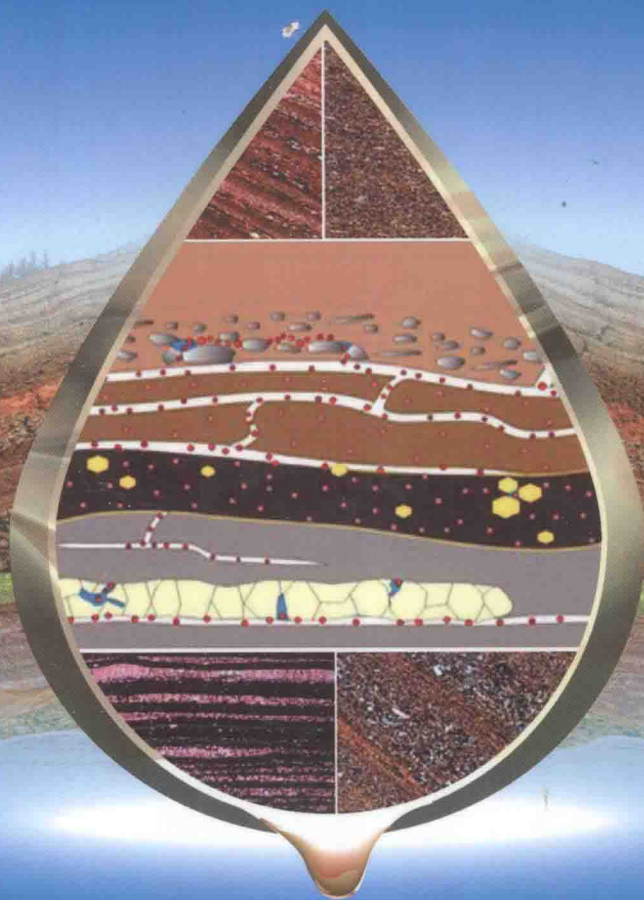


陆相页岩油勘探

CONTINENTAL SHALE OIL EXPLORATION

陈祥 王敏 严永新◎等著



石油工业出版社

陆相页岩油勘探

陈 祥 王 敏 严永新 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从中国陆相页岩油基本概念、地质特征出发,阐述了陆相页岩油形成条件及富集影响因素,初步明确了陆相页岩油赋存特征。以泌阳凹陷为例,论述了陆相页岩油勘探开发实践中创新形成的三大关键技术。

本书可供石油地质勘探工作者、石油工程技术专业人员及石油高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

陆相页岩油勘探/陈祥等著. —北京:石油工业出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-5183-0877-4

I. 陆…

II. 陈…

III. 陆相-页岩油-油气勘探

IV. P618. 130. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 223048 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523543

图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 15

字数: 350 千字

定价: 150.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

《陆相页岩油勘探》

主要作者

陈 祥 王 敏 严永新 张 宇

刘洪涛 章新文 张永华 李群德

朱景修 邱 杰 蒋尔梁 陈明胜

序

石油资源的规模勘探开发已经有 150 年左右的历史，主要经历了构造油气藏、地层岩性油气藏和非常规连续型油气藏三个发展阶段。目前非常规油气受到越来越多的关注与重视，大有超过常规油气之势，非常规油气勘探开发已进入快速发展阶段。非常规油气包括页岩油气、致密砂岩油气、煤层气、重油、天然气水合物等多种类型。页岩油气作为非常规油气的一种，是近年来勘探开发的热点和重点领域。页岩油气是指赋存于泥页岩系统中，以孔隙、裂缝等为储集空间，无运移或运移距离极短的特低孔、特低渗连续型油气藏。一般来说，烃源岩热演化程度高，可形成页岩气；热演化程度低—中等，可形成页岩油。目前北美地区页岩油气勘探开发技术较为成熟，且页岩气勘探开发历程要早于页岩油。而国内页岩油气成藏理论研究及勘探开发技术攻关起步较晚，至今也仅有 10 年左右的时间，尤其是页岩油地质综合评价研究及勘探开发实践也只是近 5 年时间内才起步，尚未形成一套成熟的页岩油勘探开发理论及配套完善的工程技术。另外，页岩油地质研究及勘探开发实践方面的文献及著作较少，对我国陆相页岩油理论发展及勘探开发快速突破难以起到有效的引领与推动作用。

本书从中国陆相页岩油基本概念、基本地质特征出发，阐述了陆相页岩油成藏机理及富集影响因素，初步明确了陆相页岩油赋存特征；主要以泌阳凹陷陆相页岩油地质评价与勘探实践为例，系统论述了陆相页岩油勘探实践中创新形成的勘探开发三大关键技术——地质评价、水平井钻完井及水平井多级分段压裂技术，填补了国内陆相页岩油地质理论与勘探实践专著方面的空白。

本书作者大都具有 20 年以上的油气勘探开发研究及实践经验，尤其是近年来加大了陆相页岩和致密砂岩等非常规油气资源地质综合研究及勘探开发工作力度。他们率先开展了陆相页岩油成藏理论研究，并在泌阳凹陷进行了页岩油气资源评价及选区，实施了页岩油水平井钻井及多级分段压裂，使得泌阳凹陷陆相页岩油勘探在国内首次取得重要突破，进而被国土资源部列为页岩油实施示范工程项目。本书作者具有丰富的页岩油理论与勘探实践经验，在核心期刊及国内外重要学术会议上发表和宣读了多篇论文，对陆相页岩油发展进行了战略性的思考，对陆相页岩油基本特征、形成条件、赋存机理及富集因素进行了深入的研究，对陆相页岩油水平井钻完井及多级分段压裂等关键技术进行了攻关和应用。

《陆相页岩油勘探》是目前国内系统论述陆相页岩油成藏理论与勘探关键技术的一部专著，相信此书的出版，能使读者了解到陆相页岩油地质理论及勘探开发技术的最新进展，对今后的陆相页岩油勘探开发实践具有重要的借鉴作用和参考价值。

中国工程院院士：

前言

随着油气资源需求的日益增长和勘探开发的深入,常规油气剩余资源日益减少,非常规油气的勘探开发显得日益重要。目前,世界上有多个国家在不同盆地和地区发现了具有工业价值的页岩油气资源,如美国、加拿大、俄罗斯、英国等。其中,美国对页岩油气藏的勘探开发最早,经过 10 多年的快速勘探开发,取得了丰硕的成果。2013 年美国页岩气产量达到 $3025 \times 10^8 \text{ m}^3$,已经占天然气产量的 35%,成为北美地区新兴能源,改变了北美地区能源格局。美国页岩油产量主要从 2005 年开始迅速增长,目前已经在 Barnett、Bakken、Eagle Ford、Niobrara、Monterey、Marcellus、Woodford 等页岩层系中产出了页岩油,2013 年页岩油产量已达 $16077 \times 10^4 \text{ t}$,占原油总产量的 43%,使美国原油对外依存度大幅度降低,表明美国页岩油勘探开发取得巨大成功。

目前国内随着四川盆地威远—长宁、涪陵等地区页岩气勘探开发的快速推进,海相页岩气勘探开发理论与技术初步形成并日趋成熟,而陆相页岩油勘探开发起步较晚,相关的地质理论与工程技术尚在探索之中。我国陆相页岩主要分布在渤海湾、鄂尔多斯、松辽、柴达木、南襄、酒西、江汉、苏北等盆地,具有单层厚度大、分布范围广、有机碳含量高、有机质类型好、脆性矿物含量高、裂缝发育、油气显示丰富等特征,具备了页岩油形成的有利条件。据相关文献报道,我国页岩油地质资源量达 $1420 \times 10^8 \text{ t}$,可采资源量为 $30 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8 \text{ t}$,表明我国页岩油资源潜力较大,勘探开发前景广阔。目前在南襄盆地泌阳凹陷、渤海湾盆地东营凹陷、沾化凹陷、辽河拗陷及鄂尔多斯盆地等多个地区,取得了页岩油勘探的初步成果。

国土资源部于 2009 年开始启动页岩油气资源评价与选区评价工作,中国石油化工集团公司选择了济阳拗陷、泌阳凹陷作为重点地区开展页岩油研究工作。河南油田通过选区评价,于 2010 年在泌阳凹陷部署了页岩油兼探井——安深 1 井,该井经大型压裂后获日产 4.68 m^3 工业油流,使中国陆相页岩油勘探取得工业油流突破;2011 年在泌阳凹陷部署中国首口页岩油水平井——泌页 HF1 井,该井 1044m 水平段 15 级分段压裂获最高日产 23.6 m^3 工业油流,标志着中国陆相页岩油勘探取得实质性突破。

中国陆相页岩油因地质背景、沉积环境的复杂性与特殊性,使其在成藏理论和勘探开发技术上有别于北美海相页岩油。对于国内陆相页岩油相关理论和勘探开发技术的研究相比页岩气才刚刚起步,很少有文献进行系统的论述。目前国内陆相页岩油勘探虽然取得了初步进展,但仍存在较多的理论和技术难题,主要包括陆相页岩油成藏条件、赋存机理及富集因素认识不清;储层预测、识别及评价技术尚未形成;水平井钻完井及压裂的瓶颈技术尚未攻克。亟待通过以上难题的研究和攻关,创新建立陆相页岩油勘探理论及关键技术,推动陆相页岩油勘探开发向前发展。笔者在跟踪国内外页岩油气地质理论与勘探开发技术最新进展的

基础上,结合泌阳凹陷陆相页岩油研究与勘探实践,编著了《陆相页岩油勘探》一书,希望对油气田企业、科研院所从事页岩油勘探的科技工作者有所帮助。

本书共分五章,具体分工为:前言由王敏、陈祥执笔;第一章由严永新、章新文执笔;第二章由陈祥、章新文、朱景修执笔;第三章由王敏、严永新、陈祥、李群德、张永华、陈明胜执笔;第四章由张宇、陈祥、仝继昌执笔;第五章由刘洪涛、蒋尔梁、邱杰、张永华、姚天华执笔;问题与讨论由王敏、陈祥执笔。全书最终由陈祥、王敏统稿完成。

本书编著过程中,得到了国土资源部油气战略研究中心、中国石油化工集团公司科技部和油田勘探开发事业部领导与专家的大力支持,以及马永生、金之钧、李阳、康玉柱等院士给予学术指导,同时也得到了河南油田分公司李联五、樊中海、袁建强三位领导以及薛建国、张建国等专家的直接帮助,在此一并表示衷心感谢!编著过程中参阅了国内外大量资料,虽然列出了参考文献目录,但未能一一详作引用说明,敬请相关专家学者予以谅解!由于陆相页岩油研究与勘探开展工作时间不长,同时限于笔者水平,书中疏漏甚至错误之处在所难免,恳请读者不吝赐教、批评指正。

目 录

第一章 页岩油基本特征	(1)
第一节 页岩油概念	(1)
第二节 陆相页岩油地质特征	(1)
第三节 页岩油勘探开发特点	(5)
第二章 陆相页岩油形成机理及富集影响因素	(9)
第一节 陆相页岩的沉积特征	(9)
第二节 陆相页岩油形成条件	(17)
第三节 陆相页岩油成藏机理	(27)
第四节 陆相页岩油富集影响因素	(32)
第三章 陆相页岩油地质评价技术	(39)
第一节 岩石学分析技术	(39)
第二节 录井储层评价技术	(73)
第三节 测井储层评价技术	(89)
第四节 地震储层预测技术	(98)
第五节 资源评价技术	(117)
第六节 目标区优选评价技术	(136)
第七节 水平井地质设计优化技术	(154)
第八节 开发方案优化设计技术	(156)
第四章 陆相页岩油水平井钻完井技术	(160)
第一节 地层特性分析	(160)
第二节 钻井工艺技术	(162)
第三节 页岩水平井钻井液技术	(168)
第四节 完井技术	(177)
第五节 应用实例	(185)
第五章 陆相页岩油水平井多级分段压裂技术	(187)
第一节 储层可压性分析	(187)
第二节 压裂液体系	(191)
第三节 支撑剂体系	(193)
第四节 压裂设计优化技术	(196)
第五节 压裂工艺技术	(203)
第六节 压裂施工及配套技术	(208)
第七节 微地震裂缝监测技术	(211)
第八节 应用实例	(217)
后记	(225)
参考文献	(226)

第一章 页岩油基本特征

第一节 页岩油概念

通常页岩是指由粒径小于 0.0039mm 细粒碎屑、黏土、有机质等组成，具页状或薄片状层理，易碎裂的一类沉积岩。美国将粒径小于 0.0039mm 并且具有页片状层理构造的细粒沉积岩统称为页岩，并将其分为硅质页岩、钙质页岩、黏土质页岩、铁质页岩、碳质页岩等类型。页岩油与页岩气均是以这类岩层为主要储集体的油气资源。对于页岩气的研究已经趋于成熟，其概念也很明确，定义页岩气为主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中，以吸附或游离状态为主要赋存方式，赋存于页岩基质孔隙或裂隙中的天然气聚集。目前页岩气的勘探开发在我国涪陵、长宁—威远等地区已经取得了重大突破，随着页岩气研究的不断深入，与其形成条件相似的页岩油受到越来越多的关注。

页岩油与页岩气常常相互共生，有相同之处也有差异，那么何为页岩油呢？不同学者对页岩油的概念进行了定义。邹才能等认为页岩油就是指储存于富有机质、纳米级孔隙为主的页岩地层中的石油，是成熟有机质页岩中石油的简称。页岩油以吸附和游离态形式存在，一般油质较轻，黏度较低，主要储集于纳米级孔隙和裂缝系统中，多沿片状层理面或与其平行的裂缝分布。张金川等进一步定义为页岩油是以游离态（含凝析态）、吸附态及溶解态（可溶解于天然气、干酪根和残余水中等）等多种方式，赋存于有效生烃泥页岩地层中，且具有勘探开发意义的非气态烃类。周庆凡等在《致密油与页岩油的概念与应用》一文中明确区分了页岩油与致密油，将页岩油分为广义和狭义，认为广义的页岩油与广义致密油概念一致，都是泛指蕴藏在具有孔隙度和渗透率的致密含油层中的石油资源，其开发需要与页岩气类似的水平井与压裂技术；狭义的页岩油专指来自作为烃源岩的泥页岩层系中的石油资源，烃源岩与储层同层。董清源等认为，页岩油是非常规油气的一种，是指石油以吸附或者游离状态赋存于富有机质且渗透率极低的暗色页岩及与暗色页岩共生的薄层泥质粉砂岩和砂岩夹层系统中的自生自储、连续性石油聚集。

笔者认为，页岩油是从富含有机质泥页岩地层系统（大套暗色泥页岩、高碳页岩、粉砂质页岩及砂岩薄夹层）中开采出的原油，它是以游离和吸附状态为主赋存于孔隙、裂缝等储集空间中，特低孔、特低渗、自生自储的连续型石油聚集。页岩油与页岩气的主要区别在于页岩气演化程度相对较高，以气体形式存在，而页岩油则以液态烃为主要存在方式。一般页岩油、页岩气为共生关系，当 R_o 大于 1.1% 时，以形成页岩气为主，当 R_o 小于 1.1% 时，以形成页岩油为主。

第二节 陆相页岩油地质特征

页岩油在其形成条件、储层特征、赋存状态、含油气系统等多个方面与常规油气有着质

的差别,与页岩气有着较多的相似之处。在国内含油气盆地中,页岩油资源在陆相地层中占的比重较大,其地质特征与国外海相地层差异较大;因此,国内陆相页岩油受陆相沉积环境的影响,表现出与国外页岩油差异化明显的特征。

一、页岩油源储一体特征

页岩油藏与常规砂岩油藏在成藏特征方面存在明显差异。常规砂岩油藏主要是石油二次运移聚集成藏,而页岩油藏完全为自生自储含油气系统,无明显圈闭,页岩油藏是烃源岩持续生烃、不间断供烃和连续聚集形成的。页岩油赋存在以页岩为主的地层中,通常页岩地层中又发育部分粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩夹层,它同样是产油页岩的主要构成,可称为页岩油系统。其生烃、排烃、聚集和保存全部在烃源岩内部完成,通常烃类无运移或运移距离极短,为源储一体的烃类持续聚集。

二、页岩有机地球化学特征

页岩有机地球化学特征是评价页岩油成藏主要指标之一,包括有机质丰度、有机质类型及热演化程度。一般用有机碳含量来表示页岩的有机质丰度,有机质丰度的高低在很大程度上决定了页岩的生烃量和生烃强度。页岩有机碳与其含油性多呈正相关关系,页岩有机碳含量越高,其含油性越好。国内陆相页岩有机碳含量与北美海相页岩有机碳含量差异较大,北美主要的页岩油田 Bakken 页岩有机碳含量为 7.23%~12.9%, Eagle Ford 页岩有机碳含量为 1%~7%,平均大于 4%。而国内陆相页岩有机碳平均值一般在 2%左右,其中泌阳凹陷有机碳含量为 1%~4%,主要页岩发育层段有机碳平均含量大于 2%,江汉盆地有机碳含量为 1%~3%,吐哈盆地页岩有机碳含量为 1%~5%,明显低于北美海相页岩地层。这一差异主要与沉积环境有关,同时国内外有机碳含量的测试方法也可能一定程度上造成数据的差异。根据国内陆相页岩有机碳含量特点,国土资源部制定了陆相页岩油气资源评价标准,将有机碳含量大于 2%作为页岩油核心区,有机碳含量介于 1%~2%之间作为页岩油有利区,而有机碳含量小于 1%作为页岩油远景区,这一划分标准得到了国内地质学者的普遍认同。

干酪根一般分为三类,Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型干酪根,Ⅰ型和Ⅱ型干酪根以生油为主,Ⅲ型干酪根以生气为主,国内陆相页岩油干酪根类型多为Ⅰ型和Ⅱ型,Ⅲ型较少。

当热演化程度(R_o)大于 0.5%时,页岩储层内可以生成页岩油,当热演化程度大于 1.1%时,部分原油裂解成气。因此认为适合于页岩油形成的热演化程度多在 0.5%~1.1%之间,热演化程度小于 0.5%,页岩生油气能力很低,热演化程度大于 1.1%,便可形成页岩气。国内页岩油形成条件较好的渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组、南襄盆地泌阳凹陷核桃园组热演化程度大多数在 0.5%~1.1%。

三、页岩储层储集特征

一定的物性条件无论对于常规油气还是页岩油气都是必要的。目前美国实现商业开采的页岩油气田,其孔隙度大部分介于 3%~10%,渗透率均介于 0.0001~0.001mD。Bakken 页岩孔隙度为 3%~9%,渗透率为 0.01~0.06mD, Eagle Ford 页岩孔隙度为 4%~15%,渗透率为 1~800mD。一般来说,页岩储层孔隙度大于 4%,渗透率大于 0.0001mD,有利于页岩油富集与开采。

相对于常规油气而言,页岩油的储集空间更小,主要以微小孔隙和裂缝为主。裂缝主要

为构造裂缝、成岩裂缝、水平页理缝、微裂缝等。目前具备勘探开发价值的页岩油气与裂缝的关系十分密切，裂缝的发育不仅可以为页岩油气提供一定的储集空间，有效改善了储层物性，增强了孔隙之间的连通性，提高了页岩油气产量，同时还有利于水平井压裂体积缝的形成。页岩孔隙主要为微孔隙和纳米级孔隙，孔隙直径为 50~2000nm，包括有机质孔、矿物晶间孔、粒间孔和溶蚀孔等（图 1-2-1）。页岩储集特征受到岩性和矿物成分、构造作用、成岩作用以及有机质富集方式等因素的综合影响，特别是岩性和矿物成分的影响较为重要，这主要表现在不同岩性之间存在差异较大的储集空间类型和物性特征。

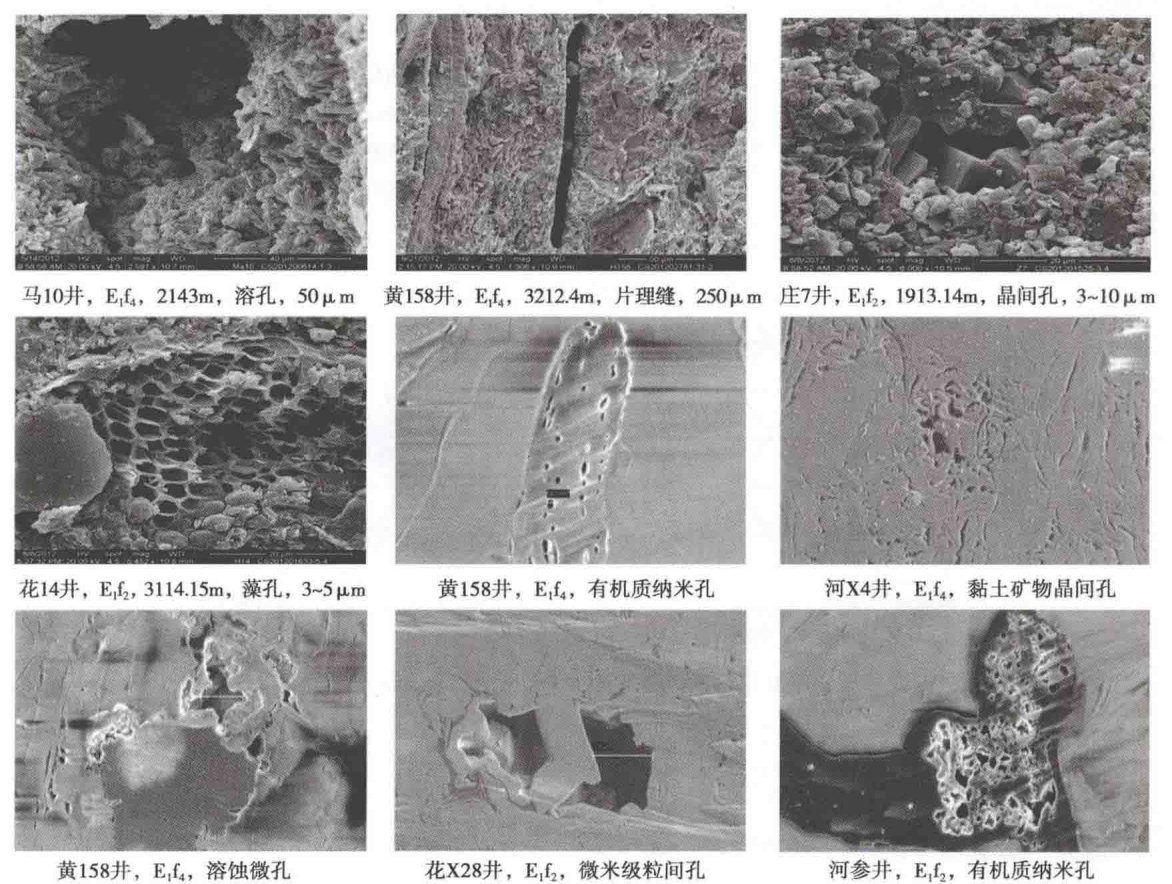


图 1-2-1 苏北盆地页岩储层孔隙特征图（据江苏油田）

页岩储层压裂后，聚集于裂缝中的油气相对容易开采，而赋存于基质孔隙内的油气开采难度较大，与压裂改造缝直接连通的微孔隙内所含油气可以通过达西渗流作用流动。而未被裂缝沟通的孔隙，其连通和流动性主要取决于喉道的大小，邹才能等认为喉道半径大于 5nm，油气分子才有可能流动，微孔隙内的油气分子主要以扩散流、滑脱流等方式流动。

四、脆性矿物含量

脆性矿物是指页岩地层中除黏土矿物以外的在岩石力学性质方面表现为易脆的矿物。页岩矿物成分复杂，主要由碎屑矿物、黏土矿物、碳酸盐矿物三部分组成。其中北美海相页岩与国内陆相页岩成分稍有不同，海相页岩石英含量更高，含有更多的硅质矿物；国内陆相页岩碳酸盐岩含量较高，含有更多的钙质矿物。Barnett 页岩矿物成分以石英和黏土矿物为主，

长石次之，含一定量的黄铁矿和磷酸盐，碳酸盐含量较少（图 1-2-2）。国内陆相页岩石英含量相对于北美海相页岩低，但是长石含量明显高于国外海相地层，其矿物成分也比北美海相地层复杂，包括石英、钾长石、钠长石、方解石、白云石、黄铁矿、伊利石、蒙皂石等。页岩脆性矿物含量越高，岩石的脆性越强，在外力作用下越容易形成天然裂缝和诱导裂缝，有利于石油开采。国内陆相页岩脆性矿物含量较高，泌阳凹陷核桃园组核三段页岩地层中石英、长石、方解石、白云石等脆性矿物含量高达 65%，黏土矿物含量为 20%~30%；济阳坳陷沙河街组脆性矿物含量平均为 74%~86%，黏土矿物含量平均为 14%~26%；苏北盆地阜宁组阜二段、阜四段页岩脆性矿物含量均在 55% 以上，黏土矿物含量为 25%~40%。

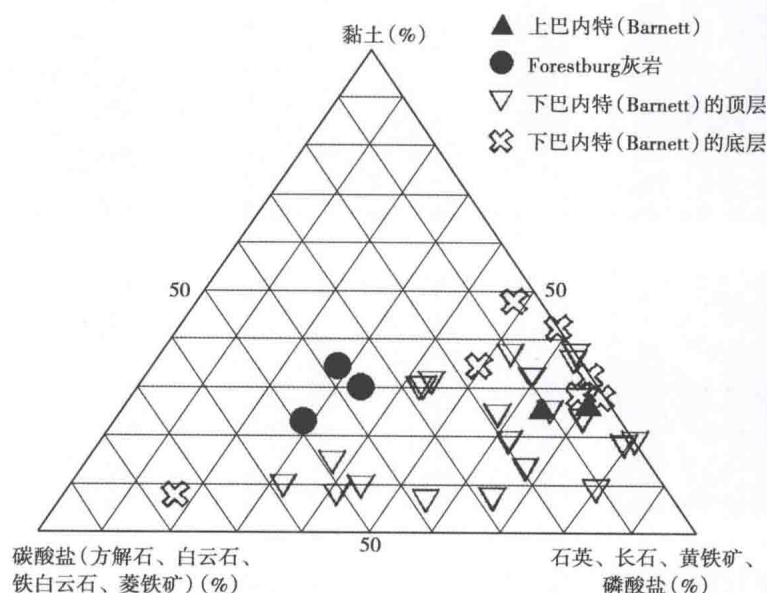


图 1-2-2 Barnett 页岩不同层位矿物成分含量（据 Loucks 等，2007）

五、页岩埋深

适当的埋藏深度既是页岩油形成的基本条件，也是页岩油开采的主要经济评价参数。在目前技术经济条件下，若埋藏过深，受钻井和压裂成本的影响，不利于经济开采。北美页岩油埋藏深度一般在 1500~3000m 之间，其中威利斯頓盆地 Bakken 页岩埋藏深度为 1800~3300m，落基山盆地 Niobrara 页岩埋藏深度为 2400~2700m。国内陆相页岩埋藏深度一般大于北美海相页岩，多数具有开采价值的页岩埋藏深度小于 3500m，东营凹陷沙三段页岩油富集段埋藏深度为 2000~3500m，泌阳凹陷核桃园组页岩油富集段埋藏深度为 1700~3500m。

六、地层压力与流体性质

地层压力与页岩油气富集和经济开发有着密切的关系。北美地区及四川盆地焦石坝高产页岩油气井多具有异常高压特征，表明了地层高压是页岩油气富集高产的重要因素，同时异常高压可以为原油的流动和经济开采提供充足的地层能量。在国内富有机质页岩盆地中，地层压力有两种情形，一种表现为地层异常高压，如四川盆地涪陵地区海相页岩气地层压力系数在 1.45 左右；另一种表现为正常压力，如泌阳凹陷核桃园组陆相页岩地层压力系数在

0.9~1.10 之间。

页岩油气性质代表有机质热演化程度和流动条件。一般来说，海相页岩油气具有热演化程度高、气油比高等特征，易于开采；而国内陆相页岩油多具有热演化程度适中、气油比较低、原油密度中等（0.80~0.87g/cm³）的特征。

七、陆相页岩油与海相页岩油的特征差异

国内外页岩油气地质特点有着共同点，但同时也存在很大差异。目前北美开采的页岩油主要形成于海相盆地的海相环境，大面积连续分布，资源量规模较大。北美海相页岩有机碳含量高，多数大于4%，一般介于3%~13%之间；成熟度较高， R_o 一般大于1.1%；脆性矿物含量高，多在50%以上，脆性矿物中硅质含量高，多大于30%，钙质含量低，表现为硅质页岩裂缝型页岩油；埋深一般小于3300m；地层压力多数为异常高压，压力系数一般在1.2~2.0。

国内陆相页岩油主要形成于陆相断陷湖盆半深湖—深湖相，页岩分布面积相对于海相沉积较小，同样蕴藏着大量的页岩油资源。陆相页岩脆性矿物含量较高，但硅质含量低，钙质含量高（30%~70%）；有机碳含量较高，但低于北美海相地层，一般在2%左右；埋深适中，一般为2200~3500m；地层压力大多数表现为常压地层，也存在异常高压的地区；页岩油储集空间多以裂缝和层理缝为主，基质孔隙和纳米级孔隙为辅（表1-2-1）。

表 1-2-1 北美海相页岩油与国内陆相页岩油差异性对比表

特 征	北美海相页岩油	国内陆相页岩油
沉积盆地类型	海相盆地	陆相盆地
脆性矿物含量	硅质含量较高，平均大于30%； 钙质含量较低，平均小于10%	硅质含量较低，一般小于30%； 钙质含量较高，一般大于30%
有机地球 化学特征	TOC 值一般大于3%； 有机质类型以Ⅰ型、Ⅱ型为主； 成熟度较高， R_o 大于1.1%	TOC 值一般大于2%； 有机质类型以Ⅰ型、Ⅱ型为主，Ⅲ型较少； 成熟度适中， R_o 为0.5%~1.1%
储集空间类型	以裂缝、孔隙为主；有机质纳米孔隙发育	以裂缝、层理缝为主
埋藏深度	一般小于3300m	一般小于3500m
地层压力	大多为异常高压，压力系数为1.2~2.0	大多为常压地层，压力系数为0.9~1.1；少数异常高压

针对国内外页岩油的共同点及差异性，我国陆相页岩油研究在借鉴北美页岩油气勘探开发经验的同时，要结合自身的特点，探索研究适合于我国陆相页岩油勘探开发的理论和技术。

第三节 页岩油勘探开发特点

页岩油与常规油气在地质特征上有着本质的区别，因此其资源特征、勘探开发技术、生产特征与常规油气存在一定的差异。

一、页岩油资源特征

(一) 页岩油资源丰富

自 20 世纪 60 年代以来,我国陆上含油气盆地在常规油气勘探中陆续发现“泥页岩裂缝性油藏”,限于当时理论、技术与认识的局限,并未引起石油工作者的重视。近年来,随着北美页岩油气的快速发展及勘探开发工程技术的成熟,国内对页岩油勘探越来越关注,多个地区相继发现了页岩油的存在。在鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、南襄盆地、江汉盆地等多个地区实现了页岩油勘探突破。其中南襄盆地泌阳凹陷页岩油水平井——泌页 HF1 井,15 级大型分段压裂后最高日产油 23.6m^3 ;渤海湾盆地济阳拗陷页岩油水平井——渤页平 1 井,第 1 级压裂后日产油 2.29m^3 ,第二级压裂后日产油 8.22m^3 。

我国陆相盆地众多,几乎所有的含油气盆地均广泛发育有富有机质页岩,为页岩油形成提供了物质基础。初步估计我国页岩油地质资源量约 $1420 \times 10^8\text{t}$,可采资源量在 $(30 \sim 60) \times 10^8\text{t}$ 以上(邹才能,2013),主要分布于鄂尔多斯、渤海湾、松辽、柴达木、酒西、三塘湖、吐哈、南襄、江汉、苏北、准噶尔等盆地,各盆地的页岩油资源量规模与盆地大小及页岩的分布面积、厚度、有机质丰度密切相关(图 1-3-1、表 1-3-1)。

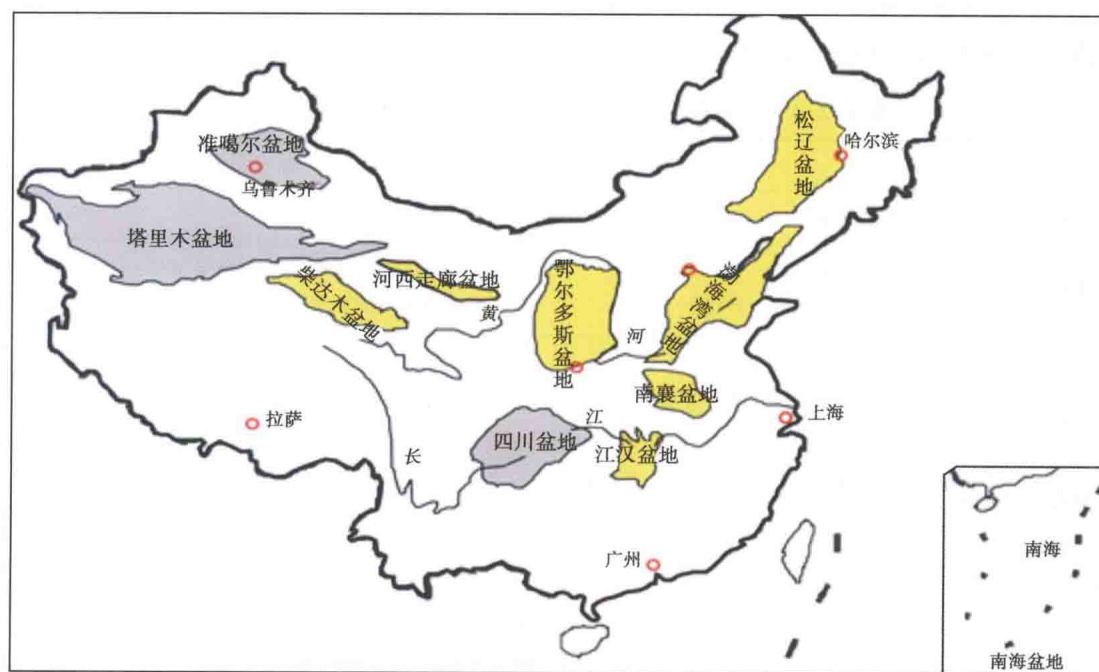


图 1-3-1 中国主要陆相页岩油盆地分布图(据姜在兴,2012)

(二) 资源富集特征

常规油气勘探开发主要通过“生、储、盖、圈、运、保”的基本成藏要素和评价方法来寻找油气富集地区,而页岩油是不受构造控制、未经运移原位聚集成藏、大面积连续分布的非常规油藏。其成藏特征与常规油气有着本质差别,没有圈闭概念,勘探开发主要是通过地质、地球物理等评价方法来寻找页岩油富集区,即富有机质、高脆性矿物含量、低地应力、裂缝发育、物性较好的“甜点”区。

表 1-3-1 中国陆相湖盆页岩油可采资源量表 (据邹才能等, 2013)

盆地名称	层位	页岩分布面积 (10^4km^2)	可采资源量 (10^8t)
鄂尔多斯	三叠系	8.0~10.0	25~35
渤海湾	沙河街组	9.0~11.0	20~25
松辽	白垩系	8.0~9.0	20~25
柴达木	古近系	2.0~3.0	5~8
酒西	白垩系	0.3~0.5	2~3
三塘湖	二叠系	0.5~1.0	3~5
吐哈	侏罗系	0.7~1.0	2~3
江汉	古近系	0.2~0.3	1~2
南襄	古近系	0.04	0.7~1.5
苏北	古近系	0.2~0.3	1~2

(三) 资源评价特点

常规油气以“预测、控制、探明”三级储量来衡量油气储量规模,而页岩油则没有“三级”储量的概念,主要用地质资源量、可采资源量、单井井控储量来衡量,目前对于国内陆相页岩油地质资源量和可采资源量仅是初步评价值。在页岩油勘探开发进程中,采用边打井、边评价的方式,往往通过单井井控储量来评价资源规模、富集程度及开发经济性。

二、页岩油勘探开发技术

(一) 页岩储层需特大型压裂改造

页岩储层物性差,孔隙度为4%~6%,基质渗透率小于0.001mD,是典型的特低孔超低渗储层,常规试油没有自然产能,需要经过大型人工压裂改造形成工业产能。页岩储层自身发育有较多天然裂缝,且岩石具有一定的脆性,压裂指数较高,水平各向异性差异系数小,因此,压裂改造易形成网状裂缝系统,增加泄油面积,大大提高了页岩油产能。目前适合于页岩油气的压裂技术,主要有水力压裂、水平井多级分段压裂、同步压裂和重复压裂等几种。

(二) 以水平井开采为主

为提高页岩油气产量,通常利用水平井开采,水平井的产量是直井的3~4倍以上,成本仅是直井的1.5~2倍。目前美国85%的页岩油气开发井为水平井+多级分段压裂,据美国页岩油气井资料统计,40%的井初期裸眼测试时无天然油气流,55%井初始无阻流量达不到工业产能。页岩气直井压裂平均产量达 $0.8 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 左右,水平井压裂平均产量则可达 $10 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 以上,最高达 $30 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$;页岩油水平井最高产量达到 $80 \text{m}^3/\text{d}$ 以上。通过水平井的钻探及压裂改造,可以极大地提高产能(图1-3-2)。同时水平井的钻探可以减少地面设施,避开地面不利条件,延伸开采范围。

(三) 井工厂开采模式

页岩油气开采不同于常规油气的井网开采模式,大多采用水平井井组的“井工厂”开采模式。优选页岩油“甜点区”,按照先易后难的原则,分区块、分层系合理科学部署开发井,实行标准化设计、工厂化作业、高效化生产的工作模式,加快产能建设步伐。目前美国页岩油气均采用丛式水平井开发,即在同一井场钻丛式井组,每个井组3~8口单支水平井,

水平井段间距 300~400m, 水平段长度 1000~3000m, 有效节约了钻探成本, 提高了经济效益。

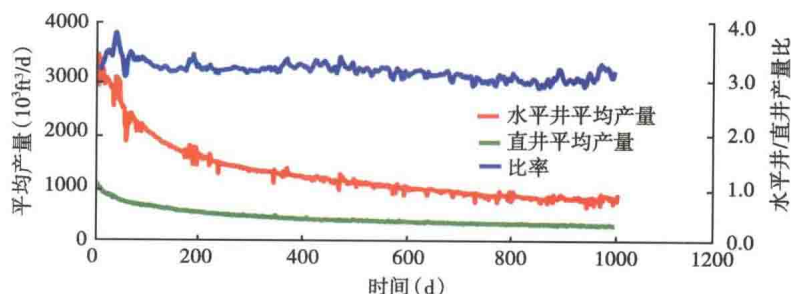


图 1-3-2 美国页岩油气水平井与直井平均产量差异

三、页岩油生产特征

(一) 单井产量早期递减快, 后期稳定产量生产周期长

页岩油气产量早期以裂缝介质产出为主, 产量较高, 随着开发进程, 裂缝内易于流动的原油大部分被采出, 单井产量大幅度递减, 递减到一定程度后, 页岩油主要以基质孔隙介质产出为主, 原油渗流慢, 产量低, 但是相对稳产时间较长。以美国页岩油气开采的特征来分析, 预测页岩油气田开采寿命可达 30~50 年 (图 1-3-3)。

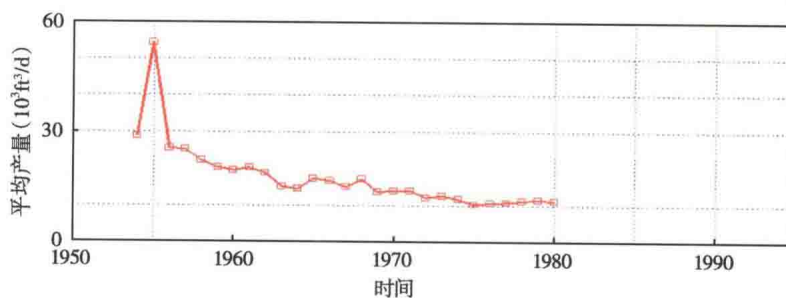


图 1-3-3 美国页岩油气井产量曲线变化图

(二) 采收率较低, 变化范围较大

页岩油气采收率一般在 5%~60% 之间。相比于页岩气, 页岩油分子直径更大, 流动性差, 采收率较低。在目前勘探开发工艺技术水平下, 页岩油的采收率一般在 15% 左右, 美国典型的页岩油藏 Bakken 页岩油采收率为 8%~16%。

综上所述, 页岩油的勘探开发更加注重地质与工程的结合、勘探与开发的结合、技术与经济的结合, 进而实现页岩油气规模经济有效勘探开发。

第二章 陆相页岩油形成机理及富集影响因素

沉积特征是陆相页岩油形成的地质背景，生烃条件、储集条件、脆性特征及保存条件是页岩油形成的基本条件，页岩油赋存方式是研究页岩油成藏机理的关键，富集影响因素是评价页岩油甜点区的重要参数。

第一节 陆相页岩的沉积特征

我国陆相页岩总体上具有分布范围广、层系多、厚度大、有机质丰度高、有机质类型好，具备形成陆相页岩油的良好物质基础。

一、中国陆相页岩沉积特征

(一) 分布特征

中国陆相页岩分布范围广泛，覆盖了除青藏地区以外的广大地区，西北、华北、东部、西南、东南地区均有分布。页岩赋存层系从新生界到上古生界，但主要见于中—新生界；且受古亚洲洋、特提斯—古太平洋和印度洋—太平洋三大动力学体系控制，页岩形成时代从西北到东南方向逐渐变新，即上古生界页岩资源主要分布在中西部的鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地等地区，中生界页岩主要分布在东部和中部的松辽盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地等地区，新生界页岩资源主要分布在东部的渤海湾盆地、南襄盆地、江汉盆地、苏北盆地等地区（图 2-1-1）。因此，页岩分布盆地既有大型坳陷盆地、断陷盆地，也有小型断

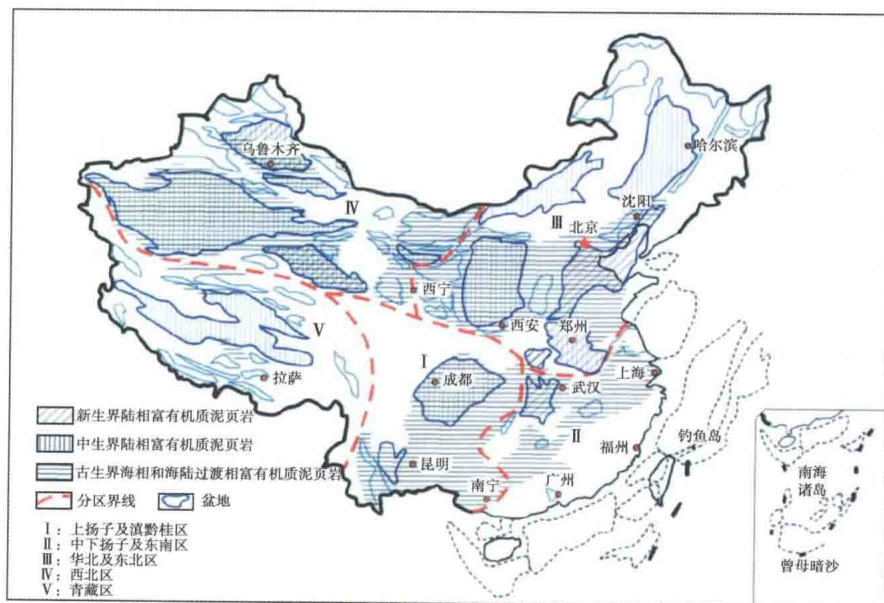


图 2-1-1 中国富有机质页岩分布图（据林腊梅等，2013）