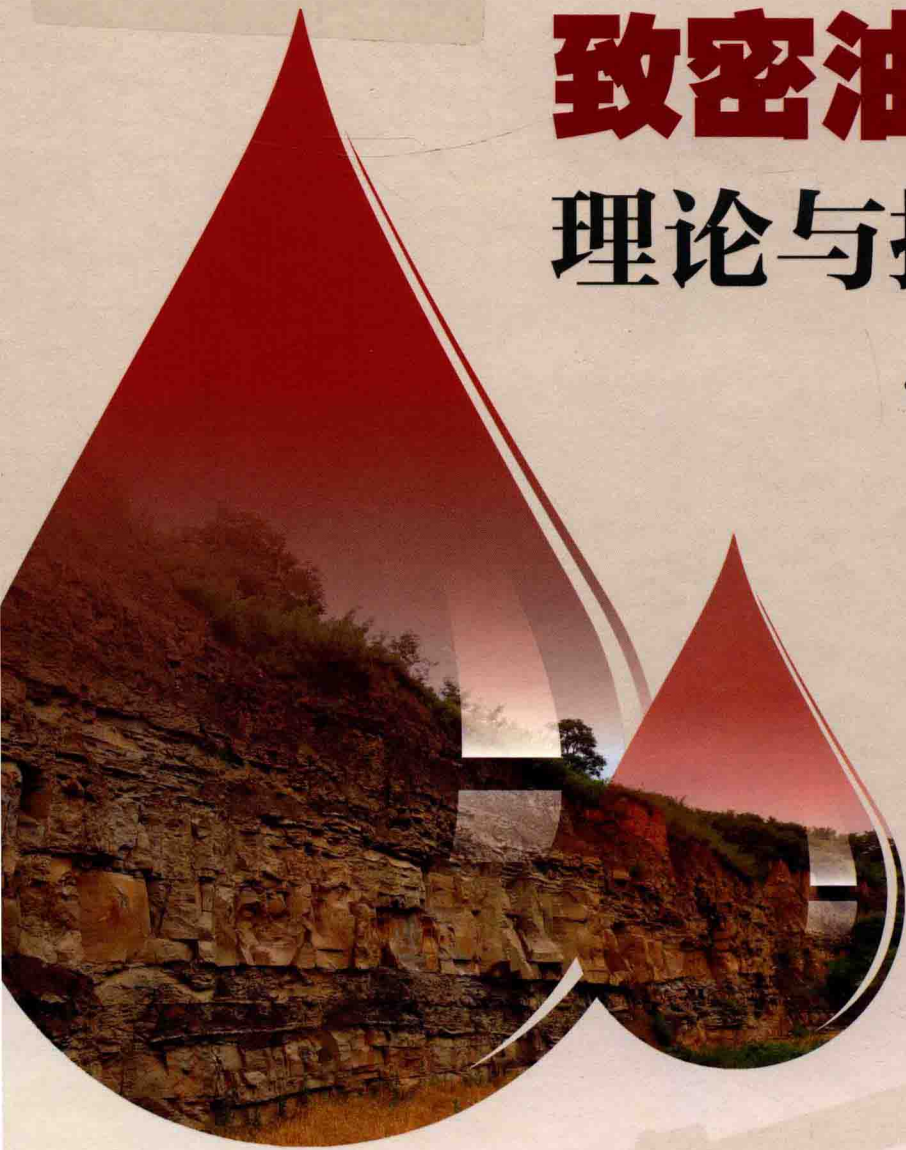


鄂尔多斯盆地 致密油勘探 理论与技术

付金华 著



科学出版社

鄂尔多斯盆地致密油勘探 理论与技术

付金华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对照国内外典型盆地致密油地质特征,系统总结了以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段为代表的陆相致密油勘探地质理论和配套技术新进展,阐述了近年来鄂尔多斯盆地致密油勘探实践取得重大突破的成功经验。本书在综合分析细粒沉积大面积展布、致密储层成藏机理及特征的基础上,预测了鄂尔多斯盆地致密油资源潜力,并对勘探成效进行阐述,将地质与地震、测井、钻完井等关键配套技术有机地融合,以进一步启发和指导非常规致密油气勘探的思路和方法,对中国非常规致密油气勘探起到一定的借鉴作用。

本书可供石油地质、储层地质、石油成藏等研究方向的科研人员 and 高等院校师生阅读,也可从事非常规油气科研生产管理的人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

鄂尔多斯盆地致密油勘探理论与技术 / 付金华著. —北京: 科学出版社, 2018. 5

ISBN 978-7-03-057189-2

I. ①鄂… II. ①付… III. ①鄂尔多斯盆地-致密砂岩-油气勘探-研究 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 084239 号

责任编辑: 焦 健 韩 鹏 / 责任校对: 张小霞

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 21 3/4

字数: 498 000

定价: 278.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

付金华教授所著的《鄂尔多斯盆地致密油勘探理论与技术》一书由科学出版社出版，相邀为序，我深感欣慰，欣然命笔。

鄂尔多斯盆地是我国第二大沉积盆地，也是我国最早发现石油并进行勘探开发的盆地之一，经过几代石油人艰苦创业、拼搏进取和科技创新，油气勘探开发取得了举世瞩目的成就，特别是2013年12月22日长庆油田年产油气当量跨上5000万吨历史新高点，标志着继大庆油田之后，我国又一颗能源巨星——长庆油田在鄂尔多斯盆地如期建成并保持持续稳产，目前成为我国最大的低渗透油气资源勘探开发基地。

致密油气在国外发展较早，特别是以美国为代表的世界页岩气、致密油“革命性发展的黄金十年”快速崛起，不仅扭转了美国持续24年石油产量的下降趋势，而且一举使美国的油气产量达到历史高峰并对世界能源供给产生了深远影响。中国石油人同样敢为人先、拼搏进取，在鄂尔多斯盆地，通过勘探开发地质理论与技术创新，发现并有效开发了世界单体规模最大的苏里格致密大气田。针对鄂尔多斯盆地以三叠系延长组长7段为代表的致密油资源，几代石油人从未放慢探索的脚步。从以“源”研究为主到“源储”一体攻关，从以地质研究为主到地震、测井、储层改造工艺一体化攻关，从以直井常规压裂改造试验到长水平段水平井大规模体积压裂试验区建设，数十年的艰苦探索终究没有辜负鄂尔多斯这个神奇的盆地：长庆油田开辟的西233等三个试验区完钻24口长水平段水平井（1500~1800m）试油平均日产高达100m³以上，目前累产突破30万吨，创造了我国致密油勘探的新奇迹，更为人称道的是在2014年，中国陆上探明了首个亿吨级致密油大油田——新安边油田，它在鄂尔多斯盆地诞生，标志着我国致密油勘探开发获得实质性突破。

《鄂尔多斯盆地致密油勘探理论与技术》一书，集中反映了中国石油长庆油田广大科技工作者在致密油勘探实践中的创造性思维和重要理论技术成果。一是明确了致密油的概念，系统总结了鄂尔多斯盆地致密油勘探发现历程；二是分析了鄂尔多斯盆地致密油形成的区域地质背景，尤其是对广泛发育的细粒沉积形成机制做了创新性的研究；三是对致密油储层特征进行了多尺度的分析，明确了致密储层成藏特征和富集机理；四是阐述了致密油勘探实践中形成的钻井、测井、地震、储层改造工艺等核心技术，非常值得借鉴推广；五是本书对鄂尔多斯盆地致密油资源量进行了客观地评价，明确了致密油勘探开发的前景。总之，这本专著反映了他们的辛勤劳动和丰硕成果，一些新思路、新理论、新方法以及相应的核心技术逐步走向成熟，这对我们揭开我国致密油气规模勘探的大幕无疑具有启示作用的。

在我国陆上各大油田进入开发的新时期，国家石油能源供给大量依靠进口的情况下，《鄂尔多斯盆地致密油勘探理论与技术》一书，必将对我国致密油的勘探开发起到重要的

指导作用，推动这一最现实的非常规石油资源实现规模勘探和效益开发！

长庆油田的快速发展令人惊叹，长庆石油人的顽强拼搏精神令人感动，长庆油田决策者们的创新管理令人起敬！

中国工程院院士



2018年1月8日

前 言

鄂尔多斯盆地是中国第二大含油气盆地，处于中国大陆中西部，是一个稳定沉降、拗陷迁移、扭动明显的多旋回沉积型克拉通含油气盆地。从 1907 年钻成中国陆上第一口油井——延 1 井，到 2013 年实现年产油气当量 5000 万吨，至 2017 年已持续稳产 5 年。累计 110 年间，鄂尔多斯盆地一直备受广大石油地质工作者和专家的关注。鄂尔多斯盆地石油资源主要富集于上三叠统延长组，素以低渗透闻名于世。“磨刀石上闹革命”的美誉也正因为“低渗透”而为众人所知。在几代石油人的艰苦努力下，先后实现了以安塞、靖安、西峰、姬塬油田为代表的低渗透 ($10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、特低渗透 ($1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、超低渗透 ($0.3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 油藏的规模勘探和效益开发，目前已经成为我国最大的低渗透油气资源勘探开发基地。

致密油气是指夹在或紧邻优质烃源岩层系的致密储层中，未经过大规模长距离运移而形成的油气聚集，一般无自然产能，需通过大规模压裂技术才能形成工业产能。鄂尔多斯盆地延长组长 7 段是最为典型的“源储共生”型致密油资源。2010 年以前，人们更为关注陆相湖盆“源”的研究，形成的广覆式生烃理论有效指导了大型低渗透岩性油藏的发现，对于与源共生的致密储层，受限于极低的渗透性（渗透率 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右）、较低的直井压裂产能（ $4 \sim 10 \text{t/d}$ ）和投产产能（小于 1t/d ），因而尚未打开规模勘探的局面。目前来看，促成鄂尔多斯盆地致密油勘探步入快速发展并取得重大突破的国内外影响因素有两个重要的方面：一是以美国为代表的世界页岩气、致密油“革命性发展的黄金十年”带来的启示。2011 年美国致密油年产量达到 3000 万吨，不仅扭转了其持续 24 年的石油产量下降趋势，而且对世界能源供给产生了深远的影响。二是中国石油勘探界的有识之士面对国家能源安全日益严峻的挑战和后备石油接替资源尚不明朗的新问题，针对中国非常规石油资源的勘探提出了“搞清资源、准备技术、突破重点、稳步推进”的勘探大原则，敏锐而适时地把握了勘探突破口。2011 年，在鄂尔多斯盆地延长组长 7 段部署阳平 1、阳平 2 两口 1500 米水平段水平井，借鉴体积压裂的理念，试油分别获得日产 124.51m^3 、 103.11m^3 的高产工业油流，极大地振奋了鄂尔多斯盆地实现致密油资源规模勘探的信心，完成由“必然王国”到“自由王国”这一质的飞跃。鄂尔多斯盆地从此步入常规低渗透和致密油并举发展的新局面。2011 年以来，以鄂尔多斯盆地为主战场，中国石油开展了为期五年的致密油勘探地质理论创新、核心配套技术攻关及致密油水平井试验区建设，取得了一批重大地质理论创新和技术突破，成功建成了西 233、庄 183、宁 89 三个致密油水平井体积压裂试验区，在中国非常规石油勘探中具有里程碑式的重要意义。为了系统总结这个阶段以鄂尔多斯盆地为代表的陆相致密油勘探地质理论进展、勘探突破和成功经验，撰写此书，以进一步启发和指导非常规油气勘探的思路和方法，相信会对包括鄂尔多斯盆地在内的中国非常规油气勘探起到一定的借鉴作用。

本书共分十一章,第一章至第六章以致密油地质理论创新为主线,围绕盆地致密油细粒砂岩形成机制和分布模式、储层致密机理与储集空间特征、致密油成藏机理和富集规律三个关键科学问题,通过系统介绍重力流沉积、致密油运聚、储层物性下限等地质理论与认识和微(纳)米孔喉识别与表征等核心技术,创新建立了陆相湖盆重力流沉积模式;精细刻画了富有机质泥页岩时空分布特征,总结广覆式分布的富有机质泥页岩的有机地球化学特征;揭示了致密储层储集空间及石油微观赋存本质;深化形成了“高强度生烃、持续充注、近源富集”的致密油成藏理论,明确了致密油富集规律。第七章至第十章以致密油关键配套技术攻关为主线,总结了致密油地震勘探面对盆地广泛分布的黄土塬地貌条件下的地震资料信噪比低等各种难点,在勘探实践中形成的有针对性的处理、解释、判识方法;致密油层钻井完井技术阐述了适合盆地地貌特征的三维井轨迹设计方法,介绍了针对致密油水平井提高固井质量的技术措施;着重分析了致密油勘探实践中“三品质”测井(源岩品质、储层品质、工程品质)的技术要点,体现了测井在致密油研究中对地质和储层改造工艺的指导性意义;重点介绍了具有长庆特色的致密油储层改造理念、工具、液体体系等行之有效的体积压裂技术。第十一章以致密油资源评价方法体系的建立为重点,结合对致密油资源量的分级评价结果,对盆地致密油的勘探开发前景提出展望。

本书在内容布局上围绕“理论认识、技术创新、勘探成效”三条主线,在编写方式上重视两个突出,一是突出国内外致密油研究新理论、新进展、新技术和新手段的集成应用,丰富和发展了鄂尔多斯盆地致密油研究中所形成的独具特色的理论和技术;二是突出非常规系统、多学科、一体化的综合研究新思维,打破专业间的门户界限,形成专业互补,力争为读者呈现一套较为完整的致密油勘探新思路和新方法,具有较强的实用性,希望能为我国从事和即将从事非常规油气勘探事业的有识之士提供有益的参考。

在鄂尔多斯盆地致密油勘探的实践过程中,广大科技工作者深深感受到这一潜在的非常规石油资源地质研究难度之大,技术攻关之艰辛,勘探工作之艰苦。此书的编写过程亦似再次经历了致密油勘探的过程,从无到有,从起步到收获,从迷茫不前到柳暗花明。在此向奋斗在鄂尔多斯盆地油气勘探战线的人们表示敬意,向关心和支持长庆油田稳步发展的读者朋友表示谢意。

本书编写过程中得到中国石油勘探开发研究院、北京大学、同济大学、西北大学、长江大学、中国石油大学(北京)、西安石油大学等单位的相关专家、学者的大力支持与帮助。参加本书编写的人员还有:徐黎明、牛小兵、石玉江、张文正、张矿生、冯胜斌、尤源、杨友运、罗顺社、侯贵廷、罗安湘、周金昱、梁晓伟、张杰、唐梅荣、李士祥、赵彦德、淡卫东、杨伟伟、王长胜、樊凤玲、赵巍、尚晓庆、王克、杜金良、甄静、李继宏、李廷艳、王炯等。同济大学傅强教授、西北大学朱玉双教授,西安石油大学李琪教授、张洁教授,长庆油田贺静高工等提出了许多宝贵建议和修改意见,在此一并表示诚挚的谢意。由于时间紧迫和作者水平所限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正!

作 者

2018年1月

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第一节 致密油的概念	1
第二节 致密油分布及特征	4
一、国内外致密油的分布	5
二、国内外致密油特征	7
第三节 致密油的勘探历程	11
参考文献	15
第二章 致密油形成的区域地质背景	18
第一节 晚三叠世盆地构造格局	18
一、晚三叠世湖盆形成的区域动力背景	18
二、湖盆边界范围与构造属性	20
三、盆内沉积地层厚度与结构变化	25
四、晚三叠世鄂尔多斯湖盆原型与构造演化	29
第二节 晚三叠世盆地物源供给体系与沉积充填特征	30
一、物源供给体系	30
二、物源体系与盆内细粒沉积分布特征	31
三、盆内古地理、古地形变化对细粒沉积物分布的影响	34
第三节 晚三叠世盆地原型及构造演化对细粒沉积物的影响	37
一、晚三叠世盆地原型及构造演化对沉积物分散样式的控制	38
二、盆地沉积物分散样式对细粒沉积物分布的影响	39
三、晚三叠世盆地事件沉积对细粒沉积物分布的影响	39
参考文献	40
第三章 致密油大面积富砂特征与成因机理	43
第一节 致密油砂体沉积体系及特征	43
一、曲流河三角洲-湖泊沉积体系	43
二、辫状河三角洲-重力流-湖泊沉积体系	47
第二节 致密油细粒砂岩类型、特征与分布	54
一、致密油细粒砂岩的内涵及特征	55
二、致密油砂体结构类型及特征	57

三、致密油砂体空间展布	62
第三节 致密油砂体沉积过程模拟	67
一、水槽实验模型与参数的确定	68
二、实验过程与结果	72
三、实验结果分析	72
第四节 致密油大面积富砂成因机理	75
一、湖盆底形对砂体成因类型的控制作用	75
二、构造活动与物源供给耦合对富砂的控制作用	76
三、重力流沉积对深水区成砂的控制作用	77
四、湖平面变化对砂体空间展布的控制作用	79
参考文献	80
第四章 致密油储层精细表征与评价	83
第一节 致密油储层表征技术与方法	83
一、致密油储层常规表征技术	84
二、致密油储层非常规表征技术	86
三、致密油储层多尺度孔喉综合表征方法	88
第二节 致密油储层岩石学及储集特征	89
一、储层岩石学特征	90
二、储层微观孔隙结构特征	95
三、储层物性特征	108
第三节 致密油储层致密成因	111
一、沉积作用是储层致密的内在因素	112
二、成岩作用是储层致密化的关键	115
第四节 致密油储层裂缝发育特征及裂缝分布预测	127
一、致密油储层裂缝发育特征	128
二、致密油储层裂缝的影响因素	132
三、致密油储层裂缝分布预测	135
第五节 致密油储层敏感性与渗流特征	139
一、致密油储层敏感性	140
二、致密油储层润湿性	144
三、致密油储层渗流特征	145
第六节 致密油储层综合评价	147
一、致密油储层评价参数	147
二、储层评价标准及储层分类	150
参考文献	152
第五章 致密油烃源岩地球化学特征	156

第一节 烃源岩地球化学特征及成因机理	156
一、有机地球化学特征	156
二、成因机理	165
第二节 优质烃源岩的强排烃特征与意义	170
一、强排烃的地球化学效应	170
二、强排烃特征及意义	172
第三节 优质烃源岩的展布特征	174
一、优质烃源岩的分类识别	174
二、优质烃源岩的空间展布规律	177
参考文献	179
第六章 致密油成藏特征与富集规律	182
第一节 致密油特征	182
一、致密油油藏类型	182
二、致密油的微观赋存特征	183
三、致密油成藏组合	187
第二节 致密油聚集过程研究	189
一、致密油成藏期次	189
二、致密油充注动力	196
三、致密油成藏机理	200
第三节 致密油成藏主控因素与成藏模式	201
一、致密油成藏主控因素	201
二、成藏模式	209
参考文献	211
第七章 致密油地震勘探技术	214
第一节 致密油储层地震预测技术	214
一、岩石物理分析	214
二、地震波形分类及地震相分析	216
三、致密储层厚度及结构预测	219
第二节 致密油储层含油性地震预测技术	221
一、叠前弹性反演	221
二、叠前高亮体	222
第三节 储层脆性指数地震评价方法	224
一、变权系数岩石力学脆性指数预测	224
二、相控脆性指数预测	227
参考文献	230
第八章 致密油水平井钻完井技术	231

第一节 水平井快速钻井技术	231
一、钻头优化设计	231
二、防塌钻井液技术	232
第二节 丛式三维水平井钻井技术	235
一、三维水平井概述	235
二、井身结构优化设计	236
三、井眼轨迹控制技术	241
第三节 水平井固井技术	245
一、长水平段套管下入与居中技术	245
二、水泥浆体系	247
参考文献	250
第九章 致密油“三品质”测井定量评价技术	251
第一节 致密油评价参数体系	251
第二节 烃源岩品质测井评价	253
一、烃源岩测井响应特征	253
二、烃源岩分类标准建立	253
三、烃源岩品质定量评价	255
第三节 储层品质测井评价	261
一、岩石组分测井精细解释方法	261
二、砂体结构测井表征方法	266
三、孔隙结构测井评价方法	268
第四节 工程力学品质测井评价	271
一、地应力计算和地应力方向确定	271
二、岩石脆性参数定量计算	273
三、压裂缝高度预测技术	274
参考文献	277
第十章 致密油储层体积压裂改造技术	278
第一节 致密砂岩体积压裂裂缝网络特征	278
一、致密砂岩体积压裂裂缝特征	278
二、致密砂岩压裂形成复杂裂缝的关键地质因素	280
三、改造体积最大化设计	281
第二节 致密油长水平井体积压裂主体工艺	285
第三节 低成本体积压裂材料与工厂化作业模式	295
一、致密油滑溜水压裂液体系	295
二、工厂化作业模式	296
参考文献	298

第十一章 致密油资源评价与勘探成效	299
第一节 盆地致密油资源评价	299
一、致密油资源评价方法优选	299
二、盆地致密油资源评价	311
三、致密油储量计算标准	325
第二节 盆地致密油勘探成效	331
一、落实 20 亿吨级致密油规模储量	331
二、发现中国首个亿吨级致密油田	332
三、实现致密油有效动用	332
参考文献	335

第一章 绪 论

致密油是一种重要的非常规油气资源。随着世界经济的发展,各国对油气资源的需求量持续增加,常规油气资源越来越难以满足工业和经济发展的需求。目前,非常规油气资源的研究与利用已经成为世界油气勘探、开发的趋势。其中,致密油是非常规油气资源最具现实意义的一种。致密油资源在全球范围内均有分布,其中北美地区致密油资源特别丰富,勘探开发较早,且效果最为突出。北美地区致密油勘探的突破及商业性开发的成功,改变了美国乃至全球石油供应格局,并对世界油气勘探产生深远的影响。同时,在致密油勘探、开发目标驱动下,带动了一系列地质理论和工艺技术革新,被称为“致密油工业革命”。受之启发,我国开展了陆相盆地致密油攻关研究和勘探实践,并在鄂尔多斯、松辽、准噶尔、三塘湖等多个盆地获得重要发现。其中,鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组长7段致密油是我国陆相盆地致密油的典型代表,勘探成效非常显著,已形成较系统的理论和技术体系,在国内外引起广泛关注。

本章首先介绍致密油的概念,然后对全球范围内致密油的分布及不同地区致密油的基本特征进行介绍,最后以鄂尔多斯盆地致密油为重点,详细说明其勘探现状和勘探历程。

第一节 致密油的概念

在石油地质领域,“致密油”是一个新生名词,以至于尚未正式收入油气勘探、开发科技词汇中,仅在百度等网络词库中能检索到。应该说,致密油的名称最初译自国外,但在外文文献中其名称却并不统一,见到较多的有 tight oil (直译为致密油)和 shale oil (直译为页岩油)。例如:美国能源信息署(U. S. Energy Information Administration, EIA)解释致密油是低渗透率的砂岩、碳酸盐岩或页岩储层中生产的原油(原文为‘Tight oil’ refers to crude oil and condensates produced from low-permeability sandstone, carbonate, and shale formations.)(EIA, 2012^①),“页岩油”则指利用人工化学处理技术(包括地面热解或地下原位改质技术)在油页岩中开采出的油(原文为 EIA use the terminology shale oil in that case when oil is made from the oil-shale, rock with kerogen, by artificial chemical process, pyrolysis, which can be surface or subsurface, in situ, technology.)(Papay, 2014)。加拿大非常规资源协会(Canadian Society for Unconventional Resources, CSUR)解释致密油是一种赋存在很低渗透率岩石(砂岩、碳酸盐岩和页岩)中的轻质油,并指出这种石油只有经过诸如水平井加多级压裂等技术才能达到经济开采(原文为 Tight oil is conventional light oil that is found within very low permeability rocks, sandstones, carbonates, and shales. This oil will not flow at economic rate without, e. g. horizontal drilling coupled with multi-stage fracturing.)。关于致密油的渗透率

^① EIA, 2012. 2012 Annual Energy Outlook.

界限也不统一,如:EIA和ARI(先进资源国际公司)(2013^①)界定致密油储层渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,Papay(2014)考虑到流度界定致密油储层渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。实际上,大多数情况下,外文文献中既没有对致密油(tight oil)进行严格定义也没有严格区分致密油(tight oil)和页岩油(shale oil),只是其所指的地质目标与国内基本一致。如:北美的巴肯(Bakken)致密油藏,有的称为页岩油藏(shale oil play),有的称为致密油藏(tight oil reservoir)。Crain(2011)在文中就把致密油(tight oil)和页岩油(shale oil)作为并列语用,并且指出:“实际上,常说的页岩气(shale gas)或致密油(tight oil)其储层也并不是真正的页岩(shale),而是低孔隙度的泥岩或成层的泥质砂岩。”因此,作者认为外文文献中,“tight oil”和“shale oil”两种名称一般情况可以等同,都可以理解为致密油,只有特定情况下才需要加以区分。

在国内文献资料中,最早以定义形式提出“致密油”的是林森虎等(2011)撰写的“美国致密油开发现状及启示”。在该文中,作者首次对致密油给出了如下定义:致密油指以吸附或游离状态赋存于富有机质且渗透率极低的暗色页岩、泥质粉砂岩和砂岩夹层系统中的自生自储、连续分布的石油聚集。文中指出,此处的页岩储集层是指富有机质的暗色页岩以及薄夹层状存在的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩地层,并总结了致密油的生产特点:一般无自然产能或低产,单井生产周期长;要开发好致密油资源需要的关键技术是多级水力压裂、重复压裂等储层改造技术和水平井开采技术。实际上,在此之前,国内也有少量文章中出现过致密油的叫法,但重点指致密油藏或致密储层,并没有做过明确的定义。在此之后,致密油的名称逐渐出现在专业会议和技术报道中。如:2011年12月,中国石油网刊登的文章“我国致密油气开发亟待升温”就再次引述邹才能等人对致密油的定义:致密油是指生油岩层系的各类致密储层中聚集的石油,经过了短距离运移,储层岩性主要包括粉砂岩、泥质粉砂岩以及碳酸盐岩等。

2011年12月18日,国家油气重大专项“中国大型油气田及煤层气勘探开发技术发展战路”(2011ZX05043)与中国石油长庆油田分公司在西安组织召开了“我国致密油勘探进展与资源潜力研讨会”,对致密油定义的形成具有里程碑意义。会议以“致密油——全球非常规石油勘探开发新热点”为主题,交流了国内外致密油勘探新进展、地质新认识与技术;研讨了中国致密油的类型、地质特征、评价标准及资源前景;分析了中国致密油的勘探开发前景,提出了未来发展的战略重点和建议(许怀先、李建忠,2012)。在这次会议上,关于致密油的地质概念形成了以下5个方面重要的认识:第一,致密油不等同于页岩油,主要类型有致密砂岩油和致密灰岩油等。第二,中国致密油有5个地质特点:①主要为陆相湖盆体系;②与良好生油岩互生,有机碳含量(TOC)高、成熟度(R^o)适宜;③白云岩、砂岩储集层类型多样,砂岩横向变化大,部分为薄互层;④面积、规模相对较小;⑤晚期构造变动复杂。第三,致密油有10项基本评价指标:①孔隙度与渗透率;②基质孔类型(有机/无机);③流体品质、可流动性;④储集层压力;⑤可压裂性(脆性、矿物含量、天然裂缝);⑥烃源岩TOC、 R^o 值;⑦储集层厚度;⑧构造复杂性;⑨埋

^① EIA, ARI, 2013. EIA/ARI world shale gas and shale oil resource assessment: technically recoverable shale—An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States.

藏深度；⑩地面压裂条件（水、环保因素、井场）。第四，中国致密油资源潜力大，应加快发展鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段、准噶尔盆地二叠系和四川盆地侏罗系致密油。第五，应加强基础研究，深化致密油气孔喉结构渗流机理认识，重新评价地质和技术油气资源量，加强水平井和压裂技术攻关，整体突破非常规致密油新领域。这次会议是在中国致密油勘探和研究起步的关键时期召开的一次重要会议。会议基本确定了国内致密油的地质概念和致密油研究攻关的目标，对未来中国致密油的发展起到了重要的推动作用。此后，致密油的名称在学术领域被广泛采用。

然而，新的名称还缺乏严格的定义，造成应用过程中一些与致密油相似的概念很容易相互混淆。例如：“页岩油”、“致密储层”、“致密气”、“页岩气”、“非常规资源”、“低渗透、特低渗透、超低渗透”等。因此，不同的专家尝试对致密油进行了定义（赵政璋等，2012；贾承造等，2012；邹才能等，2012；姚泾利等，2013；童晓光，2012；景东升等，2012；姜在兴等，2014），采用的定义语有所差别，未能得到统一。更为重要的是，不同单位或学者对致密油范畴的理解存在偏差，这制约甚至阻碍对致密油的研究和开发，特别是没有统一明确的致密油概念，不能区分攻关目标和对象，很难抓住核心问题开展研究。

随着国家对非常规油气资源的重视及油气勘探、开发技术的进步，准确定义致密油概念被提上日程并得到重视。2013年，在历经3年研究和实践的基础上，行业标准《致密油地质评价方法》（SY/T 6943-2013）正式发布。在该标准中，致密油被定义为：“储集在覆压基质渗透率小于或等于 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ （空气渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ）的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集层中的石油；单井一般无自然产能或自然产能低于工业油流下限，但在一定经济条件和技术措施下可获得工业石油产量。通常情况下，这些措施包括酸化压裂、多级压裂、水平井、多分支井等。”从文字表述来看，该标准主要是通过储层渗透率来定义致密油的。根据这个定义，我国主要盆地均不同程度地发育致密油。特别是很多盆地以往所说的“低渗透储层”、“表外储层”、“致密难动用储层”等都被列入致密油的范畴。

以低渗透著称的鄂尔多斯盆地，空气渗透率小于 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层占三叠系储层中的近一半，且通过研究攻关，以西峰油田、华庆油田为代表的储层空气渗透率在 $0.3 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的油藏都已经成功开发（付金华等，2014，2015），若再列入致密油范畴，将给油藏分类、攻关研究造成很大的困惑。考虑到鄂尔多斯盆地实际情况，为聚焦攻关目标，并与生产和研究需求相统一，长庆油田在企业标准《鄂尔多斯盆地致密油储层评价方法》（Q/SY CQ 3534-2015）中对鄂尔多斯盆地致密油做了专门的定义：“指赋存于与烃源岩互层共生或紧邻的致密储层中，未经过大规模运移的石油聚集，其地面空气渗透率一般低于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，以三叠系延长组长7段致密砂岩油最为典型。这种石油资源一般无自然产能，须对储层进行大规模体积压裂改造或通过水平井方式开采方可以获得商业性开发。”

需要指出的是，鄂尔多斯盆地致密油的定义与行业标准并不矛盾，与之具有统一性，只是鄂尔多斯盆地致密油的界定标准更为严格，也更加符合盆地石油勘探、开发实际。在本书中，对于鄂尔多斯盆地致密油采用长庆油田的定义，国内其他盆地致密油主要依据行业标准界定，国外致密油则采用更为广义的致密油概念。

目前,鄂尔多斯盆地致密油已逐渐为行业内所熟悉,然而其名称和地质概念的建立实属不易(牛小兵等,2016)。从最初国外“页岩油”概念引入国内,到后来“致密油”、“页岩油”混用的模糊状态,以至引发了地质研究人员很长一段时间的困惑:“到底什么是致密油?”,“致密油和低渗透有什么本质区别?”。面对这些困惑,长庆油田的地质工作者主要从以下几个方面进行了厘定:首先,从国内学者一般认可的覆压渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (地面空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的基本概念入手,大致圈定盆地“致密油”的资源分布(长庆油田中生界已有石油探明储量的50%以上、资源量70%以上属于这个范围)。其次,这种用渗透率划定的致密油界限是依据十分宽泛的国内不同油田和盆地给定的,是否符合鄂尔多斯盆地的生产实际,还需要分析其必要的界定条件,即“常规工艺改造难以有效动用”和“水平井+体积压裂技术可以实现效益开发”两个必要条件。最后,无论国外还是国内,无论海相还是陆相,对致密油有一点共识即“与烃源岩互层共生或紧邻的致密储层”,这也是划定是否为致密油的重要地质依据。因此,将盆地致密油定义为“与烃源岩互层共生或紧邻的致密砂岩储层(地面空气渗透率 $<0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)中聚集的石油”就符合长庆油田的实情。目前,鄂尔多斯盆地的致密油就特指发育在中生界延长组长7段的致密油。对于延长组其他层系,虽然有的储层渗透率也低于 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,但依然不属于致密油范畴。明确这一概念的重要意义在于确定了盆地致密油攻关的对象和方向。

在此特别强调并阐明本书中所用的几个与“致密油”相近名称的含义:“致密储层”统指岩性致密的储层;“致密油储层”则特指致密油资源赋存的载体,包括致密砂岩、碳酸盐岩等;鄂尔多斯盆地的“页岩油”特指中生界三叠系延长组长7段页岩中赋存的石油。低渗透、特低渗透和超低渗透主要采用长庆油田开发实践形成的储层渗透率划分方案,《中生界延长组低渗透砂岩储层分类定量评价标准》(Q/SY CQ 3634-2016),即低渗透 $10 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、特低渗透 $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,超低渗透 $0.3 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

总之,从技术发展的角度来看,在中国将致密油的概念专门提出来并进行规范,有利于重新认识这类储层,并开展有的放矢的研究和技术攻关。致密油名称中的“致密”是反映储层特征的,说明这类储层比低渗透或特低渗透储层更致密,在储集空间、流体赋存方式、渗流机理等方面具有与前者显著不同的特点,使之区别于各类低渗透储层。“致密油”中的“油”与“油页岩”中“岩”核心字意的鲜明对比,表明在中国已经将这类资源列为一种可以大规模工业开发的液态烃类资源。

第二节 致密油分布及特征

根据致密油的定义,只要符合“源储一体”和“一定渗透率界限”的储层中的石油都属于致密油。那么理论上,国内外大型沉积盆地中都具有发育致密油的可能性。从国际和国内报道的资料来看,国外致密油主要分布在美国、加拿大、俄罗斯、利比亚、阿根廷、澳大利亚等国家(赵政璋等,2012)。在国内,致密油主要分布在鄂尔多斯、松辽、准噶尔、三塘湖、柴达木等盆地。必须强调的是,各盆地致密油的划定标准并不相同。

一、国内外致密油的分布

(一) 国外致密油分布

据美国能源信息署报告（EIA and ARI，2013^①），全球致密油资源主要分布在俄罗斯、美国、中国、阿根廷、利比亚、澳大利亚、委内瑞拉、墨西哥、巴基斯坦和加拿大，总资源量为 $67530\times10^8\text{bbl}$ ^②，技术可采量为 $3350\times10^8\text{bbl}$ 。该报告依据美国及美国以外 41 个国家的 137 个页岩层的评估结果得出。另外，英国石油公司（BP）在其发布的《2013 年能源展望》中，也说明致密油主要分布在美国、加拿大、俄罗斯、墨西哥、阿根廷等国家。

目前，已实现致密油工业开发的地区主要在北美，以下主要介绍北美地区主要盆地致密油概况。

1. 美国致密油分布

据 BHP 报告（2011），美国致密油资源主要分布在 8 个盆地，经评估致密油资源量为 $477\times10^8\text{bbl}$ 。Jarvie D. M.（2012）在报告中汇总了美国本土主要致密（页岩）油区带的地质年代、所处盆地和位置以及页岩类型（表 1.1）。美国地质调查局（United States Geological Survey, USGS）在 2013 年的报告中称，美国的致密油也主要分布在上述盆地。

表 1.1 美国主要盆地致密油地质概况汇总表

致密油田	年代	盆地	州	储层空间类型
蒙特雷 (Monterey)	中新世 (Miocene)	圣玛丽亚 (Santa Maria)	加利福尼亚州 (California)	裂缝性页岩 (fractured shale)
奈厄布拉勒 (Niobrara)	白垩纪 (Cretaceous)	南方公园 (South Park)	科罗拉多州 (Colorado)	裂缝性页岩 (fractured shale) 和 混合页岩 (hybrid shale)
皮埃尔 (Pierre)	白垩纪 (Cretaceous)	南方公园 (South Park)	科罗拉多州 (Colorado)	裂缝性页岩 (fractured shale)
巴肯 (Bakken)	泥盆纪 (Devonian)	威利斯頓 (Williston)	北达科他州 (North Dakota)	裂缝性页岩 (fractured shale) 和 混合页岩 (hybrid shale)
曼科斯 (Mancos)	白垩纪 (Cretaceous)	圣胡安 (San Juan)	新墨西哥州 (New Mexico)	混合页岩 (hybrid shale)
巴尼特 (Barnett)	密西西比纪 (Mississippian)	沃思堡 (Fort Worth)	得克萨斯州 (Texas)	致密页岩 (tight shale)
伍德福特 (Woodford)	泥盆纪 (Devonian)	阿科马 (Arkoma)	俄克拉何马州 (Oklahoma)	致密页岩 (tight shale) 和 裂缝性页岩 (fractured shale)

① EIA, ARI, 2013. EIA/ARI world shale gas and shale oil resource assessment: technically recoverable shale—An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States.

② 1bbl=0.159m³。