  t,天然气探明储量连续11年超4 000  $\times 10^8$  m<sup>3</sup>,是历史上持续时间最长、储量规模最大的时期。

### 3.2.2 油气勘探理论

石油和天然气地质学是综合运用地质学、地球化学、沉积岩石学、构造地质学、地史学及数学、物理等多种学科知识来阐述石油和天然气在地壳中的形成过程、产出状态及分布规律(或是生成、运移和聚集规律)的学科。油气勘探应用石油地质学的原理进行实践,勘探实践反过来推动着石油地质学的进步与理论的深化。新的勘探阶段、勘探理念的转变包括3个方面。

#### 1) 需要发展与应用“叠合盆地油气成藏理论”。

深层-超深层已成为油气勘探的最重要领域。中国超深层油气资源潜力巨大(仅塔里木、四川和鄂尔多斯3个盆地的深层可采储量就超过 $100 \times 10^8$  t油当量),近年来相继发现了普光、安岳、元坝、克拉2、克深和大北等深层-超深层大气田。塔里木盆地每年90%以上的新增探明储量来自于深层-超深层。部署在塔里木盆地塔北隆起的轮探1井已获得重大突破,该井是探索寒武系盐下的一口风险探井,完钻井深8 882 m,是目前亚洲陆上第一深井。轮探1井在8 200 m超深层获得工业油气流,发现一个新层系——寒武系吾松格尔组,证实了8 000 m以下依然发育原生油藏和优质储-盖组合,打破了8 000 m超深层液态石油勘探的“死亡线”。塔里木盆地寒武系盐下勘探范围广、潜力大,9 000 m以浅有利勘探面积 $2.3 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,油气当量达 $30 \times 10^8$  t。

探究深层、超深层油气成藏机理和富集条件,需要开展中新元古代-古生代的活动论构造-古地理、超级大陆聚合-裂解与古老深层油气地质条件的关系研究,剖析盆地中深层有机-无机相互作用与油气成藏的相关性。如深部流体对富有机物质形成的影响、富氢流体作用下烃源(烃源岩、储层沥青)再生烃、深部流体对储盖层溶蚀改造、高成熟度条件下的有机质成烃演化、深层油气运聚的动力过程等。

#### 2) 油气勘探走向了“非常规领域”,非常规地质学理念与方法需要及时建立与完善。

石油和天然气是流体,常规的油气在生成后都需要通过运移才能聚集在有利的圈闭中形成油气藏,因此,常规油气地质学研究的核心是“圈闭是否成藏”,重点评价“生、储、盖、运、圈、保”六要素匹配关系。非

常规油气是指用传统技术无法获得自然工业产量、需用新技术改善储层渗透率或流体粘度等才能经济开采、连续或准连续型聚集的油气资源,全球非常规与常规油气资源比例大约8:2<sup>[55]</sup>;非常规油气地质学研究的核心是“储集层是否含油”,重点评价“岩性、物性、脆性、含油性、烃源岩特性、应力各向异性”六性及其匹配关系。非常规油气成藏机制、成藏模式的研究与常规的油气存在较大的差异,中国的油气地质学正向常规油气与非常规油气地质学两个方向并行发展。

页岩油气是中国油气增储上产的重要保证。明确页岩油气的资源潜力,开展多期构造演化控制下的页岩气改造-散失和富集-保存条件研究;开展深部有机-无机相互作用与富有机质页岩的成岩成储机理、地质流体的微观流动机理研究;明确深层页岩气的赋存与富集机理,揭示其主控因素,将为开辟页岩气资源接替阵地提供科学依据。

煤系蕴含多种类型天然气(煤层气、致密砂岩气、页岩气、碳酸盐岩气等)<sup>[10,16]</sup>。煤系气作为中国非常规天然气的重要组成部分,是单纯煤层气资源的3倍以上,远远超过陆地常规天然气总资源量。目前,中国煤层气的探明率只有2.5%,煤系气探明率不足0.5%,发展空间很大(如鄂尔多斯盆地的天然气勘探),提高煤系气探明率和资源动用率,是弥补中国天然气巨大供需缺口进而提高油气保障能力的现实途径。研究煤系气的区域地质背景、源-储组合与共生成藏作用机理,查明煤系气的分布规律及其受控的构造-沉积地质条件,分析深部煤系气储集特征及开发地质条件,为中国煤系气开发提供理论支撑。

#### 3) 常规与非常规油气地质学理念的有机融合是“立体综合勘探”的重要保证。

非常规油气地质学仍处于发展的早期阶段,对一些重大的关键科学问题学术界和工业界仍有较大争议;特别是中国非常规油气发育的地质条件与国外显著不同(时代老、成熟度高、高温、高压、埋藏深度大、后期抬升改造强烈等),国外的经验无法直接指导国内的勘探。

围绕中国石油提出的“年均新增探明石油地质储量 $10 \times 10^8$  t,国内石油产量 $2 \times 10^8$  t以上”的发展目标,油气地质学发展的目标是建立能够“概括和容纳常规油气、非常规油气、深层油气和深水油气新领域”中所遇到地质现象和规律,以定量的动力学研究为方法论的油气动力地质学理论体系;油气勘探则是“全盆地(甚至跳出盆地,如油砂)、深中浅全层系、多类型资源”的全链条整体勘探(图4)。

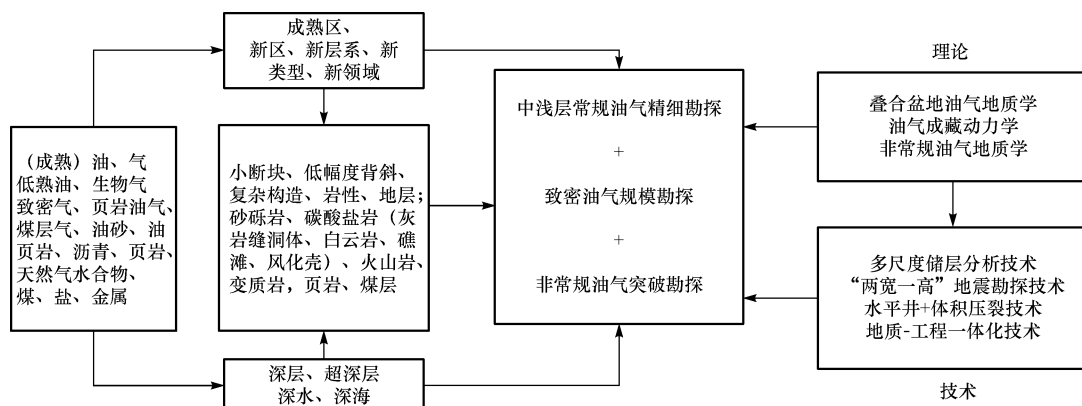


图4 立体综合勘探的理论内涵与技术

Fig. 4 Theoretical connotation of integrated 3D reservoir exploration and technologies employed

### 3.3 油气-金属矿床的共生与综合开采

一些重要的金属元素运移富集和油气藏形成演化紧密相关。现代油气田的原油、天然气和油田卤水中,不同程度地富集了Li, Be, U, Re, Ni, U等战略性金属元素,而在一些金属矿床中也记录了油气活动,说明了油气成藏与金属成矿的空间耦合。目前,在四川、柴达木等一些盆地的油气藏或油田卤水中已发现了相对富集的战略性的金属元素。

煤系中富含一些重要金属元素,煤型关键金属矿床需要引起高度重视。例如:锗,全球已探明的锗储量仅为8 600 t,集中分布在美国和中国,分别占全球储量的45%和41%,俄罗斯占10%;中国精锗的年产量却占到世界总年产量(165t)的73%,大部分来源于褐煤。

开展国内外富含战略性金属元素的相关沉积盆地地质条件的对比分析,明确主要金属元素富集的主控因素,结合深层有机-无机相互作用研究,明确主要金属元素与油气、煤层相互作用的成矿-成藏耦合机制、空间共生的分布规律,建立成矿-成藏耦合的时-空格架及油、气、煤、盐、金属分异、富集的成因模式,开展基于“多种资源同盆共生、分异富集”的立体勘探。

### 3.4 勘探开发新技术

立体综合勘探的实施需要“看得见、摸得着、取得出”的过硬技术。主要是以下3个方面的技术进步推动了常规+非常规的立体勘探开发(图4)。

1) “两宽一高”(宽方位、宽频带、高密度)三维地震勘探技术、低频和高精度可控震源技术的规模化应用,是油气勘探开发中“看得见”的根本保证。如在鄂尔多斯盆地,在北部沙漠区实施“两宽一高”三维地震采集,在南部黄土塬区开展“宽方位、高覆盖、适中面元”三维地震采集技术。

目前,针对立体勘探的主要领域,已逐渐建立并完善了相应技术系列,如复杂山地高陡构造领域(有综合物探近地表建模、复杂山地综合静校正、复杂山地速度建模、叠前时间偏移成像、起伏地表叠前深度偏移、各向异性叠前深度偏移、逆时偏移等技术),海相碳酸盐岩储层领域(有小尺度缝洞型正演模拟、岩石物理建模、碳酸盐岩储层地震特征识别、叠前多参数含油气预测、多波地震联合反演等技术),复杂岩性油气藏领域(有井控处理、基于OVT域的处理、基于敏感属性分析的储层预测与烃类检测、多尺度地震裂缝预测等技术),深层火山岩领域(有重磁电岩性识别、流体替换及AVO正演、叠前属性储层预测和油气检测等技术),低渗透致密油气藏领域(有致密油气岩石物理分析、OVT域处理、叠前弹性参数反演、裂缝综合预测、富集区综合评价等技术),页岩油气领域(有地应力预测、砂泥岩薄互层识别、甜点综合预测、页岩油气工程力学参数地震预测等技术)。

2) 深层、超深层“优快钻井技术”(“摸得着”)。深井、超深井储层埋藏深,压力系统复杂,地质和工程必封点多,井身结构复杂。近年来,通过钻机装备升级,井身结构优化,垂直钻井、控压钻井、钻井液、固井等关键技术应用,推动了深层、超深井钻探的成功实施,不断刷新钻井记录。截至2019年10月,中国石油共完钻45口7 500 m以上超深井、7口8 000 m以上超深井,塔里木盆地轮探1井井深8 882 m,成为亚洲第一深井。

3) 致密油、页岩油气开发的“水平井+体积压裂”技术(“取得出”)。勘探领域的不断拓展使得勘探对象复杂多样,如深层、超深层(温度、压力高)、碳酸盐岩、复杂岩性与非常规等领域,具有岩性复杂、埋藏深、渗透率低、薄互层等特征,强化储层针对性改造成为勘探开发关键。

非常规油气水平井钻井技术已经较为成熟。通过技术攻关和实践,形成了适合不同区域(松辽页岩油、川渝页岩气、玛湖致密油、长庆致密油气、页岩油等)的水平井钻、完井主体技术。水平段长度不断增加。中国致密气、致密油、页岩油水平段长度均迈上3 000 m台阶。2019年长庆陇东华H50-7井水平段长度达到4 088 m,刷新了国内致密油最长水平段记录。

已逐步形成了地质-工程一体化的水平井多段、大规模、大液量能量补充为核心的页岩油气开发新模式。地质-工程一体化设计方法将地质甜点与工程甜点有机结合,大排量低粘滑溜水形成复杂缝网是页岩气体积改造的关键;水平井密切割、缩短簇间距是缝控压裂提高储量动用率的技术核心。地质-工程一体化平台是建立研究方法、提升复杂勘探对象改造效果的重要手段。包括:一体化评价平台(地质评价、甜点评价、力学评价、完井品质评价)、一体化设计平台(地质模型、油藏模型、裂缝模型、经济模型)、一体化共享平台(实验结果共享、优化方案共享、施工设计共享)与一体化分析平台(压后跟踪、措施评判、效果评价、模型修正)。

通过个性化设计、精细压裂不断提升探井改造效果。改造储层,提高单井产量,增加储量;发现含油气储层,认识资源,拓展新领域,为勘探发现和储量升级做出贡献。

## 4 结论

1) 中国的沉积盆地经历了多旋回的构造-沉积演化过程,具有多构造层叠置结构,油气多层系规模聚集。

2) 中国沉积盆地矿产资源丰富,有常规油气、低熟油、生物气、致密气、页岩油、气、煤、煤层气、盐类、天然气水合物和金属等多种类型,资源潜力大。

3) 中国油气勘探历史悠久,经历了构造油气藏、岩性-地层油气藏勘探阶段,现今进入常规与非常规油气并举的“立体综合勘探”阶段。

4) 中国沉积盆地的立体综合勘探是针对“全盆地(甚至跨出盆地,如油砂)、深中浅多层系、多尺度储集体、多类型资源”的全链条式整体勘探,钻探进入万米尺度,海域进入深水区。

5) 立体综合勘探思维与方法是成熟区精细勘探,新区、新层系、新类型、新领域突破勘探,常规与非常规油气一体化高效勘探的重要保证。

致谢:本文参考了自然资源部地矿局、中国石油、中国石化、中海油、延长油田等单位的勘探研究报告,在写作过程中,得到张国伟、许志琴、戴金星、贾承造、

马永生、赵文智、邓运华、邹才能、郭旭升等院士的指导与帮助,在与蔡勋育、张义杰、张健、刘树根、陈洪德、刘波、高山林、王瑜等教授的交流过程中,受益匪浅,在此谨致谢忱。

## 参考文献

- [1] 孙健初. 祁连山一带地质史纲要[J]. 地质论评, 1942, 7(21): 17-25.  
Sun Jianchu. The outline of geological history in the area of Qilian Mountains, China[J]. Geological Review, 1942, 7(21): 17-25.
- [2] Pan C H. Nonmarine origin of petroleum in north Shensi, and the Cretaceous of Szechuan, China [J]. AAPG Bulletin, 1941, 25(11): 2058-2068.
- [3] 侯德封. 关于陆相沉积盆地石油地质的一些问题[J]. 地质科学, 1959(8): 225-227.  
Hou Defeng. Some problems on petroleum geology in continental sedimentary basins [J]. Chinese Journal of Geology, 1959(8): 225-227.
- [4] 田在艺, 石宝珩. 中国地壳构造发展与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.  
Tian Zaiyi, Shi Baoheng. The development of the crustal structure and the distribution of oil and gas in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [5] 胡朝元. 生油区控制油气田分布: 中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982(2): 9-13.  
Hu Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, east China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1982(2): 9-13.
- [6] 胡朝元. “源控论”适用范围量化分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 1-3.  
Hu Chaoyuan. Research on the appliance extent of “source control theory” by semi-quantitative statistics characteristics of oil and gas migration distance [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(10): 1-3.
- [7] 李德生. 中国含油气盆地的构造类型[J]. 石油学报, 1982, 3(3): 5-16.  
Li Desheng. Tectonic types of oil and gas basins in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1982, 3(3): 5-16.
- [8] 黄第藩, 李晋超, 周翥虹, 等. 陆相有机质演化和成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.  
Huang Difan, Li Jinchao, Zhou Zhuhong, et al. Evolution and mechanism of hydrocarbon generation of terrestrial organic matter [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [9] 胡见义, 黄第藩. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.  
Hu Jianyi, Huang Difan. Theoretical basis of continental petroleum geology in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [10] 戴金星. 成煤作用中形成的天然气和石油[J]. 石油勘探与开发, 1979, 6(3): 10-17.  
Dai Jinxing. Oil and gas in the process of coal measures formation [J]. Petroleum Exploration and Development, 1979, 6(3): 10-17.
- [11] 李德生. 渤海湾盆地复合油气田的开发前景[J]. 石油学报, 1986, 7(1): 1-21.  
Li Desheng. Prospect of the composite megastructural oil and gas field in Bohai Gulf of China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 1-21.

- [12] 张文昭. 中国陆相大油田[M]. 北京:石油工业出版社,1997.  
Zhang Wenzhao. Major nonmarine oil fields of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1997.
- [13] 裴泽楠,薛叔浩,应凤祥. 中国陆相油气储集层[M]. 北京:石油工业出版社,1997.  
Qiu Yinan, Xue Shuhao, Ying Fengxiang. Continental hydrocarbon reservoirs of China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1997.
- [14] 于英太. 从华北油田的实践看隐蔽油气藏勘探前景[J]. 石油科技论坛,2003,12(6):34-41.  
Yu Yingtai. The exploration prospect of subtle oil and gas reservoirs from the practice of Huabei Oilfield [J]. Oil Forum,2003,12(6):34-41.
- [15] 贾承造,邹才能,杨智,等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):1-15.  
Jia Chengzao, Zou Caineng, Yang Zhi, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of Central and Western China[J]. Petroleum Exploration and Development,2018,45(4):1-15.
- [16] 戴金星,王庭斌,宋岩,等. 中国大中型天然气田形成条件与分布规律[M]. 北京:地质出版社,1997:81-100.  
Dai Jinxing, Wang Tingbin, Song Yan, et al. The distribution and formation condition of large and medium-sized gas field in China[M]. Beijing: Geological Publishing House,1997:81-100.
- [17] 马永生,郭旭升,郭彤楼,等. 四川盆地普光大型气田的发现与勘探启示[J]. 地质论评,2005,51(4):477-480.  
Ma Yongsheng, Guo Xusheng, Guo Tonglou, et al. Discovery of the large-scale Puguang gas field in the Sichuan Basin and its enlightenment for hydrocarbon prospecting [J]. Geological Review,2005,51(4):477-480.
- [18] 郭旭升,郭彤楼,黄仁春,等. 中国海相油气田勘探实例之十六:四川盆地元坝大气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质,2014,19(4):57-64.  
Guo Xusheng, Guo Tonglou, Huang Renchun, et al. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (Part 16): Yuanba Gas Field in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology,2014,19(4):57-64.
- [19] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.  
Jia Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geology theory[J]. Petroleum Exploration and Development,2017,44(1):1-11.
- [20] 赵文智,张光亚,王红军,等. 中国叠合含油气盆地石油地质基本特征与研究方法[J]. 石油勘探与开发,2003,30(2):1-8.  
Zhao Wenzhi, Zhang Guangya, Wang Hongjun, et al. Basic features of petroleum geology in the superimposed petroliferous basins of China and their research methodologies[J]. Petroleum Exploration and Development,2003,30(2):1-8.
- [21] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.  
Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development,2013,40(6):641-649.
- [22] 邹才能,陶士振,侯连华,等. 非常规油气地质学[M]. 北京:地质出版社,2014.  
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House,2014.
- [23] 马永生,蔡勋育,赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发,2018,45(4):561-574.  
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development,2018,45(4):561-574.
- [24] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国工程科学,2009,11(8):29-37.  
Hu Wenrui. The present and future of low permeability oil and gas in China[J]. Engineering Sciences,2009,11(8):29-37.
- [25] 杜金虎,邹才能,徐春春,等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发,2014,41(3):268-277.  
Du Jinhu, Zou Caineng, Xu Chunhui, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2014,41(3):268-277.
- [26] 邱中建,龚再升. 中国油气勘探[M]. 北京:石油工业出版社,1999.  
Qiu Zhongjian, Gong Zaisheng. Oil and gas exploration in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,1999.
- [27] 邱中建,邓松涛. 中国油气勘探的新思维[J]. 石油学报,2012,33(S1):1-5.  
Qiu Zhongjian, Deng Songtao. New thinking of oil-gas exploration in China[J]. Acta Petroli Sinica,2012,33(S1):1-5.
- [28] 翟光明. 关于非常规油气资源勘探开发的几点思考[J]. 天然气工业,2008,28(12):1-3.  
Zhai Guangming. Speculations on the exploration and development of unconventional hydrocarbon resources [J]. Natural Gas Industry,2008,28(12):1-3.
- [29] 赵文智,胡素云,侯连华,等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发,2020,47(1):1-10.  
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development,2020,47(1):1-10.
- [30] 何登发,李德生,童晓光. 中国多旋回叠合盆地立体勘探论[J]. 石油学报,2010,31(5):695-709.  
He Dengfa, Li Desheng, Tong Xiaoguang. Stereoscopic exploration model for multi-cycle superimposed basins in China [J]. Acta Petroli Sinica,2010,31(5):695-709.
- [31] Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: from the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. Earth Science Reviews,2018,186:262-286.
- [32] 李四光. 从大地构造看中国石油资源勘探的远景[J]. 石油地质,1955,16:1-40.  
Li Siguang. Exploration prospects of China's oil resources according to the tectonics[J]. Petroleum Geology,1955,16:1-40.
- [33] 任纪舜. 中国大地构造及其演化[M]. 北京:科学出版社,1980.  
Ren Jishun. Geotectonics and its evolution in China[M]. Beijing: Science Press,1980.
- [34] 翟光明,宋建国,靳久强,等. 板块构造演化与含油气盆地形成和评价[M]. 北京:石油工业出版社,2002.  
Zhai Guangming, Song Jianguo, Jin Jiuchang, et al. Plate tectonic evolution and formation and evaluation of oil and gas bearing basins

- [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [35] 万天丰. 中国大地构造学[M]. 北京: 地质出版社, 2011.  
Wan Tianfeng. The tectonics of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [36] 张伯声. 中国地壳的波浪状镶嵌构造[M]. 北京: 科学出版社, 1980.  
Zhang Bosheng. Wavy mosaic structure of China's crust [M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [37] 朱夏. 中国东部板块内部盆地形成机制的初步探讨[J]. 石油实验地质, 1979(1): 1-9.  
Zhu Xia. Preliminary study on the mechanism of basin formation in the eastern part of China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 1979(1): 1-9.
- [38] 朱夏. 中国中生代盆地构造和演化[M]. 北京: 科学出版社, 1983.  
Zhu Xia. Mesozoic Cenozoic basin structure and evolution in China [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [39] 关士聪, 演怀玉, 陈显群. 1984. 中国海陆变迁海域沉积相与油气: 晚元古代-三叠纪[M]. 北京: 科学出版社.  
Guan S C, Yan H Y, Chen X Q. 1984. Land and sea shift, marine facies, oil and gas in China [M]. Beijing: Science Press.
- [40] 何登发, 贾承造, 童晓光, 等. 叠合盆地概念辨析[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(1): 1-7.  
He Dengfa, Jia Chengzao, Tong Xiaoguang, et al. Discussion and analysis of superimposed sedimentary basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(1): 1-7.
- [41] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 64-77.  
He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(1): 64-77.
- [42] 童晓光, 梁狄刚. 塔里木盆地油气勘探论文集[C]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1992: 17-22.  
Tong Xiaoguang, Liang Digang. Petroleum exploration symposium of Tarim Basin [C]. Urumchi: Xinjiang science and Technology Press, 1992: 17-22.
- [43] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.  
Jia Chengzao. Structural characteristics and petroleum of Tarim Basin, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [44] 何登发, 马永生, 蔡勋育, 等. 2017. 中国西部海相盆地地质结构控制油气分布的比较研究[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1037-1057.  
He Dengfa, Ma Yongsheng, Cai Xunyu, et al. Comparison study on controls of geologic structural framework upon hydrocarbon distribution of marine basins in western China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1037-1057.
- [45] 汪泽成, 赵文智, 张林, 等. 四川盆地构造层序与天然气勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2002.  
Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Zhang Lin, et al. Tectonic sequence and natural gas exploration in Sichuan Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [46] 金之钧, 张明利, 汤良杰, 等. 柴达木中生代盆地演化及其控油气作用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6): 603-608.  
Jin Zhijun, Zhang Mingli, Tang Liangjie, et al. Evolution of Meso-Cenozoic Qaidam basin and its control on oil and gas [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 603-608.
- [47] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 511-520.  
Liu Shugen, Sun Wei, Luo Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(5): 511-520.
- [48] 沈安江, 陈娅娜, 张建勇, 等. 中国古老小克拉通台内裂陷特征及石油地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 15-25.  
Shen Anjiang, Chen Yana, Zhang Jianyong, et al. Characteristics of intra-platform rift in ancient small-scale cratonic platform of China and its implications for hydrocarbon exploration [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 15-25.
- [49] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 615-623.  
Zhu Rukai, Bai Bin, Cui Jingwei, et al. Research advances of microstructure in unconventional tight oil and gas reservoirs [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 615-623.
- [50] 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 乐山-龙女寺古隆起震旦系一下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 1-7.  
Xu Chunchun, Shen Ping, Yang Yueming, et al. Accumulation conditions and enrichment patterns of natural gas in the Lower Cambrian Longwangmiao Fm reservoirs of the Leshan-Longnitsi Paleohigh, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 1-7.
- [51] Hao F, Zou H Y, Lu Y C. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1325-1346.
- [52] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002, 1-228.  
Yang Junjie. Tectonic Evolution and Oil and Gas Distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002, 1-228.
- [53] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 295-303.  
Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshen, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 295-303.
- [54] 付金华, 邓秀芹, 张晓磊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂岩与致密油的关系[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 624-634.  
Fu J H, Deng X Q, Zhang X L, et al. 2013. Relationship between deepwater sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 624-634.
- [55] 童晓光, 张光亚, 王兆明, 等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 1-10.  
Tong Xiaoguang, Zhang Guangya, Wang Zhaoming, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 1-10.