

北美海相页岩油形成条件、富集特征与启示

黎茂稳¹, 马晓潇^{1,2}, 蒋启贵¹, 李志明¹, 庞雄奇², 张采彤²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249)

摘要:北美海相页岩油气的成功开发为将中国陆相页岩油巨大资源潜力转化为现实产量带来了希望。目前全球范围内对页岩油的研究与探索尚处于起步阶段,对能否在页岩中实现原油规模化开采还没有达成共识。北美海相层系页岩油勘探开发实践表明,稳定宽缓的构造环境是形成页岩油的有利背景,大面积分布的优质烃源岩是页岩油形成的资源基础,区域性致密顶底板控制页岩油的远景区分布,烃源岩热演化程度控制页岩油核心区分布,而地质和工程“甜点”控制页岩油的规模富集和高产稳产。与北美相比,中国地质构造演化稳定性较差,沉积盆地类型多、分割性和后期活动性强,发育淡水湖泊、混积湖泊与咸化湖泊等多种沉积体系,相变快、岩性复杂、储盖组合多样。烃源岩层系的非均质性、成岩改造作用、裂缝发育程度及其与致密顶底板的配置关系,控制中国陆相页岩油“甜点”分布规律和富集高产能力。正确认识陆相页岩油资源潜力、找准页岩油富集的有利核心区、发展适应性高产稳产工程技术,是中国陆相页岩油取得突破的关键。

关键词:陆相页岩油;海相页岩油;石油地质特征;“甜点”分布规律;富集高产要素;发展战略

中图分类号:TE121

文献标识码:A

Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America

LI Maowen¹, MA Xiaoxiao^{1,2}, JIANG Qigui¹, LI Zhiming¹, PANG Xiongqi², ZHANG Caitong²

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Shale Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: The successful development of marine shale oil and gas in North America brings great hope to the production of lacustrine shale oil in China with great potential. At present, the research and exploration of shale oil in the world is still in its infancy, and there is no consensus on the commercial production of crude oil from the shale. Practice of marine shale oil exploration and production in North America indicates that the stable and gentle tectonic setting is favorable for the enrichment of shale oil, the large-area distribution of high-quality organic rich source rocks is the resource basis for shale oil formation, the tight top/bottom formations control the distribution of shale oil prospect area, the thermal evolution of source rocks controls the distribution of shale oil core areas, while geological and engineering “sweet spots” control the large-scale enrichment and stable production of shale oil. In contrast to the North American shale basins, Chinese lacustrine shale plays develop in less stable and relatively tectonically active basins. These sedimentary basins have many types being characterized by strong segmentation and strong activity. Additionally, there are many sedimentary systems such as freshwater, brackish and saline lakes, with significant variation in lithology and sedimentary facies both laterally and vertically, and with diverse reservoir-caprock association. The heterogeneity in the deposition, diagenesis and fracture development in both shale reservoir and its top and bottom seals determine the “sweet spots” and ultimate recoverable oil resources in the shale reservoir. Road map for the large scale development of shale oil resources in China includes three important points, a

收稿日期:2018-10-09。

作者简介:黎茂稳(1962—),男,湖北宜城人,教授,博士,从事石油地质方面的研究。联系电话:(010)82312932, E-mail:limw.syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“中国典型盆地陆相页岩油勘探开发选区与目标评价”(2017ZX05049-001),中国石油化工集团公司油气藏重点实验室开放基金“富有机质页岩形成地质模式研究”(33550007-17-ZC0613-0041)。

clear understanding of shale oil resource potential, an accurate estimation of core areas for shale oil enrichment, and a development of high adaptive and stable technology for shale oil production.

Key words: lacustrine shale oil; marine shale oil; petroleum geology; “sweet spots” distribution; key factors for high production; development strategy

2000年以来,美国在海相地层的页岩气大规模开发带来了全球油气工业的新一轮技术革命。由于天然气产量大幅增长、价格大幅下降,自2005年以来,美国海相页岩油和致密油勘探开发取得一系列重大突破,并改变了世界能源格局^[1]。2017年美国的页岩油和致密油产量达到了 16.2×10^8 bbl,占其石油总产量的47.6%^[2]。美国页岩革命的成功使其油气自给率大幅度提高,石油消费对外依存度降低到10%。

2010年以来,中国在多个盆地开展了陆相页岩油勘探开发的探索^[3-5]。中国陆相沉积盆地构造和沉积演化的多样性和复杂性对陆相页岩油富集和勘探理论提出了挑战,迫切需要明确什么条件控制陆相页岩油的规模富集,与北美海相页岩油形成条件相比具有什么特殊性。因此,分析北美海相页岩油形成条件与富集特征,借鉴北美页岩油气发展经验,形成中国陆相页岩油发展技术路线图,有力推动陆相页岩油形成机制和富集规律基础研究、核心区评价和产能试验区建设,是实现中国页岩油有效勘探开发的基本前提。

1 基本概念

1.1 页岩的概念

页岩是指由粒径小于0.062 5 mm的碎屑颗粒、黏土和有机质等组成,具有页状和薄片状层理,易碎裂的细粒沉积岩^[6]。页岩在自然界中分布广泛,约占沉积岩体积的55%。页岩类型主要包括黑色页岩、炭质页岩、硅质页岩、钙质页岩、铁质页岩等。页岩和粉砂岩中碎屑颗粒的粒径按定义都小于0.062 5 mm,二者的区别在于是否发育纹层和页理,以及二者所对应的矿物化学组成差异。富有机质页岩包括黑色页岩、炭质页岩等,一般富含有机质与细粒分散状黄铁矿和菱铁矿等,有机质含量一般在1%以上。需要指出的是,碎屑颗粒包括石英、长石、碳酸盐矿物、黄铁矿等,黏土矿物包括伊利石、绿泥石、高岭石、蒙脱石、水云母等。碎屑颗粒和黏土矿物含量不同导致页岩性质差异明显。同时,不同粒级和来源的陆源碎屑、火山碎屑和内源矿物混积,会进一步造成页岩和富有机质页岩系统的多样

性和复杂性。

1.2 页岩油的概念

关于“页岩油”的概念中外文献中并没有严格的定义,各种表述的差异较大,尚未形成统一的界定规范和普遍认同的概念^[1]。

DONOVAN等^[7]按渗透率、生烃潜力和裂缝体系存在与否,将油气储层划分为正常渗透率常规储层、致密储层、烃源岩储层和裂缝性烃源岩储层4种类型。同时,根据储集烃类流体的黏度,又将这4类储层划分为多个亚类(图1)。

国外许多文献中页岩油与致密油的概念基本混用,通指隐藏在孔隙度和渗透率非常低、需要采取特殊开采工艺的致密储层(页岩、砂岩、碳酸盐岩等)中的石油资源,通常强调其储层覆压渗透率小于0.1 mD、油质轻与特殊开采工艺等特点。

本文所述“页岩油”是指富有机质泥页岩层系中已经形成的,以游离、与干酪根互溶或吸附方式赋存于泥页岩基质孔隙、微裂缝及非烃源岩薄夹层中的石油资源,不一定有自然产能,需要通过非常规技术才能实现规模经济开采。

这个定义与DONOVAN等^[7]定义中“广义页岩油”基本对应,强调“页岩油”储层页理发育、自生自储、原地或近源成藏为主、在成熟富有机质泥页岩区大面积连续分布、局部富集,是常规油气资源评价和储量评估没有涉及的资源领域。页岩油既包括具有生烃潜力的烃源岩储层,又包括裂缝性烃源岩储层,烃源岩内部油气未经运移或者仅有局部的短距离迁移。

页岩油与页岩气的概念相对应,强调页岩储层具有生烃潜力、源储一体。与此不同,致密油概念与致密气相对应,强调来自烃源岩之外致密储层中的石油资源,油气通过初次或短距离二次运移聚集,致密储层与烃源岩紧密接触,发育源上、源下和源内3种源储关系。

参照页岩气地质评价方法^[6]对页岩气生产目的层的界定,在实际操作中页岩油夹层界定为:单层厚度不超过1 m、累积厚度不超过烃源岩层系总厚度20%的非烃源岩夹层。而单层厚度大于1 m、累积厚度超过烃源岩层系总厚度20%的非烃源岩夹层则属于源内致密油储层的范畴。

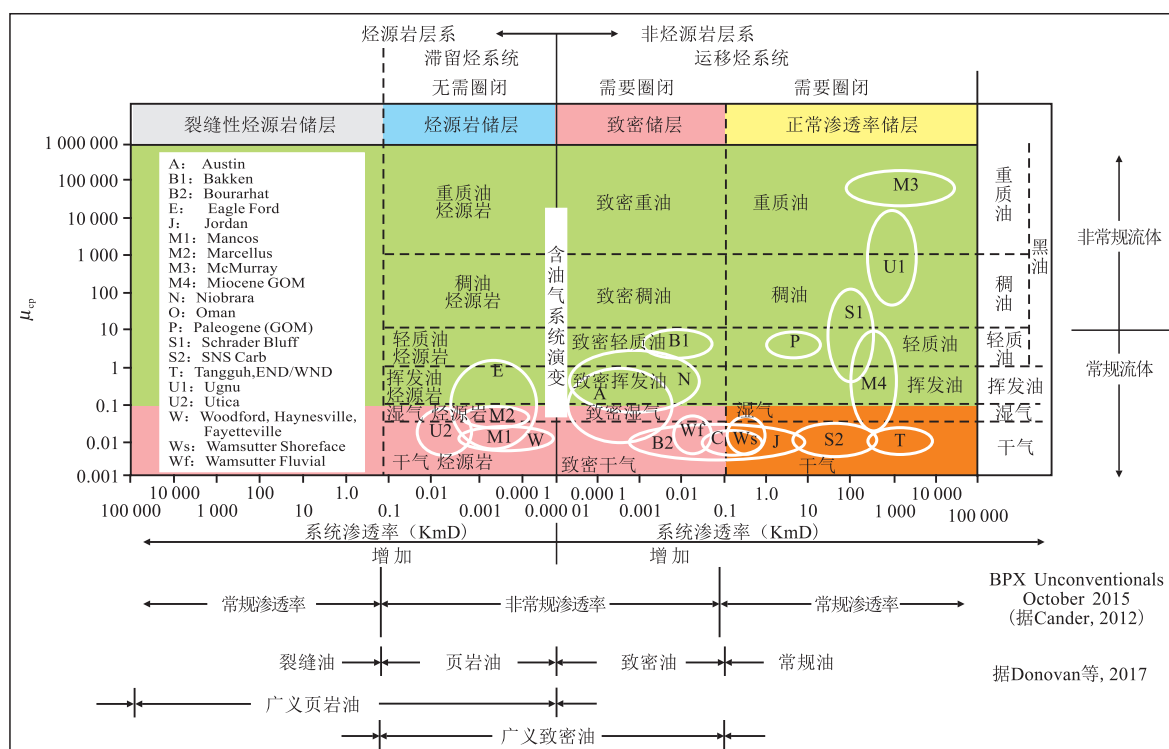
图1 DONOVAN等^[7]对油气储层的定义

Fig.1 Definition of petroleum reservoirs (DONOVAN et al^[7])

2 北美页岩油形成条件与富集特征

北美海相页岩油勘探开发实践结果表明,稳定宽缓的构造背景、大面积分布的优质烃源岩、大面积分布的致密顶底板、合适的热演化程度、地质和工程“甜点”控制页岩油的规模富集^[8-12]。

2.1 稳定宽缓的构造背景是形成页岩油的前提条件

页岩油形成需要具备大面积分布的优质烃源岩和稳定分布的直接区域盖层。稳定宽缓的构造背景有利于优质烃源岩和区域盖层发育,因此构造相对稳定的生烃凹陷-斜坡沉积背景是形成页岩油的前提条件。事实上,烃源岩层无一例外地存在于世界上所有的含油气区,即海相克拉通盆地、前陆盆地、陆相断陷盆地和凹陷盆地。虽然不同类型沉积盆地烃源岩发育和展布特征有所差异,但共同特点是要求沉积体系具有稳定的构造背景,充足的营养物质供给有利于原地生物繁盛、安静的水体环境有利于沉积有机质保存、适宜的沉积速率有利于有机质富集^[13]。

美国已有规模商业发现的页岩气区带主要分布在以阿巴拉契亚盆地为代表的东部早古生代前陆盆地带^[14]、以福特沃斯盆地为代表的南部晚古生

代前陆盆地带^[15-17]、以圣胡安盆地为代表的西部中生代前陆盆地带^[18]和以密执安盆地和伊利诺斯盆地为代表的古生代—中生代克拉通盆地带^[19](图2)。前陆盆地主要位于被动大陆边缘且后期演化为褶皱带区域,克拉通盆地处于稳定地台之上,沉积了寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、密西西比系(下石炭统)和宾夕法尼亚系(上石炭统)富含有机质的黑色页岩,往往具备页岩气发育的良好地质条件。美国页岩气地质资源量和可采资源量主要来源于前陆盆地,其次为克拉通盆地^[20]。

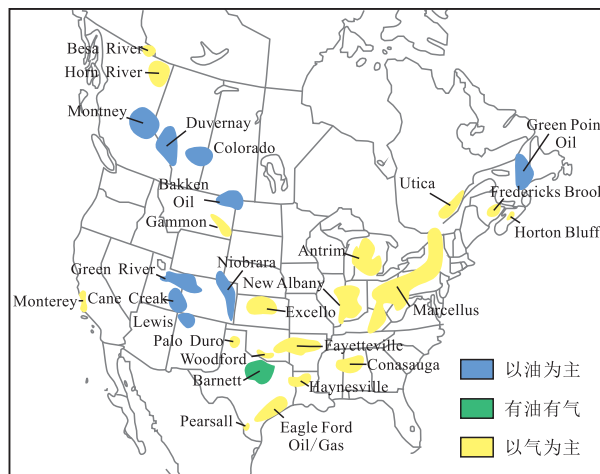


图2 北美具有页岩油气资源潜力的沉积盆地分布

Fig.2 Sedimentary basins with shale oil potentials
in North America

美国已经投入大规模商业开发的页岩油区带与页岩气区带具有相似的构造和沉积背景,但烃源岩热演化程度较低,目前处于大量生油至轻质油-凝析油气阶段。据美国能源信息署资料^[2],美国页岩油主要产自威利斯顿盆地巴肯(Bakken)区带、墨西哥湾盆地西部鹰滩(Eagle Ford)区带、二叠盆地伯恩斯普林(Bone Spring)和沃夫坎(Wolfcamp)等区带、阿纳达科(Anadarko)盆地伍德福(Woodford)区带、丹佛盆地奈厄布拉勒(Niobrara)区带、阿巴拉契亚盆地马塞勒斯(Marcellus)区带以及沃斯堡盆地巴奈特(Barnett)区带(图2)。其中二叠盆地、鹰滩和巴肯区带是美国目前三大主力产区。

加拿大目前已获得商业突破的页岩油区带主要分布在西加拿大盆地,其形成的构造和沉积背景与美国西部落基山脉以东的古生代克拉通盆地和中生代前陆盆地相似。主要页岩油区带包括上泥盆统 Duvernay 组页岩、侏罗系 Nordeg 组页岩等^[21]。

2.2 大面积分布的优质烃源岩是页岩油形成的资源基础

优质烃源岩的发育是形成规模页岩油的主要条件。美国海相沉积盆地发育多种类型烃源岩,主要形成于深水沉积环境,有利于形成富有机质的黑

色页岩^[22]。

阿巴拉契亚盆地发育多套富有机质黑色页岩^[14](图3)。其中,中泥盆统马塞勒斯页岩分布面积为 114 000 km²,资源潜力最大。这些页岩发育于 Avalon 微大陆与北美大陆碰撞挤压形成的前陆盆地浅海沉积环境,由老到新地层向克拉通超覆并且逐渐减薄,马塞勒斯页岩的厚度从造山带前缘大于 200 m 减薄到克拉通边缘 10 m 以下,总有机碳含量(TOC)从低于 1% 增加到 15% 左右。这些黑色页岩的形成时间及其与不整合面对应关系、同时异相的生物礁体高度、底栖藻类化石证据以及交错层理等沉积构造特征,均指示其主要沉积于水深小于 50 m 浅水地区的季节性和间歇性缺氧或贫氧环境^[23]。

威利斯顿盆地面积为 340 000 km²,上泥盆统一下石炭统巴肯组纵向上划分为 8 个岩性段,发育上巴肯段和下巴肯段 2 套黑色页岩(图4),优质烃源岩全盆范围广泛分布^[24]。上、下巴肯段页岩厚度都为 5~12 m,这些黑色纹层状泥页岩形成于海相深水缺氧环境,TOC 值高达 10%~14%,氢指数(HI)最高为 900 mg/g TOC,生烃潜力巨大。巴肯组中部以泥质粉砂岩、生物碎屑砂岩和钙质粉砂岩为主。致密油/页岩油产层面积大于 70 000 km²。

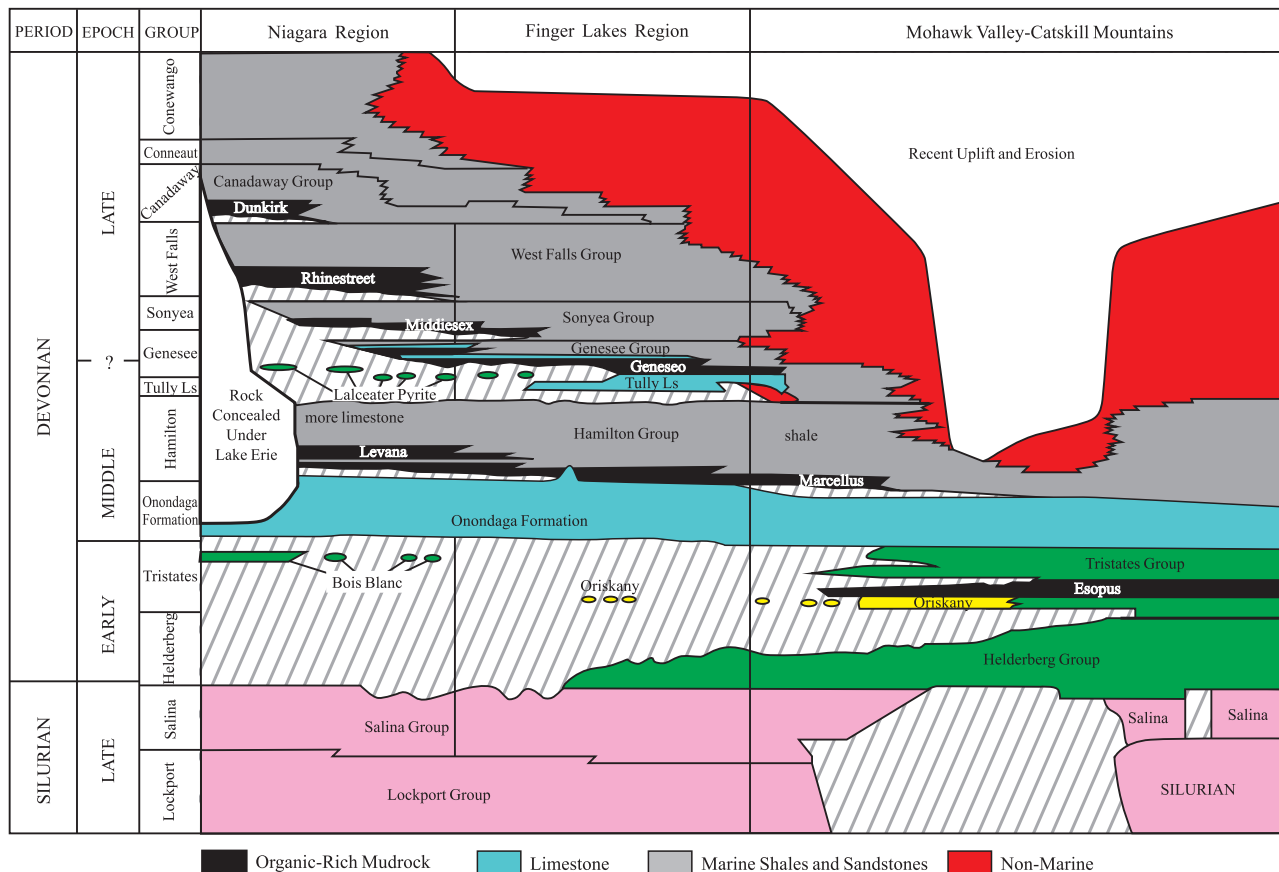


图3 阿巴拉契亚盆地上志留统一泥盆系地层分布(根据纽约州地质剖面图编修)

Fig.3 Upper Silurian-Devonian stratigraphy of the Appalachian Basin(modified from New York State Geological Cross Section)

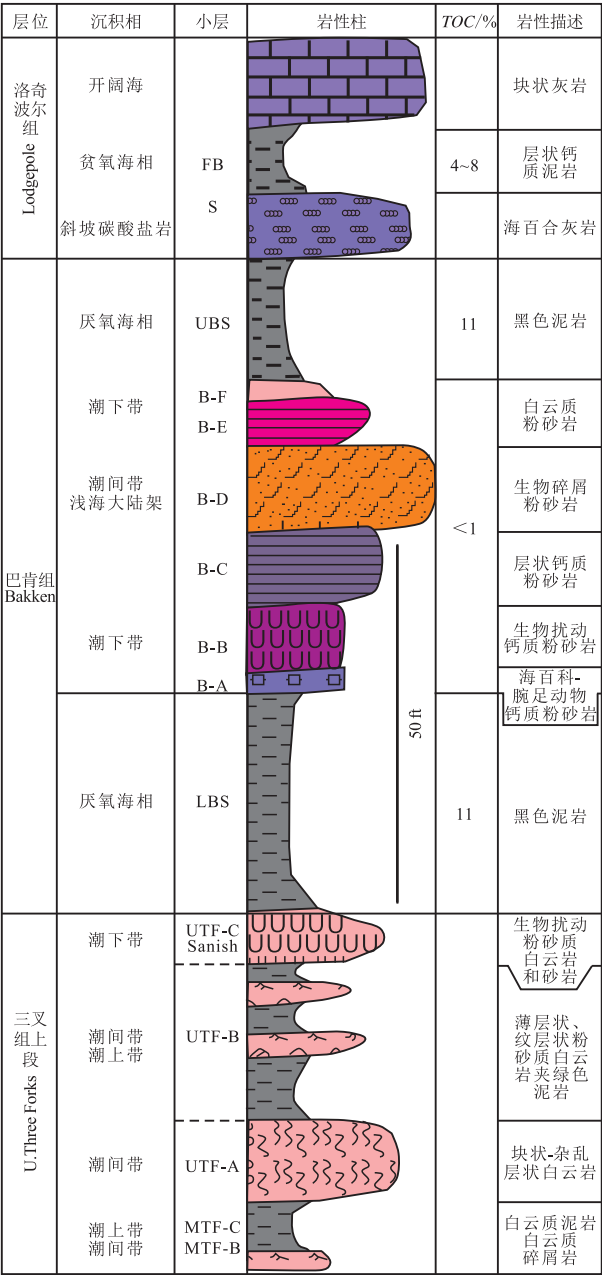


图4 威利斯顿盆地上泥盆统一下石炭统巴肯组页岩及其致密顶底板地层柱状图

Fig.4 Stratigraphic column of shale and its top-bottom seals of Upper Devonian-Lower Carboniferous Bakan Formation in Williston Basin

位于墨西哥湾盆地西北部的鹰滩组在德克萨斯州西部陆上分布面积为30 000 km²。受沉积时古地貌的控制,鹰滩组总厚度变化范围从几米到一百多米不等,在页岩油开发区主要厚度为90~120 m^[25]。鹰滩组分为5个岩层单元,从底部向上依次为动荡水体条件下的风暴岩(A)、下鹰滩页岩段(B、C)和上鹰滩页岩段(D、E),下鹰滩页岩段是目前页岩油气的主要目的层,顶底板分别为Austin灰岩和Buda灰岩(图5)。其中,下鹰滩页岩段形成于海侵环境,又分为B和C亚段。B亚段发育富含有机质黑色页岩,TOC值为2%~8%,平均值为5%;而C亚段为高自然伽马、发育斑脱岩夹层的黑色页岩。上鹰滩页岩段形成于海退环境,生物扰动较为活跃,TOC值为2%左右^[26-27],由富含碳酸盐岩夹层页岩亚段(D)和富含黏土矿物页岩亚段(E)构成。

位于德克萨斯州西部和新墨西哥州东南部的二叠盆地面积约为174 000 km²,从寒武系到白垩系都有烃源岩和油气发现,发育多套页岩油层系(图6),每套层系的厚度都在300 m以上,是典型的超级盆地,目前发现的油气资源大部分来自于古生界^[28]。二叠盆地为叠合盆地,盆地演化过程中主要经历了前寒武纪裂谷、寒武纪-密西西比纪被动陆缘和宾夕法尼亚纪前陆等3个原型盆地演化阶段,盆地在中新生代进入后前陆期的克拉通沉降阶段,现今构造形态主要形成于二叠纪^[29]。二叠系地层厚度最大,一般约为2 500 m,是盆地最主要的产层,且发育多套烃源岩。其中,沃夫坎组是盆地最重要的烃源岩层^[30]。由于差异构造演化,沃夫坎组沉积早晚2期形成了上粗下细的沉积旋回。沃夫坎组沉积早期构造强度大,中央台地快速隆升,两侧次盆发生差异沉降;Delaware盆地沉降速率较高,可容纳空间增大,在深盆区沉积了厚层泥页岩;而Midland盆地沉降速率较低,沉积了较薄的泥页岩;在盆地周缘陆架区和中央台地区发育碳酸盐岩台地相沉

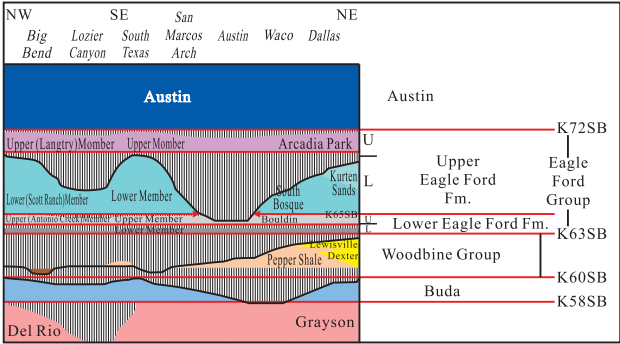


图5 墨西哥湾盆地西北部鹰滩组页岩及其顶底板地层柱状图^[7]

Fig.5 Stratigraphic column of shale and its top-bottom seals of Eagle Ford Group in the northwestern Gulf of Mexico Basin^[7]

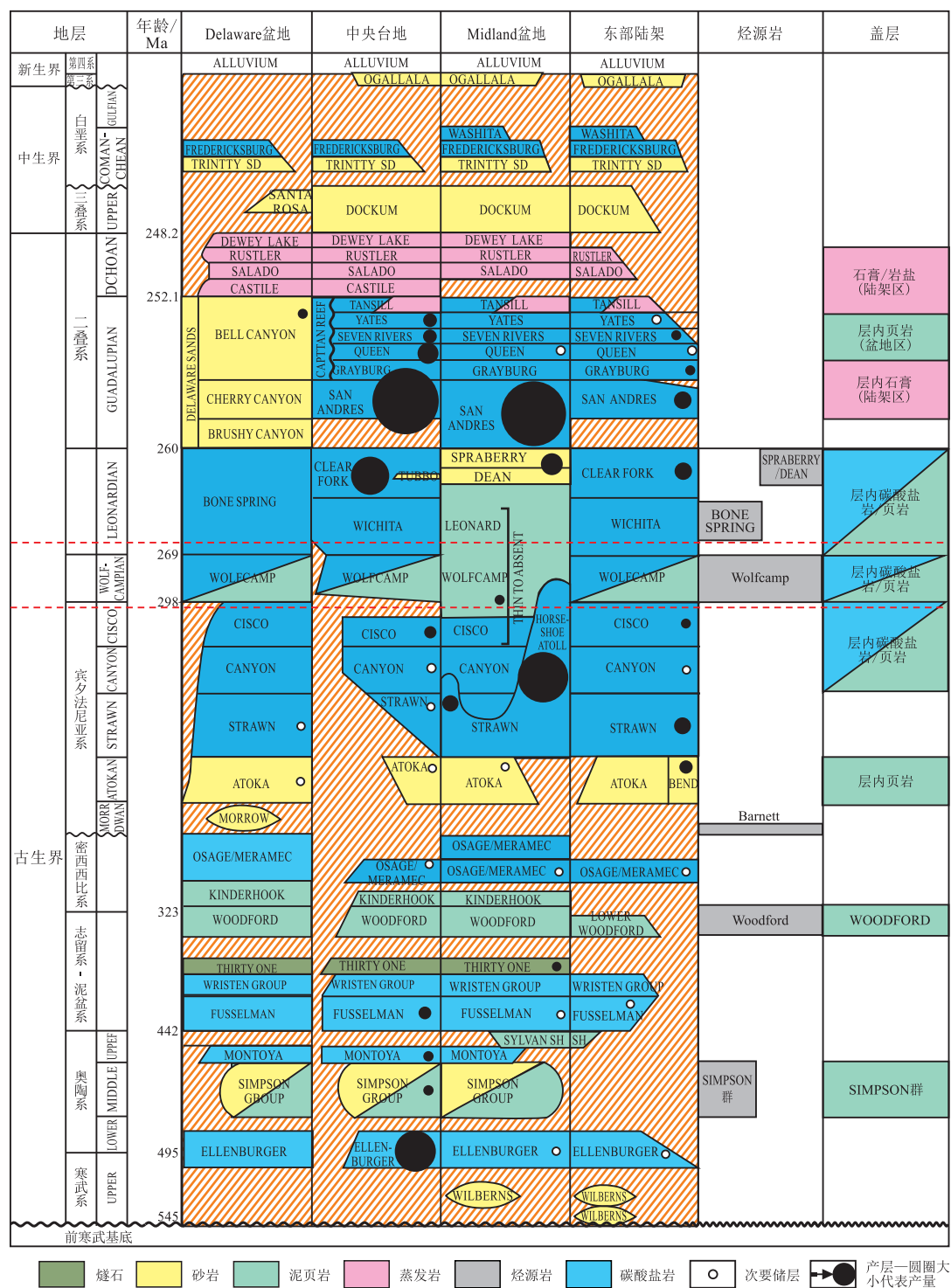


图6 二叠盆地地层综合柱状图及其主要生储盖组合

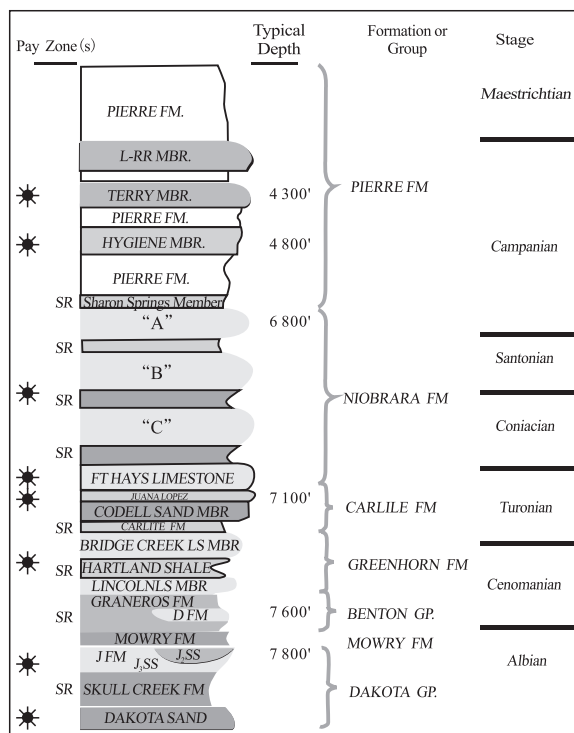
Fig.6 Stratigraphic column of Permian Basin and its major source-reservoir-caprock association

积。沃夫坎组沉积晚期沉降速率仍然较高,但构造运动开始减弱,盆地可容纳空间减小,盆地中心泥页岩沉积范围和厚度不断减小,而周缘和中央台地区碳酸盐岩台地相沉积作用以加积为主,碳酸盐岩台地斜坡快速抬升,形成陡坡,有利于各种重力流沉积直接覆盖于泥页岩沉积之上,形成泥页岩和碳酸盐岩互层沉积。同时,在Midland盆地东北部陆

架地区由于陆源碎屑的输入,在局部地区形成泥岩和碎屑岩互层沉积。沃夫坎组烃源岩有机质丰度较高, TOC 值平均为3.25%, TOC 值大于2%的烃源岩占总量的80%以上,具备优越的生储潜力^[31-32]。

丹佛盆地是一个位于落基山东侧的中生代前陆盆地,大致形成于白垩纪(距今110~71 Ma),后来又经历了拉拉米运动(距今71~50 Ma)的构造抬升。

丹佛盆地是一个不对称的前陆盆地,造山带位于西侧,而东翼向西倾,地层倾角很缓。白垩纪形成了多套富有机质页岩,上白垩统底部的奈厄布拉勒组生烃潜力最高,厚度约为275 m(图7)。这些烃源岩形成于南北走向的海槽之中,富含倾向生油的Ⅱ型干酪根。 TOC 值为1%~6%的地层厚度为150 m,而 TOC 值为4%~6%的地层自然伽马值很高^[33-34]。



★表示主要产油层;SR指示烃源岩;A、B、C为生烃潜力较低的致密岩性段

图7 丹佛盆地白垩系地层柱状图

Fig.7 Stratigraphic column of Cretaceous formation in the Denver Basin

西加拿大盆地从中泥盆统至上白垩统发育多套优质烃源岩层系,其中具有较大页岩油资源潜力且已经投入大规模开发的优质烃源岩层系为上泥

盆统 Duvernay 组黑色页岩^[35]。Duvernay 组页岩的分布面积近700 000 km²,被长达500 km的生物礁链分割为东部页岩次盆和西部页岩次盆,其中连续厚度大于20 m且 TOC 值大于2%的面积为120 000 km²。在2个页岩次盆边缘,Duvernay 组页岩可以通过短距离运移为同时异相沉积的Leduc组生物礁相灰岩提供油源,也可以通过下伏Cooking Lake组或中泥盆统碳酸盐岩台地相灰岩进行长距离运移,为成熟烃源岩区外的上泥盆统生物礁灰岩和中泥盆统储层提供油源(图8)。在次盆内部,由于缺少与台地相灰岩和生物礁灰岩直接接触,Duvernay 组页岩生成的烃类大量滞留,为页岩油富集奠定了基础。

2.3 区域性致密顶底板控制页岩油远景区分布

烃类在烃源岩层系中大量滞留是页岩油规模富集的必要条件,需要烃源岩层系具备大面积连续分布的致密顶底板,作为富有机质页岩层系的直接或间接封盖层,对烃源岩内部生成的油气形成有效的垂向或侧向封堵。这些顶底板具有多种岩石类型和岩石组合。

在阿巴拉契亚盆地,马塞勒斯组页岩的直接顶底板分别为上覆的中泥盆统Hamilton群泥页岩地层和下伏的Onondaga组灰岩^[36](图3)。Onondaga组主要是一套台地相致密灰岩,从老到新划分为Edgecliff, Nediow, Moorehouse 和 Seneca 等4个段。Seneca段在盆地中部的局部地区点礁发育,这些礁体高度比Onondaga组顶面高出30~40 m,礁间局部发育富有机质页岩;该段向盆地东部变薄至尖灭。马塞勒斯组页岩与Onondaga组致密灰岩在盆地南部为整合接触,而在盆地西部和东部为不整合接触,盆地东部Moorehouse段缺失。马塞勒斯组页岩的直接顶板是巨厚的Hamilton群泥页岩地层,总体为一套

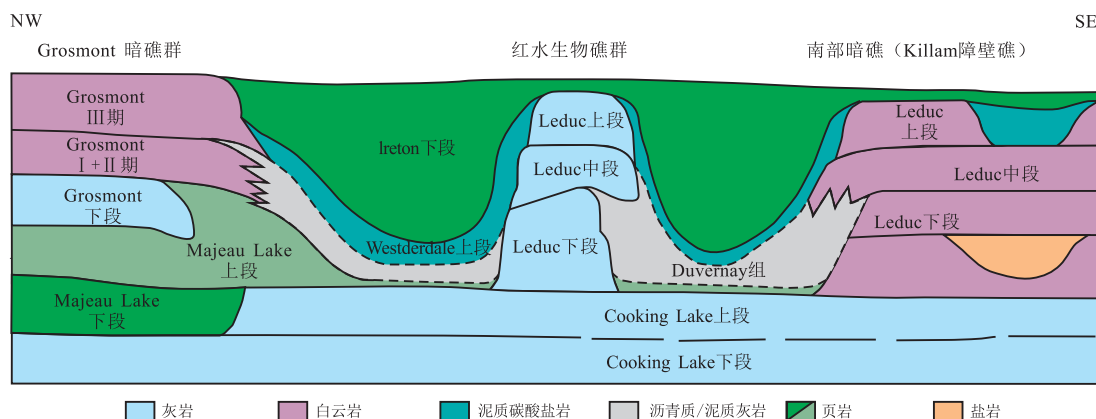


图8 西加拿大盆地上泥盆统 Duvernay 组黑色页岩与同时异相 Leduc 组礁灰岩/礁白云岩、下伏 Cooking Lake 组台地相致密灰岩底板以及上覆 Ireton 组页岩顶板接触关系示意

Fig.8 Upper Devonian strata in Western Canada Sedimentary Basin showing the contact relationships of the Duvernay black shale with Leduc reef carbonates, Cooking Lake platform facies tight limestone seal and Ireton shale seal

海相灰色页岩和粉砂质页岩,有机质丰度低,在盆地西部局部发育富有机质页岩。这套地层之上发育盆地中另一套区域性盖层Tully组厚层致密灰岩。

威利斯顿盆地巴肯组页岩地层的顶板为密西西比系底部的Lodgepole组灰岩和上覆的Madison群灰岩^[24](图4)。Lodgepole组为开阔海到台地边缘相碳酸盐岩地层,岩性主要为块状灰岩、纹层状钙质泥岩、含海百合灰岩,其中形成于亚氧化条件下的纹层状钙质泥岩TOC值为4%~8%,是盆地已经发现的常规油气储层的主力烃源岩。Madison群区域性分布广泛,其中台地边缘相灰岩是常规油气的主要储层。巴肯组页岩的底板为上泥盆统Three Forks组,自上而下发育潮下带生物扰动粉砂质白云岩/砂岩、潮间-潮上带薄层的具波状层理的纹层状粉砂质白云岩与绿色泥岩互层、潮间带块状-杂乱层状白云岩、潮上-潮间带白云质泥岩/白云质碎屑岩,是盆地致密油勘探的主要目的层。尽管巴肯组页岩的生烃量占威利斯顿盆地总生烃量的80%左右,但由于致密顶底板的存在,其对上覆地层常规油气资源量的贡献只有5%左右,仅出现在几个顶板破碎的断裂带附近^[37]。

鹰滩组底板Buda组是碳酸盐岩台地边缘相对平缓的深水白垩沉积^[25](图5),地层中基本没有陆源碎屑矿物颗粒,存在丰富的虫孔以及正常的开阔海洋深水动物化石,指示这套地层形成于开放的、富氧的较深水环境,而且远离古海岸线,在岩石中没有见到任何风暴和波浪运动形成的沉积构造。鹰滩组顶板Austin组白垩的形成环境与Buda组相似^[25]。二者在盆地大面积分布,在垂向上对鹰滩组生成的油气形成了有效封盖,并且在局部地区成为近期致密碳酸盐岩油气勘探的目标。Buda组在盆地北东方向局部缺失或者减薄,导致鹰滩组生成的油气在下伏地层中运聚成藏(图5)。

二叠盆地含有多套油气生储盖组合,其中中—上二叠统生油层和储油层最为重要^[28]。里奥纳德(Leonard)和沃夫坎组黑色页岩为重要的生油层系,礁灰岩和台地相灰岩、与蒸发岩伴生的礁后粉砂岩、深水浊积扇和水道充填砂岩等为主要储油层系,蒸发岩为良好的盖层(图6)。生、储、盖层接触关系以侧变式和垂向交替式为主。这种源储共生关系是二叠盆地常规油、致密油和页岩油多种赋存方式共存、油气资源十分丰富的重要地质条件。

受吐伦期到森诺曼期全球性海平面变化与地区性构造运动的影响,丹佛盆地上白垩统地层岩性垂向上频繁交替,形成至少8套生储盖组合^[34](图

7)。以奈厄布拉勒组为例,其主要岩性为灰岩(白垩)、富有机质钙质页岩和斑脱岩互层,总厚度为85~92 m,其中4套灰岩段平均厚度为9 m,3套页岩段平均厚度为14 m,在区域上广泛分布,很容易在测井曲线上识别出来。这种生储盖组合中的勘探目标既包括致密油气又包括页岩油气。

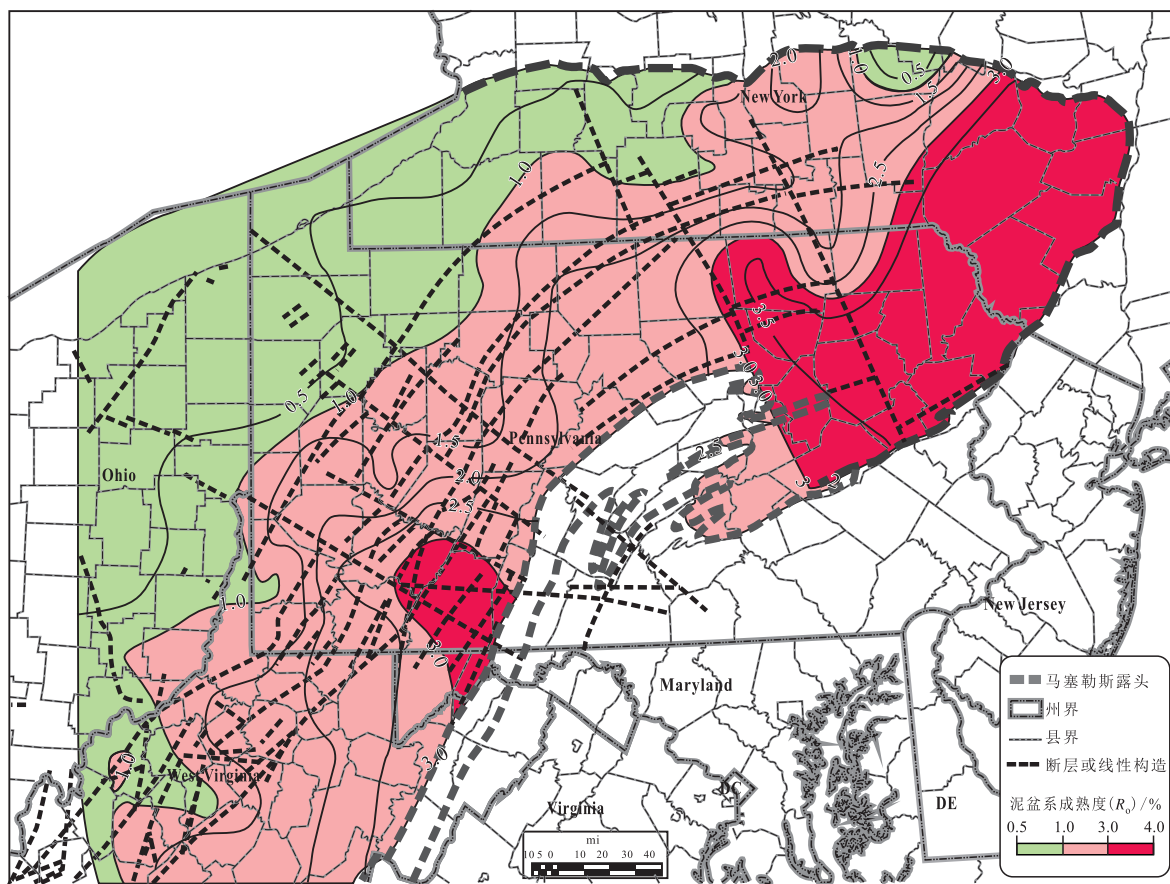
西加拿大盆地上泥盆统Duvernay组页岩下伏的Cooking Lake组碳酸盐岩台地相致密灰岩的渗透率低,形成Duvernay组页岩的直接底板^[38](图8)。Duvernay组上覆的Ireton组为一套厚度达300~400 m的致密灰色页岩,形成区域性盖层,油源对比证实Ireton组页岩之上尚未见到来源于Duvernay组页岩的烃类聚集。因此,在次盆边缘Duvernay组页岩来源的油气可以通过侧向运移进入生物礁体或白云岩化作用显著的碳酸盐岩台地边缘相储层^[39],而在大多数地区Ireton组致密页岩和Cooking Lake组致密灰岩形成了Duvernay组页岩的有效顶底板。

2.4 烃源岩热演化程度控制页岩油核心区分布

沉积盆地在埋藏和热演化过程中,生烃母质一般经历了未成熟、低成熟到高-过成熟阶段,生成的油气从富含杂原子的重油、正常黑油、轻质油、凝析油到湿气和干气。在经历初次运移之后,仍有相当比例的烃类滞留在烃源岩层系中。因此,烃源岩层系热演化程度控制着页岩中烃类产物的性质以及页岩油的分布。美国已经投入规模商业开发的页岩油区带大多处于中-高成熟阶段的生烃凹陷区。这些地区的烃源岩层系不仅含油率高,而且流动性好,是页岩油勘探的核心区域。从生烃中心向盆地外围,烃源岩热成熟度变化和源储组合控制着油气从源内、近源向远源的有序分布。

马塞勒斯页岩在阿巴拉契亚盆地西北部(宾夕法尼亚州西北部-俄亥俄州东部)的镜质组反射率(R_o)为0.5%,而在盆地东南部(宾夕法尼亚州东北部-纽约州东部)现今处于高-过成熟阶段, R_o 值大于3.5%。马塞勒斯页岩勘探实践证实阿巴拉契亚盆地存在2个页岩气核心区^[14]:在盆地西南部的核心区域, R_o 值为1.0%~2.8%,东部为干气,而西部为干气-凝析油气;在盆地的东北部 R_o 值为2.0%~3.0%,产干气。由于低油价,阿巴拉契亚盆地页岩油勘探目前仅处于探索阶段(图9)。

威利斯顿盆地巴肯组页岩 R_o 值为0.6%~0.9%,在距今100 Ma达到生烃阶段,在距今30 Ma进入生油高峰期,至今仍处于生油高峰期,成熟度适中^[24]。由于巴肯组页岩富含光合绿硫菌等特殊生烃母质,在正常生油窗内生成的原油油质很轻(>40 API)。

图9 阿巴拉契亚盆地马塞勒斯页岩热成熟度平面变化^[14]Fig.9 Thermal maturity map of the Marcellus shale in Appalachian Basin^[14]

威利斯顿盆地巴肯组页岩油产区主要集中在具有大规模低幅度构造背景的地热异常带。

墨西哥湾盆地西部鹰滩组由北西向南东倾斜,页岩埋深变化大,形成包括原油、凝析油气和干气等3个类型的烃类成熟度窗口^[25]。正常原油和轻质油埋深为1 520~3 500 m,成熟度为0.88%~1.10% R_o ,目前页岩油产量主要来自成熟度为1.1%~1.3% R_o 区域,主要是与湿气伴生的轻质油和凝析油(图10)。

二叠盆地多套烃源岩目前处于生油阶段^[30]。沃夫坎组处于生油高峰期,既有通过侧向运移和垂向运移向上覆常规储层供油的良好条件,又有向紧邻致密储层供油和原位页岩油富集的物质基础。目前,二叠盆地常规油气主要集中在中央隆起区,并不断向两侧盆地内部扩展^[31-32]。由于多套烃源岩层系叠置,二叠盆地中心富集页岩油和致密油,已经成为美国石油产量增长最快的产区(图11)。

根据前人的工作,丹佛盆地奈厄布拉勒组是所谓的“热页岩”(Hot shale),页岩油和致密油富集带往往与异常高压和地热异常区密切相关^[33]。

2.5 地质“甜点”控制页岩油局部富集

烃源岩储层虽然总体致密,但受沉积相、成岩

作用与裂缝作用控制,局部发育“甜点”。地质“甜点”区为页岩油的大面积分布与局部富集奠定了储集条件。

烃源岩储层主要由细粒沉积岩构成,岩石化学成分、沉积结构、沉积组构和有机质含量是烃源岩储层岩相划分的基础,陆源碎屑矿物成分成熟度和结构成熟度奠定了储层原生孔隙发育的基础,内生矿物结晶程度和重结晶程度、烃类演化、有机酸形成和有机-无机相互作用等控制储层次生孔隙的形成,纵向上各种岩相组合和平面上岩相带分布控制了烃源岩层储层的宏观分布及其品质。

中巴肯段是威利斯顿盆地巴肯组页岩储层的“甜点”。上、下巴肯段页岩将中巴肯段夹持其中,形成良好的源储组合。中巴肯段由多个岩性段组成^[40],其中,陆源碎屑物源来自东北部的加拿大地盾,自东向西沉积环境由陆缘海逐渐过渡为浅滩、海湾泻湖至陆相河流冲积平原相沉积。在这些岩性段中,既有致密储层,又在局部地区有常规储层。致密储层的孔隙类型主要为粒间孔和溶蚀孔,孔隙度为10%~13%,渗透率为0.1~1 mD,主力储层段为形成于近海陆架-下临滨面环境下的致密白云质粉

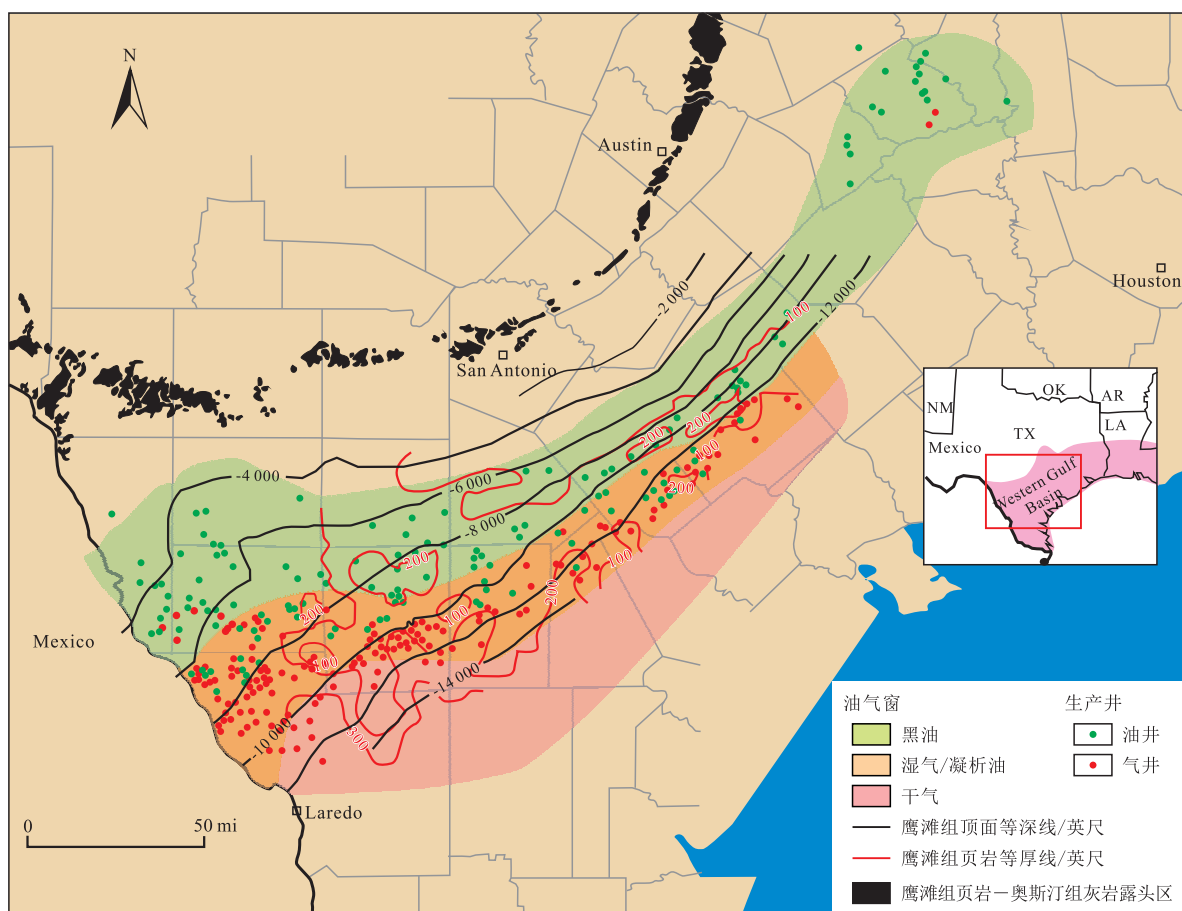
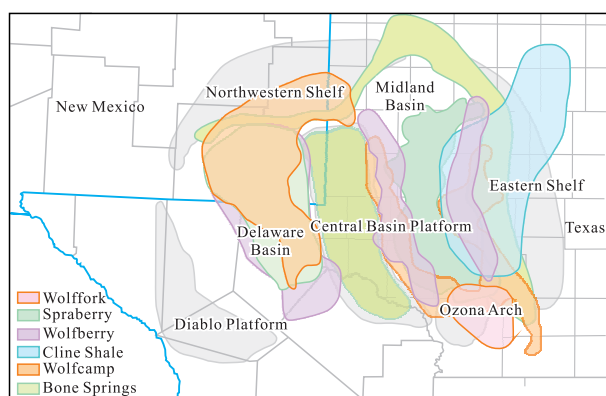
图10 墨西哥湾盆地西北部鹰滩组页岩油气分布^[25]Fig.10 Shale oil/gas distribution in the Eagle Ford Group, northwestern Gulf of Mexican Basin^[25]

图11 二叠盆地二叠系主要页岩油/致密油区带平面分布与空间叠置关系

Fig.11 Distribution and their spatial superposition of Permian main shale oil/tight oil zones in Permian Basin

砂岩和粉砂质白云岩,厚度为5~10 m。进入生烃门限后,生烃增压导致烃源岩异常高压的形成,生成的烃类由烃源岩排出,进入邻近的储层。上巴肯段页岩在全盆地分布,与广泛分布的致密储层匹配良好,巴肯组致密储层有利分布面积达70 000 km²。

二叠盆地沃夫坎组优质烃源岩与致密储层在垂向上交替分布,在2类储层中都存在“甜点”,页岩

油和致密油分布明显受到储层甜点区分布的影响^[31-32]。“下源上储、源储互层”的源储配置关系对油气充注成藏具有重要的控制作用,为致密油和页岩油共生提供了优越的先天条件。富有机质页岩早期压实排水和成岩作用通常会导致紧邻的储层致密化,由于储层物性差、非均质性强,且缺乏断层、不整合等运移通道,只能短距离近源或源内成藏。油气运移的驱动力主要有浮力、构造应力和异常流体压力。烃源岩层系排烃效率决定了烃源岩和致密储层中油气分配的比例,而对烃源岩中烃类富集和致密油成藏起主要作用的是烃源岩生烃过程中产生的异常高压。与烃源岩互层的致密储层主要是重力流沉积,沉积物源主要来自于盆地中央台地和周围陆架。因此,靠近中央台地和陆架地区的致密储层是该层系的首要甜点区,致密储层厚度大、物性和脆性均较好,初始产量高。受陆源碎屑物质注入的影响,Midland盆地东部陆架区局部发育陆源碎屑岩储层,具有较好的物性和岩石脆性条件。由于Midland盆地烃源岩比Delaware盆地的差,因此致密储层甜点区对整个地区产量的控制作用更加明显。

鹰滩组页岩油储层的“甜点”以鹰滩组下段上部富有机质页岩为主^[26-27],其矿物组成以碳酸盐岩为主(67%),石英含量为20%左右,泥质含量较低(低于10%)。这些黑色页岩密集段中的碳酸盐岩组分以钙质生物碎屑和泥晶灰岩形式存在,页理发育,由泥灰质有机质富集层和富含生物碎屑的纹层构成,孔隙度为3%~10%,平均为6%,渗透率为0.004~1.3 mD。高-过成熟阶段鹰滩组富有机质页岩以发育有机质孔隙为主,占岩石总孔隙的80%~90%,方解石和石英粒间孔次之。溶孔、晶间孔发育,岩石骨架颗粒小,有机质孔隙呈不规则蜂窝状,孔径为几到几百纳米,而矿物粒间孔直径为1 μm 左右。地层压力系数为1~1.8 MPa/hm,原油密度为0.8~0.84 g/cm³,多为与页岩气伴生的轻质油和凝析油。

成岩作用是控制烃源岩层系储集性能的关键。富有机质页岩在经历压实作用之后,岩石基质孔隙能否得以保存,后期成岩作用能否形成次生孔隙,决定了烃源岩储层能否形成“甜点”。烃源岩层系早期压实排水作用会导致非烃源岩夹层致密化。富有机质页岩热演化生烃过程伴随着大量有机酸的形成,为烃源岩层系中次生孔隙的形成创造了有利条件。同时,烃类的存在会有效抑制烃源岩内部矿物基质的成岩作用,从而有利于孔隙的保存。因此,烃源岩层系中有机质富集的纹层发育段比块状贫有机质夹层具有更好的储集物性。例如,沃斯堡盆地巴奈特组中的致密浊积碳酸盐岩夹层页岩气产能远远低于富有机质页岩层^[15](图12)。实际上,在鹰滩组页岩^[25]、马塞勒斯组页岩^[14]和西加拿大盆地泥盆统 Duvernay 组页岩^[35]中均见到致密灰岩夹层页岩气产量远低于富有机质页岩的情形。

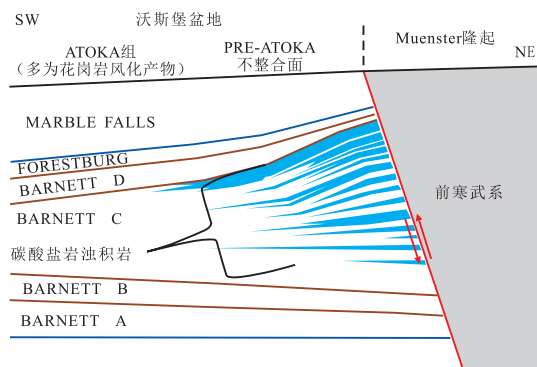


图12 沃斯堡盆地东北部南西—北东向地层剖面示意

Fig.12 Southwest-northeast stratigraphic section profile in Fort Worth Basin

裂缝是控制储层渗透率的重要因素。在盆地边缘和内部基底断层附近、构造斜坡带和局部构造发育带,应力作用会造成不同尺度的垂直或高角度

构造裂缝。取决于断裂活动的强度和伴生裂缝体系的尺度,构造裂缝对烃源岩层系中页岩油/气的保存具有两面性。例如,阿巴拉契亚盆地罗马地嵌周边的基底断裂既控制了马塞勒斯组富有机质页岩和上覆 Tully 组灰岩顶板的沉积范围,又对马塞勒斯组页岩的埋藏和生烃具有重要的制约作用。与基底断层多期活动伴生的天然裂缝体系(如 Tyrone-Mt. Union 断裂带)是油气垂向运移的主要通道,对马塞勒斯组页岩及下伏地层油气富集都有负面影响^[14]。

与此相反,在威利斯顿盆地,与宽缓的低幅度构造所伴生的裂缝体系对巴肯组页岩油气的局部富集起建设性作用,只有在盆地北部沿 Nesson 断裂带有部分顶板遭受断裂破坏,导致巴肯组页岩生成的少量油气在上覆地层中聚集^[37]。在构造宽缓的生烃凹陷区,当沉积埋藏将地层主应力从垂直应力转化为水平应力之后,地层中原有沉积层理和纹理因岩石力学性质固有差异会促进水平裂缝的发育。生烃高峰之前形成的构造裂缝有可能被后期成岩作用所胶结,也可能被运移烃充注而得以保存。

在生烃高峰和更高成熟阶段的烃类生成、重质烃向轻烃转化以及天然气形成,会导致烃源岩孔隙中烃类体积膨胀,从而形成生烃增压微裂缝。生烃增压和异常高压带形成的微裂缝体系往往由于烃类的存在而得到很好的保存。裂缝对总孔隙度的提高贡献不大(一般小于1%),但对渗透率的提高作用明显,一般可提高渗透率至少一个数量级,不仅改善了烃源岩储层的渗流能力,而且为页岩油大面积连续分布提供了运移通道。如图13所示,西加拿大盆地 Duvernay 组富有机质页岩^[41]和上白垩统 Cardium 组致密砂岩^[42]的孔隙度大致相当,但页岩基质渗透率远远低于多数致密砂岩;常规条件下不可采的致密砂岩储层由于微裂隙的存在渗透率提高,在人工干预下可以获得经济产能。因此,天然裂缝的存在或者通过人工压裂是从页岩中开采页岩油的技术关键。

2.6 地质和工程“双甜点”控制页岩油富集高产

页岩油“甜点区”通常表现为页岩储层厚度大、物性好、裂缝发育、脆性强等。例如,ZAGORSKI^[14]对马塞勒斯组页岩油气富集高产要素进行了综合分析,发现热成熟度、TOC、页岩储层埋藏深度、地层压力梯度、页岩储层厚度、孔隙度和渗透率、原地含气量、基底断层与构造复杂性、天然裂缝发育程度、水平井钻井轨迹和地层可压性等11项要素对其产能均有影响。

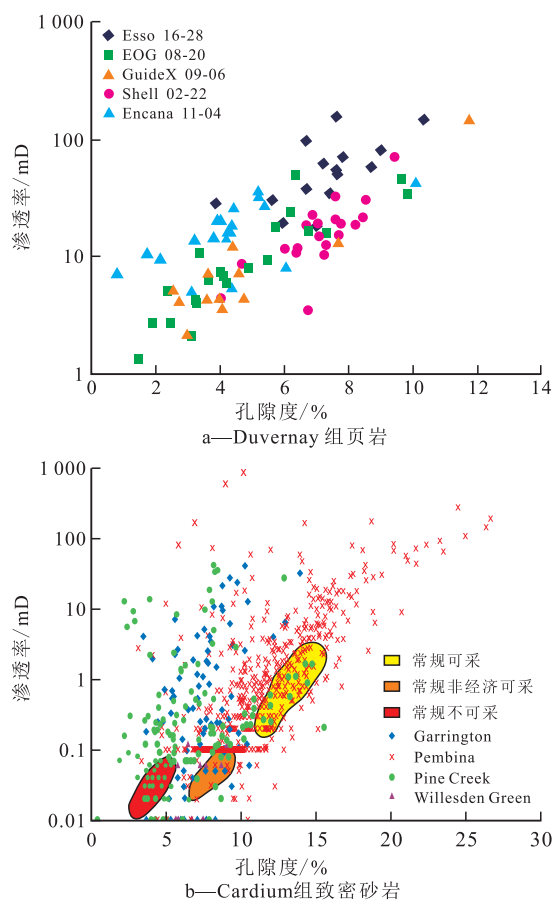


图13 西加拿大盆地 Duvernay 组富有机质页岩和上白垩统 Cardium 组致密砂岩孔隙度和渗透率对比^[41-42]

Fig.13 Porosity-permeability relationships of the Upper Devonian Duvernay shale and Upper Cretaceous Cardium tight sandstone in the Western Canada Sedimentary Basin^[41-42]

墨西哥湾盆地西北部鹰滩组页岩储层由于碳酸盐矿物含量高,地层较软,杨氏模量为 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^6$ psi,泊松比为 0.25~0.27,支撑剂很容易嵌入。目前在处于正常生油窗口的烃源岩层系中页岩油生产还没有取得大规模商业性突破,而主要液态烃富集高产区集中在处于高-过成熟阶段的轻质油和凝析油气页岩产层^[25]。

威利斯顿盆地巴肯组页岩油富集高产要素包括:①上、下巴肯页岩段的热成熟度和生烃潜力;②所处盆地部位的构造复杂程度;③中巴肯段岩相和岩石力学特征;④下伏 Three Forks 组上部是否存在 Sanish 砂岩段^[24]。

如图 14 所示,西加拿大盆地上泥盆统 Duvernay 组页岩分布面积约为 120 000 km²;按照 $TOC > 2\%$ 的 Duvernay 组页岩连续厚度大于 20 m,优选出 12 000 km² 为页岩油远景区;按照 $R_o > 1.0\%$ 优选出 21 000 km² 为页岩油有利区;按照富有机质页岩连续厚度大于 20 m 与 $R_o > 1.0\%$ 叠加,优选出 5 000 km² 为页岩油地质“甜点”^[35]。钻探结果表明,地质“甜点”内 Duvernay 组页岩的孔隙度为 3%~12%,基质渗透率为 0.000 01~0.01 mD; TOC 值为 1%~20%,矿物成分富含石英和长石,黏土矿物含量一般不超过 10%;地层压力为正常-超压(地层压力系数为 0.9~1.6)。在地质“甜点”实际评价过程中,区域性应力分布、地层水平压裂时的造缝能力和控缝能力、地面交通条件、管网条件和长期客户情况都是需要考察的内容。

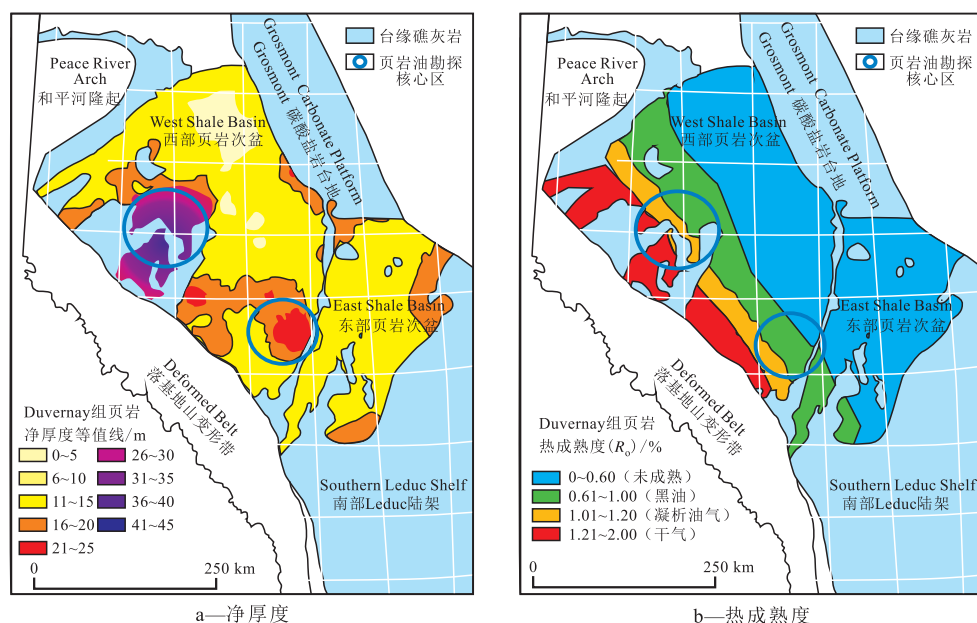


图14 西加拿大盆地 Duvernay 组富有机质页岩净厚度与热成熟度分布
(据 2012 年 6 月阿尔伯塔省节能委员会/阿尔伯塔省地调厅数据公开文档修订)

Fig.14 Net thickness and thermal maturity of the Duvernay shale in the Western Canada Sedimentary Basin
(modified by data from EUCB/AGS open file reports, June, 2012)

3 中国与北美页岩油形成条件对比分析

中国陆相沉积体系在盆地规模、构造稳定性和沉积类型上与北美海相盆地存在显著差异,进而造成中国陆相页岩油和北美海相页岩油在形成、演化和富集特征方面存在诸多差异性(表1)。

沉积盆地中页岩油的形成和富集需要稳定宽缓的构造背景。美国页岩油主要分布于加拿大地盾及其周缘,具有稳定的地盾与克拉通背景;在稳定地盾的背景下沉积盆地构造演化的稳定性强,页岩油气主要分布在威利斯頓克拉通盆地和墨西哥湾海岸平原及陆棚区,盆地面积大,以晚古生界和中生界为主;沉积相带分布宽缓,岩性稳定。与北美海相页岩油形成条件相比,中国陆相页岩油形成的构造环境整体稳定性较差,主要表现在3个方面:①陆块小、数量多,在中国境内37个陆块中,华北陆块最大,扬子和塔里木次之,但华北陆块的面积也只有北美陆块的1/12^[43]。②沉积盆地类型多、分割性和后期活动性强。受加里东、海西、印支、燕山和喜马拉雅多期构造活动的影响,中国陆块依托的各沉积盆地构造演化存在较大的差异性,表现为横向上具有拉张走滑、裂隙、克拉通、陆内凹陷和前陆等盆地的东西、南北差异性,纵向上具有多旋回叠置、残留叠置与单旋回盆地演化发展的差异性,从而导致陆相页岩油分布面积和层系的差异性。③陆相

页岩油主要分布在沉积环境变化大的陆相湖盆。受盆地类型多样与活动强度控制,发育淡水湖泊、混积湖泊与咸化湖泊等多种细粒岩石沉积体系,表现为沉积体系多样、相带变化快、岩性复杂、储盖组合样式多变等特征^[4-5]。

北美在整体稳定宽缓的构造和沉积背景下,烃源岩分布层系集中,岩性和沉积环境较为简单,主要发育在克拉通盆地凹陷区、海岸平原和陆棚环境的局限海滞留区,岩性为泥灰岩、泥页岩和黑色页岩。中国陆相沉积盆地发育多种类型的优质烃源岩,主要形成于深水湖相沉积环境。与北美相比,中国陆相烃源岩规模小、变化大、品质相对较差。受区域大地构造和陆相沉积成盆环境的影响,中国页岩油主力烃源岩在分布层系、盆地类型、岩性和沉积环境方面都具有多样性。分布层系上从上古生界二叠系到新近系均有分布;在盆地类型上,有二叠系到三叠系的陆内凹陷盆地、侏罗系到白垩系的前陆盆地、中新生代的断陷和拗陷盆地;岩性和沉积环境上有陆相淡水、半咸水和咸化湖盆环境形成的泥岩、泥灰岩、泥页岩、页岩和沉凝灰岩等,导致烃源岩分布规模、连续厚度和干酪根类型变化大,不同地区页岩油资源潜力变化大。

区域性优质致密顶底板的存在是页岩油在烃源岩层系中富集的基本条件。与稳定宽缓的地盾构造沉积背景相对应,北美页岩油层系顶底板分布面积大、稳定性好。与北美相比,由于中国湖盆面积小、陆相沉积体系相带窄、相变快,导致主要烃源

表1 北美与中国主要盆地烃源岩特征对比
Table1 Contrast in key geological attributes of hydrocarbon source beds in North America and China

地区	盆地名称	盆地类型	主要目的层	主要岩性	有利烃源岩 面积/10 ⁴ km ²	累积 厚度/m	干酪根 类型	R ₀ /%	TOC/%
北美	阿巴拉契亚	前陆	马塞勒斯组	海相页岩/灰岩	11.4	10~200	Ⅱ为主	0.5~3.5	1.0~15.0
	威利斯頓	克拉通内部凹陷	巴肯组	海相页岩/灰岩	7	5~55	I+Ⅱ	0.6~1.0	7.2~14.0
	墨西哥湾	克拉通边缘	鹰滩组	海相泥岩/页岩	4	10~60	Ⅱ为主	0.6~1.4	3.0~10.0
	二叠	叠合	沃夫坎组	海相泥岩/页岩	10	20~150	I+Ⅱ	0.6~1.3	2.0~5.0
			巴奈特组	海相页岩/灰岩	3	15~70	I+Ⅱ	0.7~1.1	4.0~12.0
	丹佛	前陆	奈厄布拉勒组	海相泥灰岩	3.5	80~100	Ⅱ为主	0.7~1.4	1.6~4.7
中国	松辽	拗陷	青山口组	湖相泥页岩	5.0~6.0	100~150	I为主	0.5~2.0	0.9~9.0
	渤海湾	裂隙	沙河街组	湖相泥页岩	5.0~10	30~1000	I为主	0.5~2.0	1.5~10.0
	鄂尔多斯	拗陷	长7段	湖相泥页岩	10	10~100	I+Ⅱ	0.7~1.5	2.0~20.0
	准噶尔	裂隙	二叠系	湖相泥页岩	3.0~4.0	30~200	I+Ⅱ	0.6~1.6	1.2~8.9
	四川	拗陷	侏罗系	湖相泥页岩	3	80~150	I+Ⅱ	0.5~1.6	0.2~3.8
	柴达木	拗陷	古近系—新近系	湖相泥页岩	1.0~3.0	100~300	Ⅱ	0.5~0.9	0.4~5.5
	酒泉	裂隙	白垩系	湖相泥页岩	0.3~1	50~1 000	I+Ⅱ	0.5~0.8	1.0~2.5
	三塘湖	裂隙	二叠系	湖相泥页岩	0.5~1	30~400	I+Ⅱ	0.6~1.3	0.1~6.0
	吐哈	拗陷	侏罗系	湖相泥页岩	0.7~1	700~1 100	I+Ⅱ	0.5~0.9	1.0~5.0
	江汉	裂隙	古近系	湖相泥页岩	2.8	50~650	I+Ⅱ	0.5~1.2	0.5~12.0

岩层系的区域性致密顶底板地层分布面积整体较小,横向非均质性强。同时,在陆相湖泊细粒沉积形成时期,当盆地周缘构造活动性强、外部物源充足时,快速沉积有利于形成粗粒的碎屑岩沉积;外部物源缺乏时,有利于形成湖相碳酸盐岩沉积。因此,细粒烃源岩与粗粒岩石在侧向上或者纵向上的相变,容易形成有利的源储组合,有利于烃源岩中生成的烃类向邻近储层中运移。频繁的区域构造活动和火山间歇喷发活动、气候变化和沉积环境变化等有利于混积岩沉积,导致湖泊沉积体系的沉积类型多、岩性复杂、纵向非均质性强。咸化湖泊细粒沉积常与盐岩和蒸发岩层伴生,形成多套盐间细粒富有机质页岩沉积韵律,有利于页岩油的富集。

烃源岩层系热演化程度控制了北美海相页岩油核心区的分布。在致密顶底板边界明确、内部常规储层不发育的优质烃源岩层系中,由于中-低成熟阶段烃源岩生成的大分子烃类很难在致密烃源岩层系中流动,到目前为止,原位富集的页岩油气规模开发只在中-高成熟阶段(如鹰滩)和高-过成熟阶段(如马塞勒斯)烃源岩层系获得了成功。当优质烃源岩和优质常规储层呈互层或“三明治”式组合时,在正常生油窗生成的油气排烃效率高,可以就近形成源内致密油聚集,中巴肯段部分具有常规浮力成藏条件的致密储层中的油气就是一个很好的实例。在构造活动较为强烈的美国西部加州地区,古近系 Monterey 组成熟烃源岩生成的油气沿地层上倾方向侧向运移,在构造斜坡区烃源岩裂缝发育带聚集,形成裂缝型烃源岩油藏^[44-45]。纵观北美和中国已发现页岩油特征,页岩油主要是烃源岩内烃类原位聚集和短距离运移形成的,大面积分布的优质烃源岩进入生油高峰阶段是页岩油富集的重要条件。此外,中国陆相烃源岩的生烃热演化动力学和烃类产物与北美海相存在巨大差异:陆相原油含蜡量高于海相原油,陆相原油裂解成气活化能也高于海相原油;陆相成烃有机质非均质性强,生烃活化能差异大;咸化湖泊有机质大量生烃阶段早于半咸水和淡水湖泊有机质。

北美页岩油“甜点”区总体分布面积大,一般为数千至上万平方千米,产量较稳定,单井初期日产量为10~300 t/d,稳定日产量大约为20~80 t/d^[24,31-32,34]。与北美相比,中国陆相页岩油“甜点”区分布点多、面积小,富集高产能力较差。截至目前为止,中国从东部的渤海湾盆地古近系孔店组和沙河街组、松辽盆地上白垩统青山口组、中部鄂尔多斯盆地中—上三叠统延长组、江汉盆地古近系潜江组、西南部

四川盆地侏罗系,到西部准噶尔盆地和三塘湖盆地中二叠统芦草沟组,在常规油气勘探过程中,均在陆相烃源岩层系中见到油气显示,并获得工业油流,展示了中国陆相页岩油巨大的资源潜力。

研究表明,中国陆相页岩油“甜点”分布规律和富集高产能力主要受沉积和构造环境分割性大、烃源岩层系非均质性强、成岩改造作用、裂缝发育程度以及顶底板配置关系等多种复杂因素控制。由于早期钻探的页岩油流井缺少系统的烃源岩层系地质资料,近期页岩油探井又没有足够的生产历史,对中国陆相页岩油勘探潜力分析、“甜点”预测方法和高产稳产配套技术等提出了严峻的挑战。

4 对中国陆相页岩油勘探开发的启示

稳定宽缓的构造背景、大面积分布的优质烃源岩及致密顶底板和合适的热演化程度是北美海相页岩油形成的基本条件,而地质和工程“甜点”控制着页岩油的规模富集和高产稳产。目前,全球范围内对页岩油的研究和探索才刚刚开始,对赋存在页岩和泥岩中的页岩油能否形成规模化开采还远没有达成共识。如何尽快突破页岩油选区评价和开采技术难关,将页岩油巨大的资源潜力转化为现实的产量接替领域,是石油工业界面临的重要任务。

陆相沉积环境对陆相页岩油的形成具有双重影响:陆相大中型湖泊有机质丰富,有利于优质烃源岩的形成;同时,陆源碎屑沉积、生物和化学沉积以及火山碎屑沉积的复杂性,又带来了烃源岩层系的多样性和非均质性。因此,中国陆相页岩油具有独特的地质特征,主要表现在烃源岩类型多、有机质丰度高但变化大,烃源岩储层岩性复杂,厚度、分布规模和可压性变化大,页岩油流动性和饱和度受热成熟度影响大。

正确认识陆相沉积盆地的页岩油资源潜力,找准页岩油富集的有利核心区,发展适应性高产稳产工程技术是中国陆相页岩油勘探开发取得突破的关键环节。根据美国海相页岩气和页岩油成功的经验,中国陆相页岩油勘探开发应该重点关注3个层面的问题:一是在选区评价方面,从大中型盆地的烃源岩层系着手,确保页岩油规模发现;把工作重点放在TOC值大于2%和 R_o 值大于0.7%的区带,保证页岩油的资源丰度。二是在钻探目的层选择上,聚焦烃源岩层系中脆性矿物含量高的纹层、夹层或天然微裂缝发育段,保证人工压裂时复杂缝网

的形成;聚焦地层超压系统,保证产层有较大天然能量;聚焦气油比较高的轻质油和凝析油层段,保证页岩油流动性。三是重视含油页岩的体积规模,采用单水平井单层开采、多水平井多层开采等平台式井工厂方式,保证工业化作业和经济产量。

借鉴美国页岩油气成功的经验,中国陆相页岩油发展的战略选择应该分三步走:①聚焦陆上沉积盆地,开展页岩油选区评价、赋存和流动机理研究,明确页岩油资源潜力与分布的基础问题;②强化核心区评价,通过老井复查、参数井钻探,建立合理的评价标准和方法,明确中国陆相页岩油技术可采资源量和有利分布区;③加大试验区建设,针对陆相页岩油的特殊性,先易后难,开展关键技术攻关与试验,积极探索页岩油大规模经济有效开发的模式。在中-高成熟高压区,优选富有机质纹层和异常高压叠合带,兼探低幅度正向构造、薄砂条夹层,加强钻完井、储层改造等工程实施中的储层保护工作;在中-高成熟低压区,重点研究提高驱动能方法,发展储层增能技术;关注中-低成熟页岩油层系,重点研究改善页岩油流动性方法,发展化学、加热、注气等技术,提高流动性能。

致谢:项目开展过程中,与金之钧、邹才能、蔡勋育、宋明水、易积正、周德华、宋国奇、刘惠民、苏建政、周庆凡等开展了有益的讨论,中国石化石油勘探开发研究院战略研究室和无锡所页岩油气评价研究室人员参加了部分研究工作,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
JIA Chengzao, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [2] US Energy Information Bureau. 2017. <https://www.eia.gov/electricity/data/eia860/>.
- [3] 邹才能,等.非常规油气地质学[M].北京:地质出版社,2014.
ZOU Caineng, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [4] 傅成玉,等.非常规油气资源勘探开发[M].北京:中国石化出版社,2015.
FU Chengyu, et al. Exploration and development of unconventional petroleum resources [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015.
- [5] LI M W, MA X X, LI Z M, et al. Emerging shale oil plays in hypersaline lacustrine Qianjiang Formation, Jiangnan Basin, Central China [C]. Houston: SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 2015.
- [6] 邹才能,董大忠,王玉满,等.页岩气地质评价方法:GB/T 31483—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [7] ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Geological evaluation methods for shale gas: GB/T 31483—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [8] DONOVAN A, EVENICK J, BANFIELD L, et al. An organofacies-based mudstone classification for unconventional tight rock and source rock plays [C]. Austin: SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, 2017.
- [9] BREYER J A. Shale reservoirs: Giant resources for the 21st Century [M]//AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012.
- [10] BREYER J A. The Eagle Ford Shale—A renaissance in U.S. oil production [M]//AAPG Memoir 110. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2016.
- [11] WOOD L J. Shale tectonics [M]//AAPG Memoir 93. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2010.
- [12] APLIN A C, MACQUAKER J H S. GS20—Getting started in shales [M]. Tulsa: AAPG/Datapages, 2010.
- [13] CAMP W, DIAZ E, WAWAK B. Electron microscopy of shale hydrocarbon reservoirs [M]//AAPG Memoir 102. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2013.
- [14] TYSON R V, PEARSON T H. Modern and Ancient continental shelf anoxia: An overview [M]//TYSON R V, PEARSON T H. Modern and Ancient continental shelf anoxia. [S.l.]: Geological Society Special Publication 58, 1991: 1-27.
- [15] ZAGORSKI W A, WRIGHTSTONE G R, BOWMAN D C. The Appalachian Basin Marcellus gas play: Its history of development, geologic controls on production, and future potential as a world-class reservoir [M]//BREYER J A. Shale reservoirs—Giant resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 172-200.
- [16] MILLIKEN K L, DAY-STIRRAT R J, PAPAZIS P K, et al. Carbonate lithologies of the Mississippian Barnett Shale, Fort Worth Basin, Texas [M]//BREYER J A. Shale reservoirs—Giant resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 290-321.
- [17] BUNTING P J, BREYER J A. Lithology of the Barnett Shale (Mississippian), southern Fort Worth Basin, Texas, Shale reservoirs [M]//BREYER J A. Shale Reservoirs—Giant Resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 322-343.
- [18] MONROE R M, BREYER J A. Shale wedges and stratal architecture, Barnett Shale (Mississippian), southern Fort Worth Basin, Texas [M]//BREYER J A. Shale reservoirs—Giant resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 344-367.
- [19] AYERS JR W B. Coalbed gas systems, resources, and production and a review of contrasting cases from the San Juan and Powder River basins [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1 853-1 890.
- [20] MANGER K C, WOODS T J, CURTIS J B. Antrim shale fractured reservoirs: Their potential throughout the Michigan Basin [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(9): 1 526-1 527.
- [21] US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory. Modern shale gas development in the

- United States: A Primer[EB/OL].<http://www.netl.doe.gov/technologies/oilgas/publications/EPreports/Shale-Gas-Primer>, 2009.
- [21] Canadian Association of Petroleum Producers. 2018 Crude Oil Forecast, Markets and Transportation [R/OL]. <https://www.capp.ca/publications-and-statistics/crude-oil-forecast.html>.
- [22] KELMME H D, ULMISHEK G F. Effective petroleum source rocks of the world: Stratigraphic distribution and controlling depositional factors[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(12): 1 809–1 851.
- [23] SAGEMAN B B, MURPHY A E, WERNE J P, et al. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle–Upper Devonian, Appalachian basin [J]. Chemical Geology, 2003, 195(1/4): 229–273.
- [24] POLLASTRO R M, ROBERTS L N R, COOK T A. Geologic model for the assessment of technically recoverable oil in the Devonian–Mississippian Bakken Formation, Williston Basin [M]//BREYER J A. Shale reservoirs–Giant resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 205–257.
- [25] DONOVAN A D, STAERKER T S, GARDNER R M, et al. Findings from the Eagle Ford Outcrops of West Texas&implication to the Subsurface of South Texas [M]//BRYER J A. The Eagle Ford Shale–A renaissance in U.S. Oil Production: AAPG Memoir 110. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2016: 301–336.
- [26] GRABOWSKI G J. Organic-rich chalks and calcareous mudstones of the Upper Cretaceous Austin Chalk and Eagle Ford Formation, south-central Texas, USA [M]//KATZ B J. Petroleum Source Rocks. Berlin: Springer-Verlag, 1995: 209–234.
- [27] ROBISON C R. Hydrocarbon source rock variability within the Austin Chalk and Eagle Ford Shale (Upper Cretaceous), East Texas, USA [J]. International Journal of Coal Geology, 1997, 34(3/4): 287–305.
- [28] JACKSON J, JACKSON K. Integrated synthesis of the Permian Basin: Data and models for recovering existing and undiscovered oil resources from the largest oil-bearing basin in the US [R]. Austin: Bureau of Economic Geology the University of Texas, 2008.
- [29] DICKERSON P W. Evolution of the Delaware Basin [M]//MUEHLBERGER W R, DICKERSON P W, DYER J R, et al. Structure and Stratigraphy of Trans-Pecos Texas: El Paso to Guadalupe Mountains and Big Bend July 20–29, 1989. [S.l.]: American Geophysical Union, 2013: 113–122.
- [30] BAUMGARDNER R W, HAMLIN H S. Core-based geochemical study of mudrocks in basinal lithofacies in the Wolfberry Play, Midland Basin, Texas, Part II [M]. [S.l.]: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2014.
- [31] DUTTON S P, KIM E M, BROADHEAD R F, et al. Play analysis and leading-edge oil-reservoir development methods in the Permian Basin: Increased recovery through advanced technologies [J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(5): 553–576.
- [32] SCHENK C J, POLLASTRO R M, COOK T A, et al. Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Permian Basin Province of West Texas and Southeast New Mexico 2007 [M]. [S.l.]: U S Geological Survey, 2008.
- [33] SONNENBERG S A, WEIMER R J. Oil production from Niobrara Formation, Silo Field, Wyoming: Fracturing associated with a possible wrench fault system (?) [J]. The Mountain Geologist, 1993, 72(2): 38–59.
- [34] GAUTIER D L, DOLTON G L, TAKAHASHI K I, et al. National assessment of United States oil and gas resources—results, methodology, and supporting data [M]. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2003.
- [35] RUSSUM D A, BELONOGOV A. The emerging oil revolution in Western Canada [R]. AAPG Search and Discovery Article#80128, 2011.
- [36] SMOSNA R, BRUNER K R. Resource assessment of the Marcellus Shale [M]//BREYER J A. Shale reservoirs–Giant resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 201–204.
- [37] CHEN Z H, OSADETZ K G, JIANG C Q, et al. Spatial variation of Bakken or Lodgepole oils in the Canadian Williston Basin [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(6): 829–851.
- [38] STOAKES F A, CREANEY S. Sedimentology of a carbonate source rock: The Duvernay Formation of Alberta Canada [M]. [S.l.]: Rocky Mountain Carbonate Reservoirs, 1984: 132–147.
- [39] LI M W, YAO H X, FOWLER M G, et al. Geochemical constraints on models for secondary petroleum migration along the Upper Devonian Rimbey–Meadowbrook reef trend in central Alberta, Canada [J]. Organic Geochemistry, 1998, 29: 163–182.
- [40] ALEXANDRE C S, SONNENBERG S A, SARG F J. Reservoir characterization and petrology of the Bakken Formation, Elm Coulee field, Richland County, Montana [R]. AAPG Search and Discovery Article#20108, 2011.
- [41] DONG T, HARRIS N B, KNAPP L J, et al. The effect of thermal maturity on geomechanical properties in shale reservoirs: An example from the Upper Devonian Duvernay Formation, Western Canada Sedimentary Basin [J]. Marine & Petroleum Geology, 2018, 97: 137–153.
- [42] CHEN Z, OSADETZ K G. An assessment of tight oil resource potential in Upper Cretaceous Cardium Formation, Western Canada Sedimentary Basin [J]. Petroleum Exploration & Development Online, 2013, 40(3): 344–353.
- [43] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚. 从全球看中国大地构造: 中国及邻区大地构造图简要说明 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- REN Jishun, WANG Zuoxun, CHEN Bingwei. A view of Chinese tectonics: Brief introduction of the tectonic maps of China and region [M]. Beijing: Geological Press, 1999.
- [44] JARVIE D M, LUNDELL L L. Kerogen type and thermal transformation of organic matter in the Miocene Monterey Formation [M]//ISAACS C M, RULLKOTTER J. The Monterey Formation: From Rocks to Molecules. New York: Columbia University Press, 2001: 268–95.
- [45] JARVIE D M. Shale resource systems for oil and gas: Part 2–Shale-oil resource systems [M]//BREYER J A. Shale reservoirs–Giant resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2012: 89–119.