

中国与美国致密油形成条件对比研究

罗群¹, 高阳², 张泽元¹, 王仕琛¹, 红兰¹, 马文或¹, 许倩¹

1. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249;
2. 中国石油新疆油田勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

摘要:在拟定、完善致密油定义与内涵的基础上,对中国9个、美国6个共15个致密油盆地的成盆、成烃、成储、成藏进行类比研究。结果表明,中国致密油潜力大,但成藏条件复杂多变;中国有9个致密油盆地,分别位于中国大陆的东、中、西部三个构造区,由于受太平洋、西伯利亚、印度三大板块共同作用,导致了这三个构造区致密油盆地类型、规模、成盆、成烃、成储、成藏、富集的差异和有规律的变化趋势。具体表现在,由西部构造区到中部构造区再到东部构造区,致密油分布规模由小到大再到中,分布层位由上二叠统到中侏罗统再到下白垩统,层位数目由多到中再到少;致密油生成条件由差到好再到较好,储集类型由多而复杂到相对复杂再到相对简单,储集性能由相对好到相对差再到相对好,渗透率由相对高到相对低再到相对高;致密油运聚成藏条件由相对差到好再到较好,油藏类型由多到少再到多;致密油勘探开发潜力西部构造区最大,其次是中部构造区,再次是东部构造区。中美致密油盆地及致密油成藏既有共性也具有明显不同,差异的根本原因是构造的稳定性和沉积相的非均质性;中国致密油盆地构造稳定性差,陆相沉积,而美国致密油盆地构造稳定性好,海相沉积,从而导致中国致密油盆地的生烃能力比美国差,但储集条件总体好于美国。中国致密油的成藏机制与富集模式要比美国更为复杂和丰富,美国致密油的品质总体要好于中国致密油,盆地规模与致密油勘探开发潜力比中国大。

关键词:致密油;成藏特征;中国;美国

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

A comparative study of geological conditions of tight oils in China and USA

LUO Qun¹, GAO Yang², ZHANG Zeyuan¹, WANG Shichen¹, HONG Lan¹, MA Wenyu¹, XU Qian¹

1. Institute of Unconventional Oil and Gas Science and Technology, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
2. Exploration and Development Research Institute, CNPC Xinjiang Oilfield, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: On the basis of formulating and perfecting the definition and connotation of tight oil, a comparative study was carried out on the basin formation, hydrocarbon generation, hydrocarbon preservation and reservoir formation for 9 tight oil basins of China and 6 of USA. It was concluded that China's tight oil has great potential, but the accumulation conditions are complex and diverse. There are 9 tight oil basins in China located in 3 tectonic areas in the eastern, middle and western parts of mainland China. Due to the combined action of the 3 plates of the Pacific, Siberia and India, the type, scale and formation of tight oil basins as well as the generation, preservation and enrichment of hydrocarbon are varied and have regular change trends among the three tectonic areas. From the western tectonic area to the central and then to the eastern one, the distribution scale of tight oil changes from small to large and then to middle, and the number of tight oil distribution horizon decreases from the Upper Permian to the Middle Jurassic and finally to the Lower Cretaceous. The generation conditions of tight oil changed from bad to good and to relatively good. The types of tight oil reservoirs change from multiple and complex to relatively complex and then to relatively simple. The reservoir performance of tight oil reservoirs changes from relatively good to relatively poor and to relatively good, while permeability changes from relatively high to relatively low and to relatively high. The conditions of tight oil migration and accumulation change from relatively poor to good and to relatively good, and the types of tight oil reservoirs change from more to less and back to more. The exploration and development potential of tight oil is the largest in the western tectonic area, followed by the central and then the eastern one. The tight oil basins and tight oil accumulations in China and USA have both commonalities and obvious differences. The fundamental reasons for the

收稿日期: 2021-07-31; 修订日期: 2022-01-12。

作者简介: 罗群(1963—), 男, 博士, 教授, 从事非常规油气成藏与地质评价研究。E-mail: luqun2002@263.net。

基金项目: 中国石油—中国石油大学战略合作科技专项课题(ZLZX2020-01-6)和大港油田科技项目“大港探区斜坡区油气分布有序性机理研究”联合资助。

differences are the stability of structures and the heterogeneity of sedimentary facies. The tight oil basins in China have poorer tectonic stability and continental deposition, while the tight oil basins in USA have better structural stability and marine deposition. As a result, the hydrocarbon generation capacity of tight oil basins in China is worse than that in USA, but the reservoir conditions are generally better than those in USA. The accumulation mechanism and model of tight oil enrichment in China are more complex than those in USA. The quality of tight oil in USA is generally better than that in China. The size of tight oil basins in USA and the exploration and development potential of tight oil are greater than those in China.

Key words: tight oil; accumulation feature; China; USA

1 研究概况

1.1 致密油的概念与内涵

1.1.1 致密油的概念

致密油的概念最早出现在 20 世纪 40 年代出版的 AAPG Bulletin 杂志中^[1],但到目前尚没有严格定义。北美地区相关机构和媒体发布的报道中所提到的致密油或页岩油,二者含义基本一致^[2-3]。实际上,致密油和页岩油有着本质的区别:页岩油是源内聚集的,属原位聚集,没有明显二次运移;而致密油是自烃源岩排出后运移至邻接的或附近的致密储层中聚集的石油,属源储邻接或源储近接,近源聚集,发生了明显的短距离二次运移。

综合中国学者^[4-10]对致密油的定义,参考国外学者对致密油的认识,并与页岩油区别,本文将致密油定义为:致密油是赋存于致密储层孔隙系统和裂缝网络空间中的石油的简称,是指被烃源岩包裹或与烃源岩互层,或与烃源岩紧邻或近邻的致密碎屑岩、致密碳酸盐岩、致密火山岩等储集岩中的,经过大面积、近距离二次运移的石油聚集。致密储层覆压基质渗透率小于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,必须要经过改造才能获得商业油流。

1.1.2 致密油的内涵

致密油属于非常规油气资源,其区别于常规石油的本质与特征标志是:石油运移的动力不是浮力,而是源储压差与扩散作用力;运移的阻力不是毛细管力,而是石油流体与周围介质之间存在的黏滞力和分子作用力;流体运移的通道不是毫米—微米级为主及以上的孔隙—裂缝—断裂系统,而是更微观的以纳米级尺度为主的微孔喉—微裂缝网络;流体的渗流特征以纳达西级渗流为主,流体流动不遵循相对自由流动的浮力公式和达西定律,而遵循受限制的甚至非自由流动的纳达西流、扩散流的流动规律;石油运移的方式不是沿优势运移通道的长距离幕式运移,而是通过孔缝喉网络输导,由烃源岩进入储层的大面积、短距离的长期持续弥漫式运

移;源储空间关系是紧邻或近邻,而不是源储长距离相隔;石油聚集的空间不是圈闭,而是致密储层的微纳米孔缝喉空间系统;石油分布不是局部分布的高丰度孤立油藏,而是大面积连续或准连续分布的低丰度油藏,并存在相对富集的甜点区域。

1.2 全球致密油资源布局与中国致密油地位和影响

1.2.1 全球致密油资源布局

全球约有 66 个盆地赋存有致密油,资源总储量为 $67\,840 \times 10^8$ 桶,主要分布在北美、亚太、中亚和中南美^[11],2/3 以上的致密油可采资源集中于美国、俄罗斯、中国、阿根廷、利比亚、阿拉伯等 6 个国家和地区^[2,12]。美国是致密油资源开发最成功地区,2015 年美国致密油日产量达 460 万桶,年产量达 2.1 亿吨,占美国石油产量的 48%。俄罗斯、加拿大、中国等也成功开发致密油。目前,全球已经形成以北美的美国和加拿大为中心的西半球和以亚洲东部的中国为中心的东半球致密油勘探开发分布格局。

1.2.2 中国致密油全球地位与影响

自 20 世纪 60~70 年代以来,中国就在鄂尔多斯、四川、松辽等盆地中发现了特低和超低孔渗的石油资源,实际上就是现在所说的致密油^[1,4]。目前,中国已经在四川、柴达木等 6 个盆地获得致密油勘探开发的突破,在鄂尔多斯、准噶尔、松辽盆地形成了 3 个超亿吨级规模储量区。中国主要盆地的致密油分布面积积达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,地质资源总量为 $(106.7 \sim 111.5) \times 10^8 \text{ t}$ (图 1)^[1,5,13],已成为东半球致密油勘探开发中心。

中国重视致密油理论研究与技术开发工作,尤其在致密油地质特征、成藏富集、甜点预测等基础理论与关键技术攻关领域已经取得重大突破,发展和完善了连续型油气聚集理论^[14-15]。技术方面,中国成功研发了复杂地质条件下致密油储层地震预测、致密油“七性”测井评价、致密油水平井优快钻探、致密油水平井体积压裂四大致密油勘探开发关键技术,初步形成了中国特色的致密油勘探开

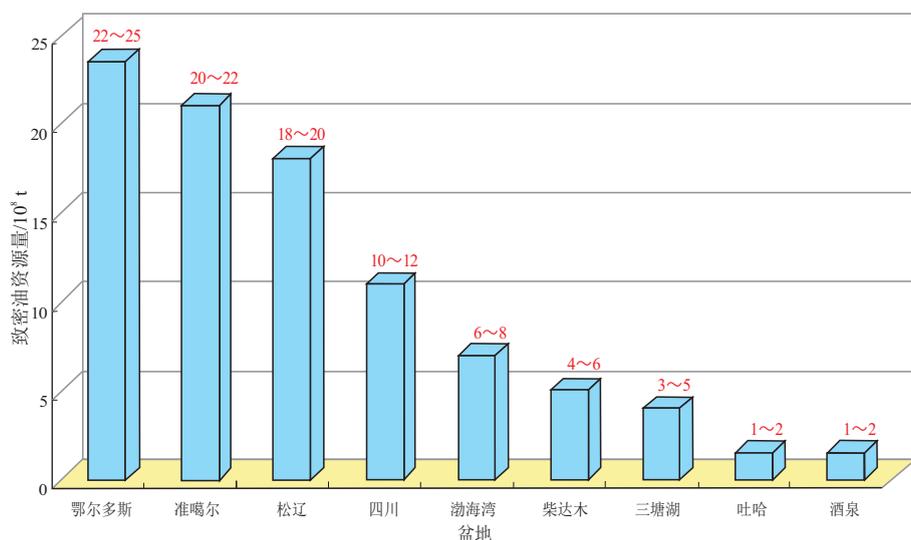
图1 中国主要盆地致密油资源量预测^[5]

Fig.1 Prediction of tight oil resources in main basins in China

发技术系列^[4]。中国致密油理论研究与技术开发比肩世界领先水平。

目前中国致密油研究进展迅速,但仍存在以下问题:①成果比较分散、零碎,缺乏提炼与总结。②缺乏完整性和统一性,没有用一条主线很好地将中国致密油独特的特征和共性整合起来,以形成一个相对系统的、有机的、完整的陆相致密油理论认识。本文的目的,是想通过剖析中国西、中和东部典型致密油盆地以及对比中国与美国致密油盆地的成盆、成烃、成藏、富集与分布特征,总结中国致密油盆地形成演化与分布宏观规律及其主控因素,揭示和对比中国与美国致密油盆地致密油富集与分布的差异性及其主要原因,在美国致密油成藏与分布规律的启发下,进一步整合中美致密油成藏富集的理论认识,更好地指导中国的致密油地质研究与勘探开发。

2 中国主要致密油盆地地质特征

2.1 中国主要致密油盆地分布

致密油盆地属于一类特殊的含油气盆地,借鉴含油气盆地的概念^[16-19],本文将致密油盆地定义为已经进行过致密油地质评价,且具有致密油勘探开发潜力的含油气盆地。

目前,中国在松辽、渤海湾、鄂尔多斯、四川、柴达木、准噶尔、三塘湖、吐哈、酒泉等9个含油气盆地中揭示致密油并获得致密油地质资源量,它们主要分布于中国的北方;从东西方向上看,中国致密油盆地呈条带状展布,中国中、东部的致密油盆地呈北北东、北东—北北东向条带状展布,中国西部

的致密油盆地总体呈北西西向展布(图2)。

从9个致密油盆地致密油产层来看,中国致密油主要分布于二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系和古近系的陆相盆地中,埋藏深度介于1 200~4 950 m,主要分布于2 500~4 000 m。由西到东,致密油层位总体由老至新。

2.2 中国主要致密油盆地地质特征

由于中国大陆在大地构造位置上的特殊性,导致了其致密油盆地具有独特的大地构造背景,即三面受挤^[16],进而决定了其具有断裂发育、陆相为主的基本地质特征和独特的构造、沉积、成藏规律。

2.2.1 中国致密油盆地的大地构造背景

大地构造位置上,中国大陆及陆架自从晚古生代以来,长期处于东部太平洋、西南部印度、北部西伯利亚三大板块越来越强烈的挤压、俯冲、碰撞作用之中,形成了东部、中部、西部构造特征明显不同的中、新生界断裂控制的陆相含油气盆地^[17-18],包括中国的9个致密油盆地,奠定了断裂发育、陆相沉积的独特的中国致密油盆地基本地质特征。

2.2.2 中国大陆构造分区及致密油盆地形成演化机制

李德生^[16]结合中国大地构造背景与不同区域构造演化历史,以中国中部的两条近南北向大地构造分区线为界,由西向东将中国大陆分为构造特征明显差异的西部、中部和东部三大构造区(图3,剖面位置见图2)。

印支运动以来,西部构造区受印度板块向东北的强烈俯冲、挤压和北部西伯利亚板块的阻挡,导致了众多的北西向延伸的大型逆冲断裂带的产生,控制了包括准噶尔、柴达木、三塘湖、酒泉、吐哈致密油

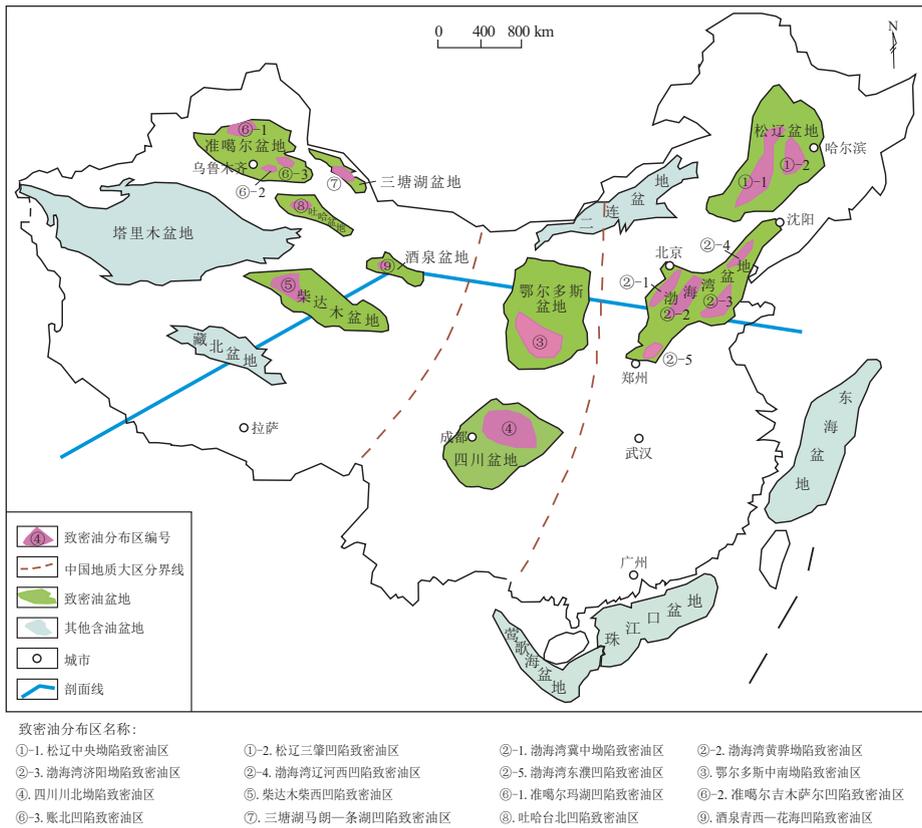


图 2 中国陆上主要致密油盆地和致密油区分布
Fig.2 Main tight oil basins and tight oil area distribution in China continent

盆地在内的中国西部含油气盆地的形成与演化^[20]。

燕山—喜马拉雅运动期间,东部构造区受太平洋板块向西俯冲影响,地幔上拱、地壳拉伸,在区域拉张应力场作用下形成了包括松辽、渤海湾致密油盆地在内的中国东部断陷盆地群和断拗叠合盆地群^[16]。断裂对致密油盆地形成、演化具有重要的控制作用。

中部构造区位于东、西部构造区之间,形成于燕山运动,因相对远离太平洋、印度和西伯利亚三大板块,构造运动相对较弱,是中国最稳定的地区。

分布于中部构造区的致密油盆地包括鄂尔多斯盆地和四川盆地,除了盆地边界断裂控盆明显外,盆地内断裂不发育,褶皱不强烈,形成大型陆相湖盆,致密油分布面积大,如鄂尔多斯盆地三叠系长 6~10 段,致密油分布面积达 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

由此可知,中国致密油盆地的形成演化首先受板块运动的制约,进而受盆缘断裂控制,致密油分布的层位与构造分区、盆地构造演化时期有关,由西向东,致密油层位抬升,跨度减少。图 3 是对上述内容的总结,反映中国大陆结构与致密油盆地地形

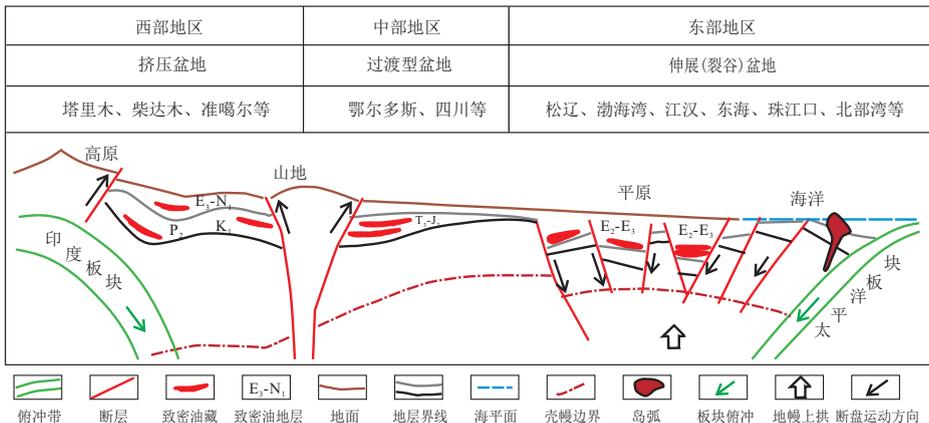


图 3 中国大陆结构、致密油盆地形成机制与分布模式

Fig.3 Structure, formation mechanism and distribution pattern of tight oil basins in China continent

成机制与分布的模式。

3 中国主要致密油盆地成藏特征

3.1 中国主要致密油盆地致密油分布特点

中国大陆 14 个主要的含油气盆地中有 9 个发现了规模致密油藏,划分出 16 个致密油分布区(图 2),致密油分布区致密油均分布于盆地次级凹陷(断陷)的负向构造单元中,成区成带分布。纵向上主要分布在二叠系到新近系的各个地层中,具有由西向东层位变新的趋势(图 3,表 1)。

3.2 中国主要致密油盆地烃源岩基本特征

中国致密油藏形成于不同构造背景陆相湖盆的深湖—半深湖相细粒沉积体系中(表 2 中国部分),因此,要实现石油大规模充注到致密储层中聚集成藏,必须要有一定规模的进入生油窗的优质烃源岩。从中国的 9 个致密油盆地烃源岩的评价指标看(表 2 中国部分),有以下特点:

①烃源岩岩石类型较多,但以油页岩、暗色泥页岩、暗色云泥岩为主。西部致密油盆地烃源岩油页岩相对不发育,但普遍含碳酸盐岩,混合沉积特

征相对显著。

②有机质品质较好。以 I—II₁型和 II₁型为主,总有机碳含量平均值大于 2%。中、东部致密油盆地烃源岩的品质总体好于西部致密油盆地。

③有机质演化适中。均处于生油窗,但中、东部致密油盆地烃源岩成熟程度相对高于西部,更有利于致密油藏的形成。

④不同致密油盆地烃源岩特征的差异与变化规律,与其所在构造区的构造稳定性、地温梯度等因素以及致密油盆地的类型有关。

3.3 中国主要致密油盆地储层基本特征

中国致密油盆地独特的大地构造背景与演化历史,导致了陆相沉积、地层破碎、岩性复杂、相变剧烈的总体储集特征,不同致密油盆地具有不同的致密油储层特点及其变化规律(表 3 中国部分)。

①致密油储层岩性复杂,岩石类型多。各种粒级的砂岩、粉砂岩甚至砾岩及其过渡性岩石组成的碎屑岩,灰岩、白云岩组成的碳酸盐岩,以及碎屑岩、碳酸盐岩混合形成的各种混积岩,都可以成为致密油储层。甚至火山岩也可以成为致密油储层

表 1 中美主要致密油盆地致密油藏地层分布

Table 1 Longitudinal distribution of tight oil reservoirs in main tight oil basins in China and USA

地层系统		中国									美国					
系	统	准噶尔	柴达木	酒泉	三塘湖	吐哈	四川	鄂尔多斯	渤海湾	松辽	洛杉矶	威利斯顿	西湾	沃斯堡	丹佛	阿巴拉契亚
古近系	中新统										蒙特雷 3 000-8 000 m					
	渐新统								沙河街组3段 1 200-2 550 m							
	始新统		下干柴沟组 3 000-4 000 m							孔店组2段 3 500-4 200 m						
	古新统															
白垩系	上白垩统												鹰滩 1 200-4 500 m		奈尼布拉勒 7 000-9 000 m	
	下白垩统			下沟组 2 850-4 950 m						青山口组, 泉头组 1 200-2 400 m						
侏罗系	上侏罗统															
	中侏罗统					七克台组 1 000-4 000 m	凉高山组 2 100-2 600 m									
	下侏罗统						大安寨组 2 100-2 600 m									
三叠系	上三叠统								延长组6-10段 1 800-3 000 m							
	中三叠统															
	下三叠统															
二叠系	上二叠统	芦草沟组 2 700-3 320 m			芦草沟组 1 500-3 500 m											
	下二叠统															
石炭系	上石炭统															
	下石炭统													巴内特 1 800-2 700 m		
泥盆系	上泥盆统											巴肯 2 590-3 200 m				俄亥俄, 马赛勒斯 1 290-2 600 m
	中泥盆统															
	下泥盆统															
奥陶系	上奥陶统															尤蒂卡 3 000-4 000 m

黄色:碎屑岩储层;蓝色:碳酸盐储层;粉色:混合沉积岩储层

表 2 中美主要致密油盆地类型与沉积背景及烃源岩基本特征对比

Table 2 Comparison of types, sedimentary backgrounds and source rock characteristics of major tight oil basins in China and USA

国家(相)	中国(陆相)										美国(海相—海陆过渡相)					
	西部					中部		东部			西部		中部		东部	
盆地名称与咸化特征	准噶尔(咸化湖)	柴达木(咸化湖)	酒泉(咸化湖)	三塘湖(咸化湖)	吐哈(咸化湖)	四川(微咸化湖)	鄂尔多斯(淡水湖)	渤海湾(淡水湖—咸化湖)	松辽(淡水湖)	洛杉矶	威利斯顿	西湾	沃斯堡	丹佛	阿巴拉契亚	
盆地类型	挤压凹陷	挤压凹陷	挤压凹陷	挤压凹陷	挤压凹陷	过渡	过渡	拉张断陷	拉张断陷	拉张断陷	克拉通	裂谷断陷	挤压前陆	挤压前陆	挤压前陆	
源储沉积背景	浅湖云坪—三角洲前缘—半深湖	浅湖沙滩—三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	介壳滩—三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	三角洲前缘—半深湖	浅海陆架—潮间湖—带—半深海	浅海—半深海	浅海—碳酸盐岩台地—半深海	三角洲前缘—半深海	
层位	二叠系	古近系	白垩系	二叠系	二叠系	二叠系	三叠系	古近系	白垩系	新近系	泥盆系—石炭系	白垩系	石炭系	白垩系	奥陶系—泥盆系	
烃源岩主要岩性	暗色泥岩、云质泥岩	暗色泥岩、凝灰岩	暗色泥岩、云质泥岩	暗色凝灰岩、灰质白云岩、泥岩	暗色泥岩、灰岩、以暗色泥岩为主	暗色油页岩、凝灰岩、薄层灰岩	暗色油页岩、泥岩	暗色泥灰岩、油页岩	暗色泥灰岩、油页岩	暗色泥灰岩、油页岩	暗色泥灰岩、油页岩	黑色、暗色海相页岩	黑色、暗色海相泥灰岩(及海相页岩)	黑色硅质页岩(石灰质页岩)、黑色、暗色海相泥灰岩、石英质页岩和白云石页岩	暗色泥灰岩、黑色页岩	富含有机质的钙质黑色页岩和灰质页岩
TOC%	3.5(3-8)	0.70(0.4-1.2)	2.08(1.40-2.75)	3.87(0.01-18.79)	2.5(1-4)	1.9(0.7-3.5)	8.8(3.8-13.8)	4(2-6)	3.4(1.5-6.0)	1.5(2-3)	12(10-14)	4.5(5-25)	4-8	5(2-8)	6.5(3-10)	
R ₁ %	0.90(0.6-1.6)	0.85(0.6-1.2)	0.95(0.8-1.1)	0.8(0.5-1.1)	0.7(0.5-0.9)	1.05(0.6-1.5)	0.95(0.70-1.16)	1.2(0.6-1.8)	1.25(0.5-2.0)	0.7(0.7-1.1)	0.8(0.6-1.3)	1.2(0.5-1.3)	1.1(0.6-1.6)	0.6-0.9	1.2(0.6-1.8)	
主要有机质类型	I-II ₁	I-II ₂ 部分II ₃	I-II ₁	I-II ₁	II ₂	II	I-II ₁	II ₁	I-II ₁	II	I	II	II	II	II	

注:表中算式含义为:平均值(最小值-最大值)。

表 3 中美主要致密油盆地储层基本特征对比

Table 3 Correlation of basic reservoir characteristics of major tight oil basins in China and USA

国家	中国										美国					
	西部					中部		东部			西部		中部		东部	
盆地	准噶尔	柴达木	酒泉	三塘湖	吐哈	四川	鄂尔多斯	渤海湾	松辽	洛杉矶	威利斯顿	西湾	沃斯堡	丹佛	阿巴拉契亚	
主要岩性	云质粉砂岩与砂屑岩	中细砂岩、凝灰岩、泥晶颗粒灰岩	云质粉砂岩、泥云岩	以沉凝灰岩为主要储层	泥灰岩、白云质灰岩或含白云质泥岩	以介壳灰岩、云质为主,也有细、粉砂岩	细、粉砂岩	泥灰岩、碳酸盐岩、砾岩	细、粉砂岩、泥质粉砂岩	砂岩、粉砂岩夹火山灰层的砾岩和放射虫页岩	致密砂岩、粉砂岩	致密灰岩(泥灰岩)	致密碳酸盐岩	致密泥灰岩	致密钙质灰岩和灰质页岩	
平均孔隙度/%	11(3-16)	6(3-9)	4.2	18(16-20)、高孔低渗	2.5(1-12)	2.5	8.6(4.8-15.5)	3.95(5-15)	8(2-15)	2.5(2-3)	10-13	6(2-12)	6(2-10)	7.5(5-10)	5(4-5)	
裂缝发育情况	层理缝、微裂缝发育	构造缝发育	构造缝、微裂缝发育	层理缝、构造缝、微裂缝发育	构造缝、晶间微孔及溶蚀微孔	构造缝、微裂缝孔	裂缝总体不发育	裂缝发育	裂缝总体不发育	裂缝发育	构造缝、区域缝、超压排烃缝发育	层理缝、微裂缝发育、构造缝不发育	微裂缝发育、构造缝发育	裂缝发育	微裂缝发育	
平均渗透率/10 ⁻³ um ²	0.01(<0.1)	0.45(0.05-1)	3.4(0.7-4.7)	0.1	0.4(0.001-1)	0.22(0.01-2.2)	4.00(0.2-4.6)	0.8(0.6-1.0)	0.01-1.0	0.18(0.003-0.4)	0.285(0.07-0.5)	0.000 1(0.000 1-0.002 5)	0.000 1(0.000 1-0.002 5)	0.002 2(0.000 8-0.003 6)		
有效厚度/m	40	160	130	90(60-120)	30(30-130)	150	60	120	70	580(300-850)	11(2-20)	4	150(60-240)	320(90-550)	33(15-50)	
致密油储层分布面积/10 ⁴ km ²	0.85	0.65	0.6	0.7	0.55	9(7-11)	3	0.8	3.9	0.86	7	1.3				

注:表中算式含义为:平均值(最小值-最大值)。

(如三塘湖致密油盆地的沉凝灰岩)。西部构造区致密油盆地致密油储层以混积岩为主,渤海湾盆地发育碳酸盐岩致密油储层。

②构造稳定性、水介质、岩性影响储层的物性条件。大型稳定的淡水致密油盆地(如鄂尔多斯、松辽盆地)储层孔隙度要普遍高于断裂发育的中、小型半咸化—咸化致密油盆地储层孔隙度。单一岩性有利于增大储层孔隙空间,复杂岩性易形成各种裂缝(微裂缝),有利于改善渗透条件。中、小型半咸化—咸水致密油盆地储层渗透率要普遍高于大型淡水致密油盆地储层渗透率,这是因为前者碳酸盐岩含量相对高,且断裂相对发育。

③致密油盆地的储层规模受其所在区域构造位置控制,位于中部构造区的致密油盆地储层规模最大,其次是西部构造区挤压(前陆)凹陷致密油发育区,东部断陷致密油发育区的储层规模最小。

3.4 中国致密油盆地成藏富集特征

3.4.1 中国致密油盆地源储组合类型

源储组合是致密油成藏与富集的基本要素和

单元,不同的源、储组合关系具有不同的致密油成藏机制和致密油分布富集结果。目前有不少学者从不同角度对中国的源储组合特征与类型进行了研究^[21-22],其主要问题是只考虑了源内或邻源致密油储层与烃源岩的空间关系,没有考虑源上隔层近源致密油储层与烃源岩的时空匹配关系,也没有考虑裂缝发育的烃源岩本身对致密油成藏富集的贡献。表 4 是本文依据致密油概念和内涵,考虑已有方案存在的缺陷,结合中国陆相致密油自身特点和特殊的地质条件,在前人认识基础上拟定的陆相致密油源储组合划分方案(共划分出 3 类 12 种)及其典型致密油藏实例。图 4 是一条横跨鄂尔多斯盆地延长组致密油区东西向的致密油藏源储组合及其成藏与分布综合剖面,反映了源储组合类型及对致密油成藏的控制作用。

3.4.2 中国主要盆地致密油藏成藏富集特征

在前人成果基础上^[21-23],以源储组合划分结果为基础,在成藏充注动力、运移通道、成藏主控因素等方面,本文解剖对比了中国 9 个盆地典型致密

表 4 中国陆相致密油源储组合类型划分与典型致密油藏
Table 4 Classification of continental tight oil source-reservoir assemblages and typical tight reservoirs in China

源储关系	源储具体空间关系	源储间是否有隔层	运移通道	源储组合类型 (及对应的致密油藏类型)	示意图	典型实例
源储共生	源储一体	无隔层	孔缝喉网络	(源储)薄互层		准噶尔盆地吉木萨尔油藏
				源缝一体		四川盆地川北拗陷油藏
源储紧邻	源在上, 储在下	无隔层	孔缝喉网络	(简单)源上型		松辽中央拗陷高台子油藏
	源在上下, 储在中间			(简单)源内型		酒泉盆地青西凹陷油藏
	源在下, 储在上			(简单)源下型		渤海湾盆地东鹿断陷油藏
	源储侧向紧邻			源侧披覆型		柴达木盆地扎哈泉致密油藏
源储近临	源在下, 储在上	有隔层	裂缝	缝运源上型		鄂尔多斯中南拗陷长6'油藏
				断运源上型		三塘湖盆地马朗一条湖油藏
	源在上下, 储在中间			缝运源内型		鄂尔多斯中南拗陷长7'油藏
				断运源内型		吐哈盆地台北凹陷致密油藏
	源在上, 储在下			缝运源下型		酒泉盆地青西凹陷致密油藏
断运源下型		松辽中央拗陷泉头致密油藏				

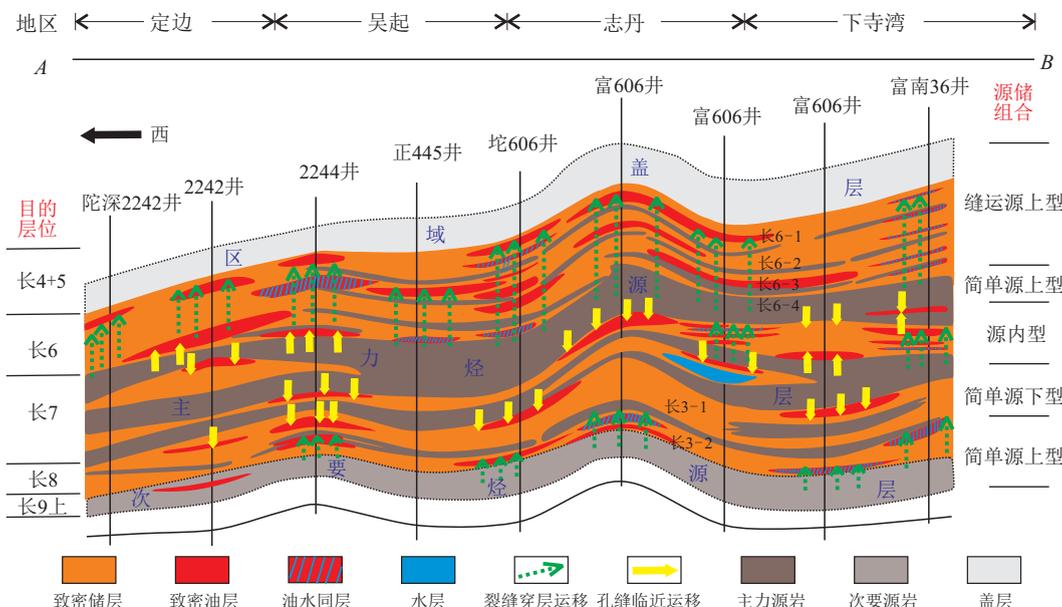


图 4 鄂尔多斯盆地延长组致密油源储组合特征及成藏分布综合剖面

Fig.4 Profile showing characteristics of tight oil source-reservoir assemblage and hydrocarbon accumulation and distribution in Yanchang Formation, Ordos Basin

油的成藏特征(表 5 中国部分)。

①相对碎屑岩和碳酸盐岩致密油,中国混积岩致密油的源储组合类型多而复杂,源储共生类、邻

源类、近源类都可能同时存在于混积岩储层的致密油成藏背景中,从而导致其成藏条件、成藏机制与成藏模式也比较复杂多样;西部构造区致密油盆地

东部以发育大型盆地为主,数量相对较少^[24-26]。

4.2 美国致密油盆地分布

北美是致密油勘探开发的发源地,又是全球致密油主要产区,而北美的致密油又主要产自美国。目前美国已发现威利斯頓(Williston),西湾(Western Gulf)和洛杉矶(Los Angeles)等近10个致密油盆地,并在其中20余个致密油富集区获得产量(图5)^[6,27-34],其致密油资源主要分布于6个盆地的9个页岩层系之中,即西湾盆地中的Austin Chalk组和Eagle Ford组、威利斯頓盆地中的Bakken组、粉河(Powder River)盆地中的Niobrara组、二叠纪(Permian)盆地中的Avalon/Bone Springs组和Straberry组、阿纳达科(Anadarko)盆地中的Woodford组、圣华金(San Joaquin)/洛杉矶盆地中的Monterey/Santos组以及阿巴拉契亚(Appalachian)盆地中的Utica组。其中,Bakken组、Eagle Ford组、Avalon/Bone Springs组和Monterey/Santos组是致密油的主要富集层位^[23-24]。平面上,这些致密油盆地呈U形分布于美国东部、南部、中西部和西北部^[27];层位上,美国的致密油主要赋存于上奥陶统一新近系,而中国的致密油主要赋存于二叠系—古近系(表1)。

4.3 中美致密油成藏特征共性与差异

分析与对比中美致密油盆地的基本特征,不仅在致密油的外延(即页岩油的归属),而且在致密油的基本地质特征和成藏特征方面都有明显不同。

本文挑选了中国9个、美国6个共15个典型致密油盆地,对其基本地质特征与致密油成藏条件进行了分析,分别从致密油的盆地类型、沉积特征、烃源岩条件(表2)、储集条件(表3)和成藏机制与富集规律(表4)等多个方面进行对比,表5是中美两国致密油盆地主要特征综合对比指标和结果。

由表5可知,中美致密油盆地既有共性,又有差异。主要共性是,均形成于相对稳定的构造背景中,分布于负向构造单元的中心及其周边的斜坡区,赋存于最大湖(海)泛面及其上下的细粒沉积体系中,成熟优质烃源岩与致密储层大面积互层或紧邻或近邻,微—纳米孔缝喉传导与聚集系统,非浮力驱动短距离运聚成藏,相对高孔高渗甜点富集。由于中美大地构造背景与沉积演化特征的不同,导致致密油盆地特征存在差异,主要表现在以下几个方面:

①中国致密油盆地是陆相盆地,构造运动相对强烈,拉张、挤压和过渡型盆地都有发育;美国致密油盆地是海相盆地,构造稳定性相对较好,主要发育克拉通盆地和挤压型盆地。

②中国致密油盆地的储层类型多而复杂,储集条件总体要好于美国,但烃源岩的生烃条件总体要比美国差。

③中国致密油成藏机制与富集模式独特,断裂控藏、裂缝富集特征明显,源储组合、孔缝喉传导体系比美国更丰富多彩。

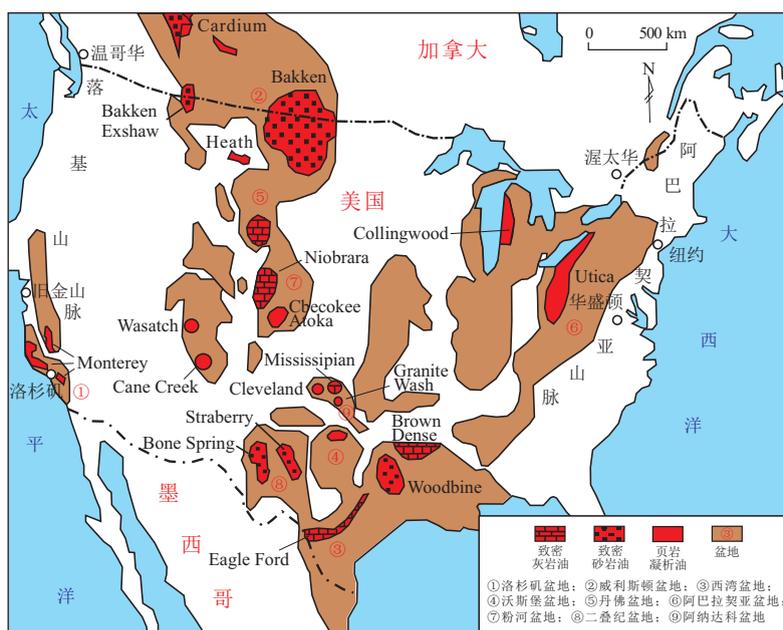


图5 美国致密油盆地与致密油藏分布

据文献^[27]。

Fig.5 Distribution of tight oil basins and favorable areas in USA

④中国致密油藏的含油饱和度相对较低,原油密度相对较高,流动性相对较差,油藏压力相对较低,致密油藏开发参数总体差于美国致密油藏。

⑤中国致密油盆地和致密油藏规模比美国小,致密油发育的层位各时间跨度比美国少和小,美国致密油资源的勘探开发潜力要大于中国致密油资源。

中美致密油盆地地质特征的差异的根本原因在于两者具有不同的大地构造背景及其沉积演化过程,即中国致密油盆地总体处于三大板块长期多期构造作用之中,断裂发育,陆相沉积,代表陆相致密油盆地的基本风格;而美国致密油盆地总体处于两个大板块之间,构造相对稳定,海相沉积,代表了海相致密油盆地的基本特征。

5 结论

(1)中国目前主要在鄂尔多斯、松辽、四川、准噶尔等 9 个致密油盆地中发现了 16 个致密油区带,平面上分布于中国的东部、中部和西部三个构造区,纵向上赋存于从二叠系到古近系的地层中。

(2)中国的致密油盆地是在东边太平洋、北边西伯利亚、西南边印度三大板块的长期共同作用下形成与演化的,断裂控盆控烃、陆相沉积、岩性致密且非均质性强、裂缝普遍发育是中国致密油盆地的基本地质特征。

(3)由三大板块向中国板块碰撞造成的由西向东,构造运动由早到晚,构造应力由压扭到张扭,构造与断裂活动由强到弱再到强,沉积演化由古生代—新生代多旋回到新生代单一旋回,古水介质由咸到淡再到咸再到淡,地温梯度由低到高,这些特点及其变化特征决定了中国的致密油盆地在不同构造区其成盆、成烃、成储、成藏、分布独有的特征及由西向东这些特征有规律的变化趋势。

(4)中美致密油盆地既有共性,又有差异,主要不同在于构造的稳定性与沉积相类型,并导致了在烃源岩品质、储层物性、成藏与富集多样性及致密油潜力等方面的不同。根本原因是中、美所处大地构造位置及其构造、沉积演化背景的差异。

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] CLARKSON C R,PEDERSEN P K.Production analysis of western

Canadian unconventional light oil plays[C]//Canadian Unconventional Resources Conference.Calgary:SPE,2011.

- [3] MADDEN B,VOSSOUGH S.US shale gas and tight oil boom:the opportunities and risks for America[C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition.Jakarta:SPE,2013.
- [4] 赵政璋,杜金虎.致密油气[M].北京:石油工业出版社,2012:1-199.
ZHAO Zhengzhang,DU Jinhui.Tight oil and gas[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2012:1-199.
- [5] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
ZOU Caineng,ZHU Rukai,WU Songtao,et al.Types,characteristics,genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations:taking tight oil and tight gas in China as an instance[J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(2):173-187.
- [6] 胡素云,朱如凯,吴松涛,等.中国陆相致密油效益勘探开发[J].石油勘探与开发,2018,45(4):737-748.
HU Suyun,ZHU Rukai,WU Songtao,et al.Profitable exploration and development of continental tight oil in China[J].Petroleum Exploration and Development,2018,45(4):737-748.
- [7] 刘文锋,张旭阳,盛舒遥,等.致密油产量递减分析新组合方法研究:以玛湖致密油藏为例[J].油气藏评价与开发,2021,11(6):911-916.
LIU Wenfeng,ZHANG Xuyang,SHENG Shuyao,et al.Research on a new combination method of production decline analysis for tight oil:cases study of Mahu tight reservoir[J].Reservoir Evaluation and Development,2021,11(6):911-916.
- [8] 白军辉.三肇地区致密油成藏主控因素与成藏模式[J].特种油气藏,2021,28(3):54-61.
BAI Junhui.Main controlling factors and modes of tight oil accumulation in Sanzhao area[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2021,28(3):54-61.
- [9] 唐维宇,尚云志,SHENG James J,等.大庆油田敖南区块扶余油层致密油提高采收率潜力评价[J].断块油气田,2021,(1):51-56.
TANG Weiyu,SHANG Yunzhi,SHENG James J,et al.Evaluation of the EOR potential of the Fuyu tight oil reservoir in Aonan area of Daqing Oilfield[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2021,(1):51-56.
- [10] 张冬琳,COFFEY Matthew,唐友军,等.致密油/凝析油中的轻烃地球化学特征:以美国伍德福德—密西西比油气区带为例[J].断块油气田,2020,27(4):438-442,453.
ZHANG Donglin,COFFEY Matthew,TANG Youjun,et al.Geochemical characteristics of light hydrocarbons in tight oil/condensate oil;a case study of Woodford-Mississippian oil play in U.S.A.[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2020,27(4):438-442,453.
- [11] 张君峰,毕海滨,许浩,等.国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义[J].石油学报,2015,36(2):127-137.
ZHANG Junfeng,BI Haibin,XU Hao,et al.New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development[J].Acta Petrolei Sinica,2015,36(2):127-137.
- [12] FATTOUH B,SEN A.The US tight oil revolution in a global perspective[M].Oxford:University of Oxford,2013:1-12.
- [13] 邹才能,陶士振,杨智,等.中国非常规油气勘探与研究新进展

- 展[J].矿物岩石地球化学通报,2012,31(4):312-322.
- ZOU Caineng,TAO Shizhen,YANG Zhi, et al.New Advance in unconventional petroleum exploration and research in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012, 31(4):312-322.
- [14] 邹才能,陶士振,侯连华,等.非常规油气地质[M].2版.北京:地质出版社,2013:1-58.
- ZOU Caineng,TAO Shizhen,HOU Lianhua, et al.Unconventional petroleum geology [M].2nd ed. Beijing: Geological Publishing House,2013:1-58.
- [15] 杜金虎,何海清,杨涛,等.中国致密油勘探进展及面临的挑战[J].中国石油勘探,2014,19(1):1-9.
- DU Jinhui,HE Haiqing,YANG Tao, et al.Progress in China's tight oil exploration and challenges[J].China Petroleum Exploration,2014,19(1):1-9.
- [16] 李德生.中国含油气盆地的构造类型[J].石油学报,1982(3):1-12.
- LI Desheng.Tectonic Types of oil and gas basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica,1982(3):1-12.
- [17] 罗志立,李景明,刘树根.中国板块构造和含油气盆地分析[M].北京:石油工业出版社,2005:1-32.
- LUO Zhili,LI Jingming,LIU Shugen.Plate tectonic analysis of petroliferous basins in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2005:1-32.
- [18] 翟光明,王世洪,靳久强.论块体油气地质体与油气勘探[J].石油学报,2009,30(4):475-483.
- ZHAI Guangming,WANG Shihong,JIN Jiuqiang.Discussion on block petroliferous geologic body and oil-gas exploration [J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(4):475-483.
- [19] 陈发景,汪新文.中国中、新生代含油气盆地成因类型、构造体系及地球动力学模式[J].现代地质,1997,11(4):409-424.
- CHEN Fajing,WANG Xinwen.Genetic types, tectonic systems and geodynamic models of Mesozoic and Cenozoic oil- and gas-bearing basins in China [J]. Geoscience, 1997, 11(4):409-424.
- [20] 何登发,李德生,吕修祥.中国西北地区含油气盆地构造类型[J].石油学报,1996,17(4):8-18.
- HE Dengfa,LI Desheng,LÜ Xiuxiang.Tectonic types of petroliferous basins in NW China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(4):8-18.
- [21] 杨玉华.三肇凹陷扶杨油层凹陷区上生下储式源储组合油分布规律及其控制因素[J].大庆石油学院学报,2009,33(2):1-5.
- YANG Yuhua.Oil distribution law and its influence factors in combination of generation upper and reservoir lower of depression; a example of FY oil layer in Sanzhao Depression [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute,2009,33(2):1-5.
- [22] 易立.库车坳陷前陆冲断带断源储盖组组合样式及其对成藏的控制[J].中国石油勘探,2013,18(5):10-14.
- YI Li.Fault-source-reservoir-cap combinations and their control on accumulation in foreland thrust belt of Kuqa Depression [J]. China Petroleum Exploration,2013,18(5):10-14.
- [23] 邱振,李建忠,吴晓智,等.国内外致密油勘探现状、主要地质特征及差异[J].岩性油气藏,2015,27(4):119-126.
- QIU Zhen,LI Jianzhong,WU Xiaozhi, et al.Exploration status, main geologic characteristics and their differences of tight oil between America and China [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(4):119-126.
- [24] 白国平,邱海华,邓舟舟,等.美国页岩油资源分布特征与主控因素研究[J].石油实验地质,2020,42(4):524-532.
- BAI Guoping, QIU Haihua, DENG Zhouzhou, et al. Distribution and main controls for shale oil resources in USA [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4):524-532.
- [25] 罗群,付立新,杨威,等.全球典型致密油盆地地质特征[M].北京:石油工业出版社,2021:126-131.
- LUO Qun, FU Lixin, YANG Wei, et al. Geological characteristics of typical tight oil basins in the world [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021:126-131.
- [26] 胡素云,李建忠,王铜山,等.中国石油油气资源潜力分析与勘探选区思考[J].石油实验地质,2020,42(5):813-823.
- HU Suyun, LI Jianzhong, WANG Tongshan, et al. CNPC oil and gas resource potential and exploration target selection [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5):813-823.
- [27] EIA. Outlook for U.S. shale oil and gas [R/OL]. 2014. <http://www.eia.gov/pressroom/presentations.cfm?year=2014>.
- [28] 方欣欣,郭迎春,王朋,等.致密油成藏研究进展与待解决的重要科学问题[J].中国地质,2020,47(1):43-56.
- FANG Xinxin, GUO Yingchun, WANG Peng, et al. The progress of research on tight oil accumulation and several scientific issues requiring further study [J]. Geology in China, 2020, 47(1):43-56.
- [29] EIA. Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays [R]. Washington: EIA, 2011.
- [30] MAUGERI L. The shale oil boom: a U.S. phenomenon [R]. Cambridge: Harvard University, 2013:55-63.
- [31] 郭鸣黎,陈艳,郑振恒,等.致密油藏可采储量概率快速评估方法;以红河油田长8油藏为例[J].石油实验地质,2021,43(1):154-160.
- GUO Mingli, CHEN Yan, ZHENG Zhenheng, et al. Rapid evaluation of probable recoverable reserves in tight reservoirs; a case study of Chang 8 reservoir (eighth member of Yanchang Formation) in Honghe oil field [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1):154-160.
- [32] 付小东,张天付,吴健平,等.二连盆地阿南凹陷白垩系腾格尔组致密油储层特征及主控因素[J].石油实验地质,2021,43(1):64-76.
- FU Xiaodong, ZHANG Tianfu, WU Jianping, et al. Characteristics and main controlling factors of tight oil reservoirs in Cretaceous Tengger Formation, A'nan Sag, Erlian Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1):64-76.
- [33] 夏东领,伍岳,夏冬冬,等.鄂尔多斯盆地南缘红河油田长8致密油藏非均质性表征方法[J].石油实验地质,2021,43(4):704-712.
- XIA Dongling, WU Yue, XIA Dongdong, et al. Characterization method of heterogeneity for Chang 8 tight reservoir in Honghe oil field, southern margin of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(4):704-712.
- [34] 余功铭,钟文新,余子牛,等.美国油气资源勘探开发潜力分析[J].世界石油工业,2019,26(4):24-31.
- YU Gongming, ZHONG Wenxin, YU Ziniu, et al. Analysis on exploration and development of oil and gas resources in the USA [J]. World Petroleum Industry, 2019, 26(4):24-31.