

非常规油气资源现实的勘探开发领域

# 致密油气

赵政璋 杜金虎 等著



石油工业出版社

责任编辑：胡宇芳

封面设计：赛维玉

责任校对：廉存芳

ISBN 978-7-5021-9360-7



9 787502 193607 >

定价：85.00 元

非常规油气资源现实的勘探开发领域

# 致密油气

赵政璋 杜金虎等著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书理论联系实际,阐述了当前我国致密油气地质理论、勘探开发、油气层评价与工程技术等方面的最新成果与认识。围绕致密油气定义、特征、形成与分布规律,如何实现有效勘探开发及其适用技术等问题进行了深入分析与探讨,并展望了致密油气未来的发展前景。

本书可供石油勘探专业技术人员使用,也可作为大专院校相关专业的辅助教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

致密油气 / 赵政璋等著. —北京:石油工业出版社, 2012.11

ISBN 978-7-5021-9360-7

I . 致…

II . 赵…

III . ①致密砂岩-砂岩油气藏-油气勘探

②致密砂岩-砂岩油气藏-油气田开发

IV . ① P618.130.8

② TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 267864 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.cn

编辑部: (010) 64523560 发行部: (010) 64523620

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

---

2012 年 11 月第 1 版 2013 年 6 月第 2 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 13

字数: 276 千字

---

定价: 85.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

致密油气作为非常规油气资源之一，分布广泛潜力巨大。近年来，随着页岩气水平井加体体积压裂改造技术的突破，致密油气已经成为现实接替领域，勘探开发活动日趋活跃，发展迅猛。美国是致密油气勘探开发的领跑者，20世纪80年代初，致密气勘探开发取得重大突破，2011年产量达到了 $1690 \times 10^8 \text{m}^3$ ，约占美国天然气总产量的26%。最近10年，美国的致密油勘探开发在巴肯(Bakken)和鹰滩(Eagle Ford)等地区又获得重大进展，2011年致密油产量达 $3000 \times 10^4 \text{t}$ ，扭转了美国持续24年的石油产量下降趋势。目前，很多国家借鉴页岩气勘探开发思路与技术，在重新评价本国的致密油气资源，开展工业化先导试验，积极开展致密油气的勘探开发工作。

我国致密油气的勘探开发起步较晚，近年来，随着水平井和体体积压裂改造技术的推广应用，勘探开发也取得了重大的进展，有效地开发了世界单体规模最大的苏里格致密气田，成功发现了鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段、长6<sub>3</sub>亚段、准噶尔盆地吉木萨尔二叠系芦草沟组等典型的致密油藏。勘探实践证明，我国的致密油气具有良好的资源前景，是非常规资源中最为现实的勘探领域，是未来油气勘探最为重要的接替领域。

由于我国致密油气勘探开发总体处于初级阶段，致密油气成藏地质理论系统研究和认识程度还比较低，勘探开发理念、工作思路、工作程序、工作方法正在形成，关键技术的规模推广应用特别是再创新还面临着很多挑战。为了适应目前我国致密油气发展的需要，有效推动我国致密油气的勘探开发进程，赵政璋、杜金虎同志超前谋划及时编著了“致密油气”一书，该专著是目前国内第一部关于致密油气成藏地质理论、勘探开发及关键技术的综合性书籍。本书在广泛调研世界致密油气地质理论的研究现状、重点剖析国内

外致密油气勘探开发典型实例的基础上，结合我国致密油气勘探开发所面临的挑战和存在问题，首次论述了致密油气地质理论，明确了致密油气的地质概念，揭示了致密油气基本地质特征、形成条件、分布规律及“甜点”主控因素，大胆地探讨了致密油气“甜点”的分类评价标准，勘探开发工作面临的难点及工作理念、工作思路、工作程序和方法，系统介绍了目前国内外致密油气最前沿的油气层评价、水平井、体积压裂三大关键技术，描绘了我国致密油气勘探开发前景。

该专著风格独特，图文并茂，语言简练，深入浅出。相信该专著的出版将对我国致密油气的勘探开发工作具有现实的指导意义。

中国石油天然气集团公司总经理  
中国石油天然气股份有限公司总裁

周吉平

2012.11.13

近年来，以致密油气、页岩气、重油和油砂为代表的非常规油气资源成功实现了规模开发，推动全球油气工业进入了常规资源与非常规资源并重发展的新阶段。在众多的非常规油气资源类型中，致密油气的分布具有普遍性，资源潜力很大。据国际能源署（IEA）报道，全球约有70个盆地发育致密气，远景资源量约 $210 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。目前，很多国家在重新评价本国的致密油气资源，积极开展工业化先导试验，开发利用致密油气已成为未来油气工业发展的必然趋势。

致密油气在国外发展较早，其中美国最具有代表性。20世纪80年代初，在一系列鼓励政策支持下，美国致密气勘探开发率先获得重大突破，并进入快速发展阶段。到1990年，美国致密气产量已突破 $600 \times 10^8 \text{m}^3$ ，1998年突破 $1000 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2011年产量为 $1690 \times 10^8 \text{m}^3$ ，约占美国天然气总产量的26%。最近10年，美国的致密油勘探开发获得重大进展，其中最具代表性的是巴肯（Bakken）和鹰滩（Eagle Ford）致密油。2000年，在威利斯顿盆地巴肯组中部的低渗透白云质粉砂岩中发现了规模致密油资源，致密油勘探获得突破。2005年以来，借鉴页岩气勘探开发思路与技术，大规模推广应用水平井及分段压裂技术，巴肯致密油实现规模开发，产量快速上升。2011年，美国致密油产量达 $3000 \times 10^4 \text{t}$ ，扭转了美国持续24年的石油产量下降趋势。

我国致密油气的发展起步较晚，近年来随着水平井和压裂改造技术进步及规模化应用，提高了单井产量，大大降低了成本，推动致密油气勘探开发取得重大进展，先后发现了鄂尔多斯盆地苏里格、四川盆地川中须家河组和塔里木盆地库车凹陷等一批大型致密气区，发现了鄂尔多斯盆地长7段、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组、松辽盆地扶杨油层等致密油区。截至2011年底，全国致密气累计探明地质储量已达 $3.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占全国天然气总探明储量的近40%；2011年全国致密气产量约 $168 \times 10^8 \text{m}^3$ 。致密油气已成为目前最为现实的非常规油气资源，受到广泛关注和高度重视。

2012年3月，中国石油天然气集团公司组织召开了具有里程碑意义的“致密油气勘探推进会”，系统分析了我国致密油气形成条件及资源潜力，明确了致密油气勘探的工作思路和目标，优选出鄂尔多斯盆地上三叠统延长组、准噶尔盆地二叠系芦草沟组等8个致密油气重点勘探领域，进行了整体规划和部署。目前，重点探区致密油气勘探已取得重要进展，有望成为重要的接替资源。

我国致密油气勘探开发总体处于起步阶段，研究与认识程度较低，理论技术发展还面临着很多挑战。首先是在成藏地质理论方面，由于缺乏系统、深入的研究，关于致密油气的概念、内涵、评价标准和“甜点”富集规律需要

进一步讨论和明确；二是油气层识别、水平井及体积压裂等关键技术还处于引进消化阶段，针对我国较为复杂的地质与地面条件，存在很多不适应性；三是如何实现经济有效开发还处于探索阶段，特别是工厂化钻井、提高采收率等关键技术还不成熟；四是致密油气勘探开发工作理念与管理方式面临很多挑战。

编写本书的目的正是为了适应目前我国致密油气发展的需要，在深入剖析国内外致密油气勘探开发典型实例、系统总结国内外致密油气勘探开发理论与技术新进展的基础上，进一步明确致密油气概念，揭示致密油气基本地质特征、分布规律及其评价标准，明确致密油气勘探开发关键技术及其应用前景，探讨致密油气有效勘探开发理念、工作思路和方法，分析我国致密油气资源潜力与发展前景，有效推动我国致密油气的勘探开发进程。

在本书编写过程中，作者试图突破专业书籍的传统模式，采取提出关键问题、回答或讨论的方式，结合国内外典型案例，理论与实践相结合、专业与科普相结合，围绕致密油气“有哪些基本特征”、“致密油气如何形成”、“如何实现有效勘探开发”、“如何评价致密油气层”以及“水平井钻探与体积压裂技术”等读者关心的问题，力图深入浅出地对致密油气勘探开发及关键技术进行全景式的勾绘。编写过程中注重言简意赅、图文并茂，希望对油气勘探开发专业人员有所启发，对油气行业管理人员及非专业人员了解致密油气有所帮助。

本书共五章。前言由杜金虎编写；第一章“致密油气地质理论”由赵政璋、邹才能、李建忠、郭彬程等编写；第二章“致密油气勘探”由杜金虎、何海清、杨涛等编写；第三章“致密油气开发”由宋新民、马德胜等编写；第四章“致密油气层评价”由刘国强、孙中春、李国欣等编写；第五章“水平井钻完井与体积压裂技术”由郑新权、查永进、崔明月、张绍礼等编写；“结束语”由赵政璋编写。全书统一由杜金虎统稿、由赵政璋审定。

在本书编写过程中，参与编写的人员还有李欣、黄福喜、闫伟鹏、周体尧、鄢雪梅等，同时得到了中国石油勘探与生产分公司、中国石油勘探开发研究院、中国石油钻井研究院以及相关油气田等单位领导和专家的大力支持与帮助，顾家裕教授、刘合教授、周灿灿教授等专家对书稿提出了宝贵的修改意见，在此一并谢忱。由于时间关系，书中不妥之处在所难免，恳请各位专家和学者批评指正。



- **第一章 致密油气地质理论/001**
  - 第一节 什么是致密油气/001
  - 第二节 致密油气有哪些基本特征/003
  - 第三节 致密油气如何形成与分布/013
- **第二章 致密油气勘探/042**
  - 第一节 致密油气综合评价/042
  - 第二节 “四步”法勘探/055
  - 第三节 准噶尔盆地吉木萨尔致密油快速勘探/062
- **第三章 致密油气开发/070**
  - 第一节 致密油气开发面临“三大难关”/070
  - 第二节 致密油气如何实现有效开发/080
- **第四章 致密油气层评价/099**
  - 第一节 致密油气评价的特点/099
  - 第二节 致密油气“七性关系”评价/105
  - 第三节 致密油气测井综合评价/128
  - 第四节 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷致密油评价/134
- **第五章 水平井钻完井与体积压裂技术/143**
  - 第一节 水平井钻完井与体积压裂技术的起源  
与发展/143
  - 第二节 水平井钻完井/150
  - 第三节 致密油气层体积压裂/163
  - 第四节 如何有效降低工程成本/180
- **结束语/189**
- **参考文献/192**

# 第一章 致密油气地质理论

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。

致密油气有5项基本特征：储层物性差，分布面积大；资源丰度低，局部有“甜点”；油气水关系复杂，不完全受圈闭控制；一般存在压力异常，原油性质好；改造后初期产量高、递减快、生产周期长。

致密油气的形成受控于4大要素：稳定宽缓的构造背景；大面积分布的优质烃源岩；大面积分布的非均质致密储层；源储紧密接触与短距离运移聚集。

“致密”二字对油气行业而言，可谓既熟悉又陌生。所谓“熟悉”，是指过去在油气勘探开发过程中发现了大量的低渗透、特低渗透的储层，物性比常规储层明显要差，一般通俗地冠以“致密”的称呼，意思等同于非储层或者难动用，或者该储层内的油气资源没有经济开发价值。所谓“陌生”，则是指北美致密油气已实现规模经济开发的时候，我国致密油气尚处于探索阶段，对于什么是致密油气、致密油气有哪些特征、是如何形成的等基础地质理论认识，并没有形成统一、准确的共识。本章在引入国外致密油气基本概念的基础上，结合国内勘探实践和最新研究认识，进一步规范了我国致密油气的概念和内涵，并探讨致密油气的基本地质特征及其形成的主控因素。

## 第一节 什么是致密油气

致密油气属于非常规油气资源范畴，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。致密油与致密气的差异主要表现在两个方面：一是烃源岩热演化程度的差异；二是对有效储层下限的要求存在差异。致密储层除最常见的致密砂岩和致密碳酸盐岩外，也应包括致密火成岩和变质岩等，但在实际勘探开发工作中主要指最常见的砂岩和碳酸盐岩类，其他岩类致密储层油气及其开发方式需另外讨论。因此，人们在实际应用中常省去“储层”或“砂岩储层”或“碳酸盐岩储层”等字而简称为致密油、致密气。目

前，国内外关于致密气的认识较为统一，而致密油的研究和勘探刚刚起步，其认识程度相对较低，尚存在一定争议。

## 一、致密油气定义与内涵

### 1. 致密油

致密油是指夹在或紧邻优质生油层系的致密碎屑岩或者碳酸盐岩储层中，未经过大规模长距离运移而形成的石油聚集，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。致密层的物性界限确定为地面空气渗透率小于 1mD、地下覆压渗透率小于 0.1mD 左右。

目前国内外发现的致密油层主要有两种聚集类型，一类是烃源岩内部的碳酸盐岩或碎屑岩夹层，另一类为紧邻烃源岩、分布在烃源岩上下的致密储层。美国目前开采最成功的致密油产层包括 Bakken 组、Eagle Ford 组以及 Niobrara 组等碳酸盐岩与砂岩储层，均以第一种类型为主。准确理解致密油概念需要把握两个关键点，一是分布于优质烃源岩范围之内，垂向上夹持于或紧邻生油岩；二是储油层必须具备一定的基质孔隙。

### 2. 致密气

致密气是致密砂岩气的简称，是指夹在或紧邻优质气源岩的致密砂岩中，未经过大规模长距离运移而形成的天然气聚集，由低渗透—特低渗透砂岩储层储集的天然气，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。需要说明的是，本书所讨论的致密气不包括致密砂岩以外其他类型致密储层的天然气，如火山岩、碳酸盐岩等。

目前，国家能源局已经采用了中国石油提出的致密气地质评价方法并予以发布，成为我国的行业标准（SY/T 6832—2011）。该标准对致密砂岩气的界定为：覆压基质渗透率不大于 0.1mD 的砂岩气层，单井一般无自然产能，或自然产能低于工业气流下限，但在一定经济条件和技术措施下，可以获得工业天然气产量。通常情况下，这些措施包括压裂、水平井、多分支井等。覆压基质渗透率采用不含裂缝岩心（基质），在净上覆岩压作用下测定的渗透率。

与致密油不同的是，致密气与烃源岩的关系可以有两种情况：一是致密砂岩储层与烃源岩间互，烃源岩以煤系为主；二是致密砂岩可以距烃源岩层有一定的距离，并非紧密接触，烃源岩可以是海相，也可以是陆相。

## 二、致密油气与页岩油气区别

页岩油气包括页岩油和页岩气等，世界上形成工业产量的页岩油绝大多数产自裂缝性泥页岩。目前，国内外有将致密油气与页岩油气概念混用的现象，而致密油气与页岩油气的烃源岩基本相同，可以是纯泥岩，也可以是泥页岩或高碳泥页岩；但在储集体和运聚成藏机理等方面存在明显差异。从储层来看，致密油气主要赋存空间是碳酸盐岩或碎屑岩，不包括泥页岩。从聚集来看，致密油气是油气生成后经过近距离的运移，而页岩油气无运

移或只发生过初次运移、滞留在页岩中（图 1-1）。

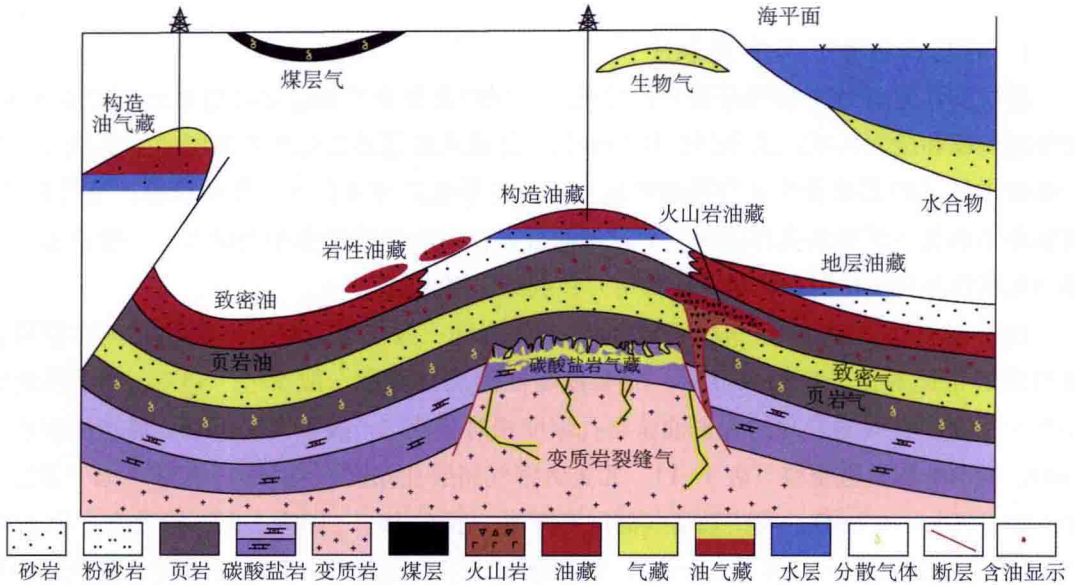


图 1-1 常规与非常规油气分布模式

### 1. 页岩油特指页岩中的石油，目前尚未真正突破

页岩油是指滞留在纯泥岩或页岩中的石油聚集，实际上是残留在页岩中的石油。页岩油与页岩气相对应，储层就是生油岩。目前尚不清楚页岩内部的孔隙是否具有形成工业性石油聚集的能力，过去在泥页岩中获得的石油主要来自裂缝，还没有在真正的泥页岩中发现工业产量的报道。

### 2. 页岩气是指页岩中的天然气，已经获得突破

页岩气是指以游离和吸附方式，主要赋存在富含有机质的页岩层系内部的天然气，岩性包括页岩、泥岩及其他岩性构成的薄夹层。页岩气实际上是残留在气源岩中的天然气，美国已经发现了大量的页岩气产层，2011 年页岩气产量  $1760 \times 10^8 \text{m}^3$  左右，占天然气总产量的 27%。我国正在开展页岩气技术攻关和先导试验，并已在四川等盆地发现了工业性页岩气流。

## 第二节 致密油气有哪些基本特征

致密油气藏具有与常规油气藏不同的地质特征，主要表现为储层致密、资源丰度低、大面积含油气、“甜点”区局部富集，油气水关系复杂、不完全受圈闭控制，普遍存在压力异常、原油性质好以及改造后初期产量高、递减快、生产周期较长等基本特征。中国鄂尔多斯盆地延长组致密油是典型的例子。

## 一、致密油气基本地质特征

### 1. 储层物性差，分布面积大

储层物性差是致密油气最基本的特征。中国的致密砂岩储层多与煤系地层发育有关，酸性的沉积和成岩环境以及挤压的构造背景，是煤系地层形成低渗透储层的主要原因，其中低渗透储层的形成受成岩作用的影响较大，主要包括压实作用、胶结作用、交代作用、溶蚀作用和黏土矿物转化作用等。而且不同成岩作用的影响程度相差较大，一般以压实作用（包括机械压实作用和化学压实作用）和胶结作用为主。

致密储层地下渗透率一般小于 0.1mD，孔隙度一般小于 10%。中国和北美典型致密油气储层特征对比分析结果显示，北美致密油储层孔隙度一般 5% ~ 13%，地下渗透率 0.01 ~ 1.0mD；我国发现的致密油储层孔隙度相对较低，一般不大于 12%，渗透率多小于 1mD，横向非均质性更强（表 1-1）。北美致密气储层孔隙度一般 5% ~ 12%，地下渗透率多介于 0.005 ~ 0.2mD；我国致密气储层孔隙度一般在 4% ~ 10% 之间，渗透率小于 1mD 的样品比例占 80% ~ 92%（表 1-2）。致密储层除了物性差外，其非均质性也较强，即使在很短的距离内，单井产量可差 10 倍。

表 1-1 中美致密油储层主要参数对比表

盆地	威利斯頓	南得克萨斯	鄂尔多斯	准噶尔	四川	渤海湾	松辽	柴达木	酒泉
层位	Bakken	Eagle Ford	延长组	二叠系芦草沟组	侏罗系	沙河街组	白垩系	古近系、新近系	白垩系
岩性	白云质—泥质粉砂岩	海相泥灰岩	粉细砂岩	灰质粉砂岩、白云岩	粉细砂岩、介壳灰岩	粉细砂岩、碳酸盐岩	粉细砂岩、碳酸盐岩	泥灰岩、藻灰岩、粉砂岩	粉砂岩、碳酸盐岩
厚度 (m)	5 ~ 55	30 ~ 90	20 ~ 80	80 ~ 200	10 ~ 60	100 ~ 200	5 ~ 30	100 ~ 150	100 ~ 300
孔隙度 (%)	5 ~ 13	2 ~ 12	2 ~ 12	3 ~ 10	0.2 ~ 7	5 ~ 10	2 ~ 15	5 ~ 8	5 ~ 10
渗透率 (mD)	0.1 ~ 1.0	< 0.01	0.01 ~ 1	< 1.0	0.0001 ~ 2.1	0.2 ~ 1.0	0.6 ~ 1.0	< 1.0	< 0.01
有利面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	7.0	4.0	2.5	0.56	3.8	2.2	2.5	1.5 ~ 2	0.2

同时，致密储层具有分布面积大的特点。纵观中国和北美典型致密油区储层分布特征，致密油储层岩性主要为粉细砂岩和泥灰岩、灰质白云岩等碳酸盐岩，其发育程度和展布规律主要受盆地性质和沉积环境控制。威利斯頓 (Williston) 盆地面积  $34 \times 10^4 \text{km}^2$ ，Bakken 致密油储层以云质粉砂岩、生物碎屑砂岩、钙质粉砂岩为主，单层厚 5 ~ 10m，累计厚度达 55m；埋深 2590 ~ 3200m，含油面积  $7 \times 10^4 \text{km}^2$ ；南得克萨斯盆地的 Eagle Ford 含

油面积也达  $4 \times 10^4 \text{km}^2$ 。我国致密油储层主要分布在中新生代陆相盆地，如鄂尔多斯盆地长7段致密油分布面积约  $2.5 \times 10^4 \text{km}^2$ ；四川盆地川中侏罗系大安寨组介壳灰岩分布面积约  $1.5 \times 10^4 \text{km}^2$ ；渤海湾盆地古近系沙河街组粉细砂岩、白云岩储层分布面积约  $2.2 \times 10^4 \text{km}^2$ ；松辽盆地白垩系青山口组粉细砂岩、湖相碳酸盐岩致密储层分布面积约  $2.5 \times 10^4 \text{km}^2$ ；柴达木盆地西部地区古近系、新近系泥灰岩、藻灰岩和粉砂岩储层分布面积超过  $1.5 \times 10^4 \text{km}^2$ 。

表 1-2 中美致密气储层主要参数对比表

盆地	丹佛	圣胡安	阿巴拉契亚	鄂尔多斯			四川		
油气田	Wattenberg	Blanco Mesaverde	Appalachian	苏里格		榆林	合川		广安
层位	Muddy	Mesaverde	Clinton-Medina	盒8段	山1段	山2段	须二(潼南2)段	须六段	须四段
目的层埋深(m)	2070 ~ 2830	1677 ~ 1900	1220 ~ 1829	2850 ~ 3600	2900 ~ 3700	2500 ~ 3000	2000 ~ 2200	1860 ~ 2560	2300 ~ 2650
目的层厚度(m)	50 ~ 100	121 ~ 274	45.7	45 ~ 60	40 ~ 50	40 ~ 60	60 ~ 100	94 ~ 172	72 ~ 129
孔隙度(%)	8 ~ 12	9.5	5 ~ 10	6 ~ 12	6.57	6.2	6 ~ 10	1 ~ 8 4.6	2 ~ 12 5.84
渗透率(mD)	0.05 ~ 0.005	0.5 ~ 2	< 0.1	0.05 ~ 10 0.88	0.05 ~ 10 0.67	0.15 ~ 1.2	0.1 ~ 0.8	0.1 ~ 0.13	0.38
地层压力(MPa)	异常低压	异常低压	低压	26	25	27.2	30.64	21.63	31 ~ 35
含水饱和度(%)	44	34	自由水饱和度高	36	37	26	39.2	46	44
含气饱和度(%)	56	66	/	63.7	63.2	74.5	60	53.7	56
含气面积(km <sup>2</sup> )	300(估算)	410	44011	6748	4015	1716	656	200	415
有效厚度(m)	3 ~ 15.2	24	30 ~ 45	7.8	6.3	8.3	10 ~ 22	34.2	10.6

致密砂岩气储层主要发育在相对稳定与宽缓的凹陷与斜坡区，平面上延伸距离可达 150 ~ 200km，含气面积大；纵向上，多期砂体错综叠置，累计厚度大，一般 30 ~ 100m。如美国落基山地区阿巴拉契亚盆地含气面积超过了  $4 \times 10^4 \text{km}^2$ ；南部的圣胡安前陆盆地，含气砂岩面积超过  $1 \times 10^4 \text{km}^2$ 。其中，Mesaverde 群以河流相与三角洲分流河道沉积为主，砂体呈透镜状展布，砂岩有效厚度大 (24m)，含气砂岩面积  $410 \text{km}^2$ ，纵向多层叠置。中国鄂尔多斯盆地石炭系一二叠系为陆表海缓坡沉积环境的三角洲与分流河道席状砂，透镜状与层状砂体共生，砂体有效厚度为 6.3 ~ 8.3m，致密储层展布面积达  $10 \times 10^4 \text{km}^2$ ，含气砂岩面积超过  $3.5 \times 10^4 \text{km}^2$ 。其中苏里格气田探明的盒8段气藏面积达  $6478 \text{km}^2$ 。四川盆地须家河组须二段为海陆过渡相三角洲沉积，须四段、须六段致密气砂体为前陆盆地

性质的河道砂和地下水分流河道砂体，呈透镜状，砂体有效厚度大（10 ~ 34m），含气砂岩面积约  $3 \times 10^4 \text{km}^2$ ；其中，合川气田探明的须二段、须四段气藏含气面积 200 ~ 656  $\text{km}^2$ （表 1-2）。吐哈盆地侏罗系致密气在北部山前带、斜坡—凹陷区均有分布，有利面积  $0.95 \times 10^4 \text{km}^2$ 。

### 2. 资源丰度低，局部有“甜点”

致密油气的定义与地质要素特征，揭示了两层含义。一是致密油气虽然大面积连续分布，但是资源丰度低；二是单井一般无自然产能或自然产能低，但是局部存在富集“甜点”区。我国主要盆地致密气资源丰度普遍较低、而且变化也较大，一般  $(1 \sim 4) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 。勘探实践表明，凹陷型致密气资源丰度要比斜坡型高。如渤海湾盆地凹陷型致密气资源丰度为  $(7.6 \sim 9.7) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ ，四川盆地与鄂尔多斯盆地斜坡型致密气资源丰度为  $(0.5 \sim 3.9) \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ （表 1-3）。

表 1-3 中国主要致密气盆地资源丰度与单井产量统计表

盆地特征	鄂尔多斯	四川	松辽	吐哈	塔里木库车		准噶尔	渤海湾
地层	C—P	T <sub>3</sub> x	K <sub>1</sub> d	J <sub>1,2</sub> sh	J	K	J <sub>1</sub> b	Es <sub>3-4</sub>
埋深 (km)	2.0 ~ 5.2	2.0 ~ 5.2	2.2 ~ 3.5	3.0 ~ 3.7	3.8 ~ 4.9	5.5 ~ 7.0	4.2 ~ 4.8	3.5 ~ 4.8
有利面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	3.5 ~ 7.7	4.1	5	0.95	0.77	1.9	1.9	1.42
含气面积 (10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )	0.4 ~ 0.7	0.15	1.5	0.41	0.23	0.57	0.58	0.5
单井产量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /d)	1 ~ 3	微量, 压后 2.3	0.4 ~ 15	0.45 ~ 9.8	微量 ~ 6.6	17.8 (大北 101)	—	0.05 ~ 5
资源量 (10 <sup>12</sup> m <sup>3</sup> )	5.88 ~ 8.15	4.3 ~ 5.7	1.32 ~ 2.53	0.56 ~ 0.94	2.69 ~ 3.42		0.74 ~ 1.2	1.48 ~ 1.89
资源丰度 (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	0.5 ~ 1.2	1.0 ~ 3.9	1 ~ 2	3 ~ 7	8.7	11.5	2 ~ 4	7.6 ~ 9.7

由于致密油气资源丰度低、储层物性差，导致单井产量普遍较低。致密油气勘探开发数据统计结果表明，致密油直井单井初期日产量一般小于 10t，致密气直井单井初期日产量一般小于  $5 \times 10^4 \text{m}^3$ ，而且产量递减快，需要钻探大量井来弥补产量的递减。例如，四川盆地侏罗系致密油资源丰度在  $(7 \sim 11) \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$  的范围内，共有 960 口生产井，其中 733 口井产量大于 1.0t/d，227 口井产量介于 0.1 ~ 1.0t/d 之间。值得指出的是，致密油气资源丰度与单井日产量受储层非均质性影响很大，“甜点”区的单井日产量普遍较高。鄂尔多斯盆地苏里格气田单井产量一般  $(1 \sim 3) \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，而少数井最高超过  $100 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。这与“甜点”区有效烃源岩厚度大、储层物性相对较好、厚度大、储层可压性强和裂缝发育有关。

### 3. 油气水关系复杂, 不完全受圈闭控制

大范围连续分布是致密油气的重要特征之一。这种分布特征主要受广覆式有效烃源岩、大面积致密储层与层状排烃聚集等地质条件控制。我国致密油气在凹陷、斜坡与山前掩覆区均有分布。致密油主要分布在凹陷或斜坡区, 致密气主要分布在斜坡区和山前构造带。

致密油气一般没有统一的油气水界面, 油气水关系复杂, 成藏不完全受圈闭控制。通常, 致密油气边界受岩性和物性控制, 圈闭边界不明显, 可存在多个油气水界面和压力系统, 整体呈连续层状分布, 突破了常规油气带状分布和油气藏的理念。例如, 美国落基山地区致密气通常在盆地中部表现为气水倒置特征, 而盆地斜坡区无明显气水界面, 自盆地向斜坡区气、水含量百分比呈逐渐过渡趋势, 含气量减少、含水量增加。鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系总体表现为西倾单斜构造, 地层平缓, 挤压应力较弱, 致密气圈闭界限模糊, 气水关系复杂。

我国致密油的油水关系可以分为两类, 一类不含水或含水很少, 如鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油和准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系致密油; 另一类油水分布关系十分复杂, 如松辽盆地扶杨油层。

### 4. 普遍存在压力异常, 原油性质好

致密油气储层普遍具有异常超压, 除鄂尔多斯盆地延长组、吐哈盆地下侏罗统和松辽盆地南部表现为低压或常压特征外, 其他地区地层压力系数普遍较高, 一般 $1.2 \sim 1.8\text{MPa}/100\text{m}$ , 具有明显的超压特征。致密油气区超压的形成主要源于储层致密, 保存条件较好, 生成的油气或者运移进来的油气难以散失, 导致地层压力增大, 使得储集空间内的压力难以释放, 从而形成异常高压。北美落基山地区致密砂岩气储层普遍具有异常高压, 压力系数一般为 $1.4 \sim 1.7$ , 压力系数最高达 $1.94$ , 在 $2400 \sim 2740\text{m}$ 的深度会出现明显的压力异常。四川盆地、库车前陆盆地与渤海湾断陷盆地致密气也具有异常高压特征(图1-2)。

受构造稳定性、烃源岩热演化程度控制, 加上较好的保存条件, 致密油原油性质普遍较好, 原油密度一般 $0.7 \sim 0.85\text{g}/\text{cm}^3$ , 黏度主要介于 $0.3 \sim 3\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。如北美威利斯顿盆地 Bakken 组致密油, 储层孔隙度一般为 $2\% \sim 12\%$ , 渗透率多小于 $0.01\text{mD}$ , 原油 API 为 $41^\circ \sim 44^\circ$ , 密度 $0.80 \sim 0.82\text{g}/\text{cm}^3$ , 为轻质油。鄂尔多斯盆地三叠系长6段油层, 储层平均孔隙度 $8\%$ , 渗透率小于 $0.1\text{mD}$ , 地面原油密度 $0.83 \sim 0.85\text{g}/\text{cm}^3$ , 黏度 $1 \sim 55\text{mPa} \cdot \text{s}$ (表1-4)。

### 5. 改造后初期产量高、递减快、生产周期长

致密油气一般自然产能低、递减快, 局部发育“甜点”。由于致密油气层低孔低渗的特征, 储层必须通过压裂改造, 才能提高单井产量、获得经济价值。然而, 通过压裂改造后, 致密油气井初期产量虽然提高了, 但油气日产量递减很快, 而且生产周期长, 稳



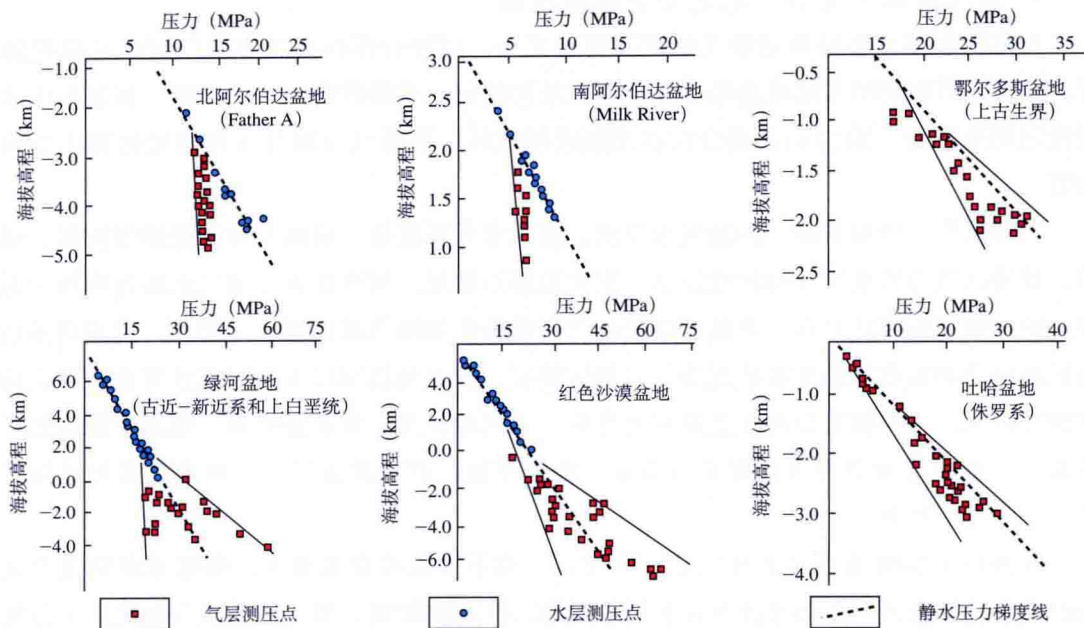


图 1-2 典型盆地致密砂岩气藏压力分布图

产主要依靠井间接替来实现。例如，加拿大西部沉积盆地的 Bakken, Cardium, Viking 和 Lower Shaunavon 4 个主要致密油区带的生产井初始产量都很高，但下降迅速，9 ~ 12 个月开始进入稳定低递减阶段。其中，Bakken 组致密油单井初期日产量在 25 ~ 30m<sup>3</sup>，单井日产量稳定在 2 ~ 5m<sup>3</sup> (图 1-3)。

表 1-4 国内外致密油原油基本特征

盆地	层位	烃源岩成熟度 $R_o$ (%)	原油密度 (g/cm <sup>3</sup> )	原油黏度 (mPa·s)	压力系数 (MPa/100m)
鄂尔多斯	延长组	0.7 ~ 1.2	0.70 ~ 0.85	0.97	0.75 ~ 0.85
准噶尔	芦草沟组	0.6 ~ 1.5	0.88 ~ 0.89	55 ~ 125	1.1 ~ 1.8
四川	大安寨段	0.5 ~ 1.6	0.70 ~ 0.87	3.2 ~ 9.8	1.23 ~ 1.72
渤海湾	沙河街组	0.5 ~ 2.0	0.67 ~ 0.85	1 ~ 13	1.3 ~ 1.80
松辽北部	青山口组	0.5 ~ 2.0	0.78 ~ 0.87	0.8 ~ 1.3	1.20 ~ 1.58
松辽南部	泉头组	0.5 ~ 2.0	0.72 ~ 0.78	1.4 ~ 1.9	0.97 ~ 1.06
三塘湖	二叠系	0.6 ~ 1.2	0.85 ~ 0.9	—	1.2 ~ 1.3
柴达木	古近系	0.51 ~ 0.82	0.72	—	1.47
酒泉	白垩系	0.5 ~ 0.8	0.82 ~ 0.94	1.01 ~ 1.9	1.2 ~ 1.3
威利斯顿	上泥盆统	0.6 ~ 1.0	0.81 ~ 0.83	0.3 ~ 0.4	1.35 ~ 1.58
南得克萨斯	白垩系	0.5 ~ 1.5	0.82 ~ 0.87	—	1.35 ~ 1.80