



中国石油勘探开发研究院出版物

MEI GUO ZHI MI SHA YAN QI CANG
DI ZHI TE ZHENG
YU KAI FA JI SHU

美国致密砂岩气藏 地质特征与开发技术

万玉金 韩永新 周兆华 等编著

石油工业出版社



中国石油勘探开发研究院出版物

美国致密砂岩气藏地质特征与开发技术

万玉金 韩永新 周兆华 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了美国致密砂岩气藏的资源潜力、分布状况、地质特征和开发特点,以及气藏描述、钻采工艺、增产改造和井网加密等致密砂岩气开发的关键技术。并以 Jonah 气田为例,概述了气田的勘探开发历程及其地质与开发特点等,最后综述了美国非常规天然气勘探开发的启示,希望对我国的致密砂岩气开发有所借鉴。

本书可作为气田现场开发技术人员的培训教材,亦可供气田现场地质及工程技术人员、高等院校相关专业师生参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

美国致密砂岩气藏地质特征与开发技术/万玉金等编著.

北京:石油工业出版社,2013.3

ISBN 978-7-5021-9463-5

I. 美…

II. 万…

III. ①致密砂岩-砂岩油气藏-地质特征-美国

②致密砂岩-砂岩油气藏-油田开发-美国

IV. ①P618.130.2 ②TE343

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 011932 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)64219111 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

2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:16.25

字数:370 千字

定价:90.00 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

《美国致密砂岩气藏地质特征与开发技术》

编 委 会

主 任：万玉金

副主任：韩永新 周兆华

成 员：张满郎 石 石 胡 勇 郭振华

李素珍 李文魁 黄家强 王 云

郑国强 杨依超 谷江锐 嫣雪梅

罗瑞兰 初广震 郭长敏 周 拓

主 编：万玉金

副主编：韩永新 周兆华

前 言

致密砂岩气藏具有储层物性差、非均质性强、单井产量低等特点,给地质家和油藏工程师带来了前所未有的挑战。国外致密砂岩气实现规模开发的国家,目前主要有美国和加拿大。美国致密砂岩气开发的历史超过40年,在20世纪70年代末非常规天然气优惠政策的促进下,致密砂岩气开发规模持续增大,并形成一套较为成熟的勘探开发技术,也积累了丰富的经验。

为了推动我国致密砂岩气的勘探开发,将美国在致密砂岩气勘探开发方面的管理经验、致密砂岩气藏的概念、定义、地质特征、开发生产特征和开发关键技术介绍给我国读者,在调研的基础上,形成了本书。

本书以公开发表的文献资料为基础,力求系统、客观地介绍美国致密砂岩气的地质特征与开发技术。全书共分六章,第一章介绍了美国致密砂岩气勘探开发概况,主要包括致密砂岩气的定义、致密砂岩气藏的分类,以及美国致密砂岩气资源分布特征及其勘探开发简况;第二章描述了美国致密砂岩气藏地质特征,主要针对中西部落基山前陆盆地、中南部、墨西哥湾滨岸以及东北部四大致密气区,从构造、地层、沉积、烃源岩、储层和温度—压力系统等方面,阐述了致密砂岩气藏的地质特征,并对部分盆地及气田进行了剖析;第三章概述了致密砂岩气开发生产特征,主要包括单井产量、单井可采储量和产量递减等生产特征,气藏储层非均质性与稳产接替方式,以及气田开发技术对策和主要做法;第四章介绍了致密砂岩气开发的关键技术,主要包括气藏描述技术、钻井工程技术、增产工艺技术和井网加密技术四种主体开发技术;第五章为气田开发实例剖析,以美国大绿河盆地西北部的Jonah气田为例,简述了其勘探开发历程,描述了构造、地层、沉积、储层和温度—压力系统等气藏地质特征,以及开发生产特征;第六章综述了美国非常规天然气勘探开发启示,分析了市场需求、激励政策、天然气价格,以及新技术和新理念对于致密砂岩气开发的影响,并综述了非常规天然气的开发经验与启示,希望对我国致密砂岩气开发有一定的借鉴意义。

第一章由周兆华、谷江锐编写;第二章第一节由张满郎编写,第二节和三节由郭振华、周兆华、周拓编写,第四节由郑国强编写;第三章由万玉金、韩永新编写;

第四章第一节由黄家强、石石编写,第二节由李文魁、王云编写,第三节由李素珍、嫣雪梅编写,第四节由万玉金、胡勇编写;第五章第一节至第五节由石石编写,第六节由初广震、郭长敏编写;第六章由万玉金、杨依超和罗瑞兰编写。全书由万玉金、韩永新和周兆华统稿。

在本书编写过程中,孟慕尧、马新华、雷群、李熙喆、胥云、欧阳永林、陆家亮、龙道江等同志对本书提出了许多宝贵意见和建议,同时也得到中国石油勘探开发研究院廊坊分院各级领导、开发所各位同事和石油工业出版社的大力帮助与支持,谨在此致以衷心感谢!

鉴于资料收集程度与作者水平有限,以及不同文献资料中的部分数据不尽一致,书中难免有错、漏和不当之处,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 致密砂岩气开发概况	(1)
第一节 致密砂岩气的定义	(1)
第二节 致密砂岩气藏的类型	(3)
第三节 美国致密砂岩气资源状况	(11)
第四节 美国致密砂岩气开发简况	(17)
参考文献	(19)
第二章 美国致密砂岩气藏地质特征	(21)
第一节 中西部落基山地区	(21)
第二节 中南部地区	(44)
第三节 墨西哥湾滨岸地区	(57)
第四节 东北部阿巴拉契亚盆地	(77)
参考文献	(88)
第三章 致密砂岩气开发生产特征	(94)
第一节 单井生产特征	(94)
第二节 气田开发特征	(101)
第三节 开发技术对策	(112)
参考文献	(134)
第四章 致密砂岩气开发关键技术	(135)
第一节 气藏描述技术	(135)
第二节 钻井工艺技术	(146)
第三节 增产工艺技术	(157)
第四节 井网加密技术	(169)
参考文献	(189)
第五章 Jonah 气田开发实例	(191)
第一节 气藏概况	(191)
第二节 构造特征	(198)
第三节 地层与沉积特征	(203)
第四节 储层特征	(207)
第五节 气藏特征	(219)
第六节 气田开发特征	(223)
参考文献	(232)

第六章 美国非常规天然气勘探开发启示 (233)

 第一节 市场需求使非常规天然气开发成必然选择 (233)

 第二节 经济政策促进了非常规天然气的开发 (235)

 第三节 天然气价格影响致密砂岩气的发展速度 (236)

 第四节 技术进步实现了致密砂岩气规模效益开发 (238)

 第五节 美国非常规天然气开发的经验与启示 (242)

 参考文献 (244)

附录 A 名词、术语、名称英汉对照 (245)

附录 B 常用单位换算表 (250)

第一章 致密砂岩气开发概况

美国致密砂岩气资源丰富、分布广泛、类型多样。既有大面积分布的连续型气藏,也有常规圈闭类型气藏;既有层状气藏,也有透镜状气藏;孔隙度有高有低;储层中有的发育裂缝、有的裂缝不发育;既有超压气藏,也有低压气藏。由此,从总体特征来看,致密砂岩气藏没有典型与非典型之分。20 世纪 70—80 年代,在常规天然气产量快速递减的形势下,美国最早转向非常规天然气开发。在优惠政策的激励下,通过新技术和新理念的应用,致密砂岩气最早实现规模开发,并持续快速增长,成为常规天然气最有效的接替资源。近几年,美国致密砂岩气产量占天然气总产量的百分之三十左右,预计到 2035 年,致密砂岩气产量规模基本保持不变。

第一节 致密砂岩气的定义

致密砂岩气藏,一般称为致密砂岩气,英文为 Tight sand gas。多数情况下,Tight gas(简称 TG)也主要指致密砂岩气。

致密砂岩(Tight sand 或 Tight gas sand)是渗透率极低的砂岩储层。而所谓的“致密”只是一个相对的概念,目前世界上并无统一的评价标准和界限。不同的国家是根据不同时期的资源状况、技术经济条件来制定其标准和界限的;即使是在同一国家、同一地区,随着地质认识程度和工艺水平的提高,致密砂岩的界限值也在不断地变化。

一、美国政府的定义

1970 年,美国政府将致密砂岩气定义为气体渗透率小于 0.1mD 的砂岩储层中产出的天然气。这个定义具有政治色彩,这个标准用来定义一口致密砂岩气井是否需要缴纳联邦税或州税。1973 年,美国联邦能源管理委员会(FERC)将地层条件下储层空气渗透率小于 0.1mD(不包含裂缝)的气藏定义为致密砂岩气藏,并以此作为是否给予生产商税收补贴的标准。同年,美国能源部(Department of Energy,简称 DOE)对一个确定为致密含气层又可作为资源进行开采的标准作了如下规定:

- (1)致密砂岩气层,用现有技术不能进行工业性开采,无法获得工业规模的可采储量;
- (2)含气砂层的有效厚度至少为 30.5m(100ft),含水饱和度必须低于 65%,孔隙度为 5%~15%;
- (3)目的层埋深 150~4500m(500~15000ft);
- (4)产层段地层总厚度中至少有 15% 为有效厚度;
- (5)可供勘探面积不少于 31km²(12miles²);
- (6)位于边远地区(当时考虑到要使用核爆炸压裂技术,因此要远离居民稠密区);
- (7)产气砂岩不与高渗透的含水层互层。

美国能源部(DOE)根据在地层条件下的渗透率进一步将砂岩气藏划分为五类:常规砂岩气藏、近致密砂岩气藏、标准致密砂岩气藏、极致密砂岩气藏和超致密砂岩气藏(表 1-1-1)。

表 1-1-1 美国能源部砂岩气藏储层分类标准

序号	分类	地层条件下的渗透率,mD
1	常规砂岩气藏	>1.0
2	近致密砂岩气藏	1.0~0.1
3	标准致密砂岩气藏	0.1~0.05
4	极致密砂岩气藏	0.05~0.001
5	超致密砂岩气藏	0.001~0.0001

1978 年美国天然气政策法案规定:只有砂岩储层对天然气的渗透率等于或小于 0.1mD 的气藏才可以被定义为致密砂岩气藏。

1980 年,美国联邦能源管理委员会(FERC)根据“美国国会 1978 年天然气政策法(NGPA)”的有关规定,确定致密砂岩气藏的注册标准是其渗透率低于 0.1mD,而常见的致密砂岩气储层的渗透率多在 0.05mD 以下。美国致密砂岩气层孔隙度的注册标准一般上限值取 10%,下限取 5%。若砂岩储层中裂缝较发育,孔隙度下限值可降到 3%。

二、其它定义

Spencer(1989)将致密砂岩气藏定义为地层条件下储层气体渗透率小于 0.1mD 的气藏。并提出了致密砂岩气藏气水分布模式(1985,1989),描述了一些致密砂岩气藏常见的特点。Law 等(1985)和 Dutton 等(1993)描述了许多低渗透砂岩气藏的特征,对比发现,该类气藏基本属于致密砂岩气藏。

关德师(1995)认为,致密砂岩气藏是指孔隙度低(小于 12%)、渗透率比较低(小于 0.1mD)、含气饱和度低(小于 60%)、含水饱和度高(大于 40%),天然气在砂岩层中流动速度较为缓慢的天然气藏。

通常,致密砂岩气藏一般具有以下特征:气藏构造平缓、埋藏较深、岩性致密、低孔低渗、次生(溶蚀)孔隙相对较发育、含水饱和度高、束缚水饱和度高、沉积物成分成熟度低、成岩程度高、毛管压力高、无明显的气水界面、常具异常压力、地质储量可观、产量较低等。致密砂岩气藏的一个突出特点就是自然产能低,需要采取某种增产措施和特殊的钻井和完井方法才能满足工业开采的要求。

在致密砂岩气藏中,对气体产量影响较大的因素除了渗透率和(或者)深度外,还包括地层压力、流体性质、气藏和地表温度、产层厚度、泄流半径、表皮系数和非达西系数等。Holditch(2006)从油藏工程的角度给出的致密砂岩气定义是:在没有进行较大规模水力压裂处理,或者应用水平井或丛式井的情况下没有经济气产出,致密砂岩储层渗透率一般为 0.0001~0.1mD(图 1-1-1)。

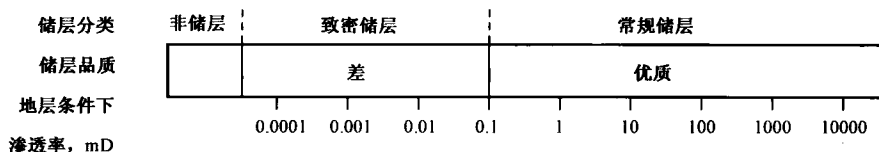


图 1-1-1 致密砂岩气储层与常规砂岩气储层界限划分(Holditch,2006)

致密储层渗透率一般呈对数正态分布,其间不乏有利区。对于此类气藏的评价,采用渗透率中值能更准确地反映气藏的渗流能力。例如,Travis Peak, Cotton Valley, Wilcox Lobo 和 Cleveland 是被 FERC 认可的 4 个致密砂岩气藏,储层非均质性强,其中包含一些高渗样品。气藏中储层渗透率级差达到 2~3 个数量级,其算术平均值的范围分布在 0.179~7.378mD 之间;渗透率中值在 0.028~0.085mD,即有 60%~90% 的储层渗透率小于 0.1mD,属于致密砂岩(图1-1-2)。

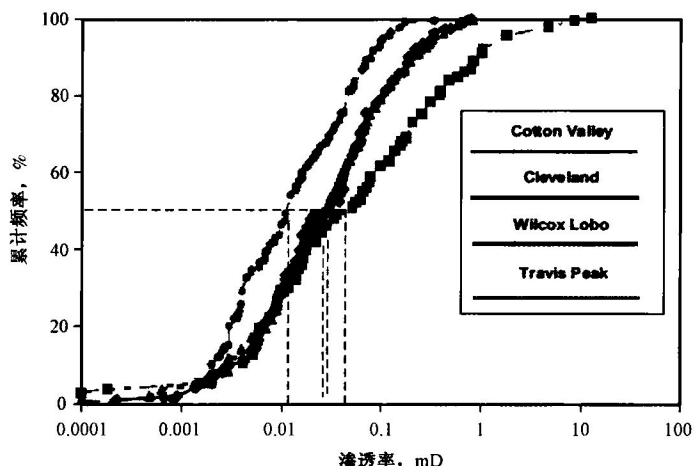


图 1-1-2 得克萨斯州四个致密砂岩气藏储层渗透率分布图(Holditch,2006)

渗透率的算术平均值,过高地估算了储层的渗流能力。由此,采用地层条件下基质渗透率的中值更能反映致密储层的渗流能力,故采用渗透率中值小于 0.1mD 作为致密砂岩储层的判别标准。

德国石油与煤炭科学技术协会(DGMK)(German Society for Petroleum and Coal Science and Technology)宣布了德国石油工业应用的致密砂岩气定义:致密砂岩气藏指储层平均有效气体渗透率小于 0.6mD 的气藏。

第二节 致密砂岩气藏的类型

致密砂岩气藏没有典型与非典型之分:气藏类型有的属于大面积分布的连续型气藏,也有的属于常规圈闭类型气藏;埋藏深度有深有浅;地层温度有高有低;地层压力有异常高压,也有异常低压;储层产状既有层状也有透镜状;储层孔隙度有高有低;有的均质,有的非均质;气藏有的产水,有的不产水;储层中有的发育裂缝,也有的裂缝不发育;气源有热成因气,也有生物成因气(Holditch,2007)。

一、圈闭类型

对于致密砂岩气藏的类型划分主要有两种不同观点。Schmoker(2005)认为:致密砂岩气藏主要是指发现于盆地中心,或者是连续大面积分布的天然气藏;Shanley(2004)则认为:大多数致密砂岩气藏位于常规构造、地层或复合圈闭的致密储层中,通常被称为有利区。下面对这

两种观点分别予以介绍。

1. 连续型致密砂岩气藏

1979年, Masters给出了“盆地中心气”(Basin-centered Gas Systems, 简称BCGS, Basin-centered Gas Accumulations, 简称BCGAs)的解释, 提出了“深盆地气”(Deep basin gas)的概念, 并以加拿大阿尔伯达盆地、美国新墨西哥和科罗拉多州圣胡安盆地的天然气聚集为例, 阐述了这类气藏的特点; 1984年, 又描述了加拿大阿尔伯达盆地Elmworth气田“深盆地气”的地质特征。

关于盆地中心气(BCGAs)的其他文献还包括: Law等(1979, 1980), Law(1984)对于怀俄明州、科罗拉多州、犹他州的大绿河盆地的研究; McPeck(1981)对于怀俄明州大分水岭盆地的研究; Brown等(1986)对于科罗拉多皮申斯盆地的研究。Spencer(1985, 1989)和Law等(1993)总结了盆地中心气(BCGAs)的共性; Law(2002)认为: 按生烃条件, 盆地中心气(BCGAs)可分为直接型和间接型两种类型, 尽管称其为“致密砂岩气藏”, 但不排除包括一些常规圈闭中赋存的天然气。Spencer及Mast(1986)给出了美国几个“致密砂岩气藏”的例子。Finley(1984)及Dutton等(1993)也描述了美国其他致密砂岩气藏。

多年来, 致密砂岩气一直被广泛应用于描述盆地中心气(BCGAs), 许多勘探专家至今仍沿用这个术语。在多数情况下, 致密砂岩气是一个较为合适的术语, 但是这个词有点含糊, 并且可能包括传统圈闭中的天然气聚集。

Masters在1979年提出的“深盆地气”也有些问题, 因为并非所有的盆地中心气都出现在深层, 例如圣胡安盆地气藏深度仅为760m(2500ft)。而“深盆地气”这个词更适合于用在埋藏深度大于4600m(15000ft)的气藏(Dyman等, 1997)。

Schomoker在1995年提出“连续气聚集”(Continues Gas Accumulation)的概念。尽管较为准确地描述了盆地中心气的本质特征, 但是概念太宽泛, 还包括煤层气及页岩气。

1995年, 美国地质调查局在进行油气资源评价中引入“连续型油气藏”的概念。常规圈闭油气藏指单一闭合圈闭油气聚集, 圈闭界限清楚, 具有统一的油气水边界与压力系统。连续型非常规油气藏与常规圈闭油气藏本质区别在于: 圈闭界限是否明确、范围是否稳定、是否具有统一油气水界面与压力系统。也可以说: 连续型非常规油气藏赋存于“无形”或“隐形”圈闭, 以大规模储集体形式出现, 常规圈闭油气藏是“有形”或“显形”圈闭, 圈闭边界明确。

Schmocker(2005)把“连续型油气藏”定义为: 具有大范围的、没有明确边界的油气藏, 它的存在不完全受水柱高度的影响。

Schenk和Pollastro(2007)给出了连续型深盆地气和常规气藏的示意图(图1-2-1), 深盆地气有四个关键要素, 即: 地层压力异常, 渗透率低(通常不大于0.1mD), 连续含气、气源供应充足; 下倾方向无边底水、气水分布关系倒置。

2. 常规圈闭类型致密砂岩气藏

Shanley等(2004)提出与“连续型气藏”概念完全不同的观点, 认为怀俄明州西南部地区大绿河盆地的致密砂岩气藏不属于连续型气藏或深盆地气藏。相反, 天然气是赋存在常规圈闭中的低渗、品质较差的砂岩储层中, 气藏主要聚集在有利区。发育在大绿河盆地中所有古近一新近系和白垩系的致密砂岩气, 其圈闭类型均为常规圈闭, 产水是普遍的、广泛的。

Shanley等(2004)提出的理论模型被称为“渗透率屏障(permeability jail)”。图1-2-2

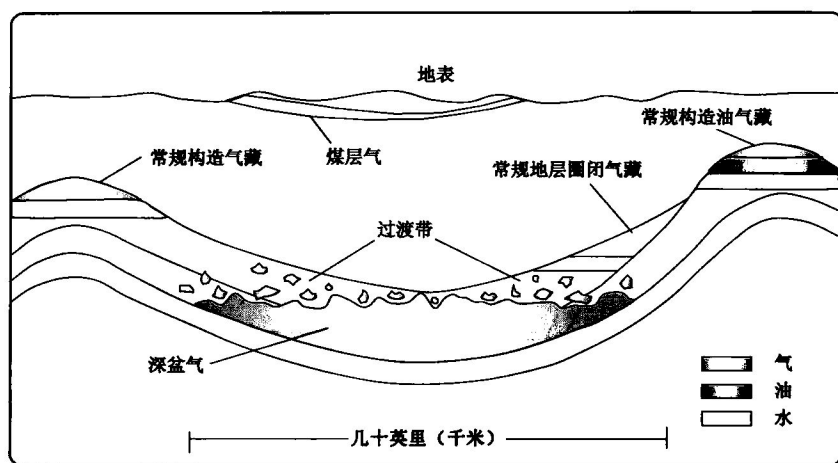


图 1-2-1 气藏类型模式图(Schenk 和 Pollastro,2007)

对比了两个具有同样构造形状的气藏,所不同的是图 1-2-2A 为常规气藏,而图 1-2-2B 为致密砂岩气藏。其主要差异表现在:两种气藏储层的毛管压力、相对渗透率曲线与其在圈闭中位置之间的关系。

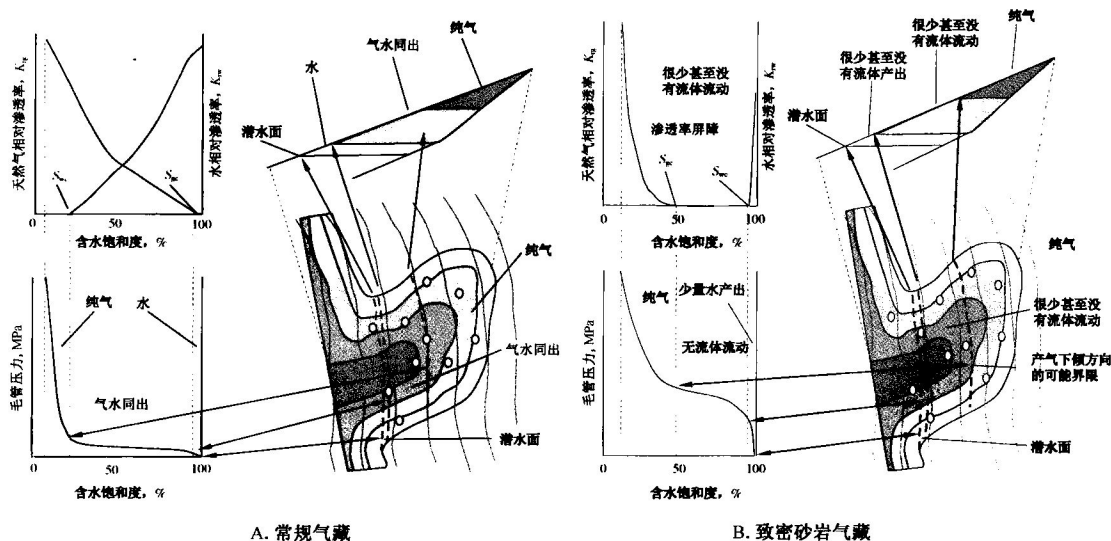


图 1-2-2 毛管压力、相对渗透率与在圈闭中位置之间的关系(Shanley,2004)

在常规气藏(图 1-2-2A)中,储层物性相对较好,毛管压力相对较低,气水相对渗透率曲线正常,具有较宽的两相渗流区。在气藏中潜水面之下为水层,气井产水;气藏中部为气水过渡带,气水同出;上倾方向为纯气藏,只产气。

在致密砂岩气藏(图 1-2-2B)中,由于储层物性较差,毛管压力相对较高,气水相对渗透率曲线异常,甚至没有两相渗流区,即在一定的含水饱和度条件下,既不产气也不产水。气藏中地层水主要聚集于构造位置非常低的潜水面附近,在很多情况下,水的相对渗透率很低,以

致于在潜水面附近几乎没有可动水;潜水面之上,很大范围内很少、甚至没有流体流动;地层上倾方向的顶部,只产纯气。

连续型气藏气井应不产水或只产凝析水,而大绿河盆地致密砂岩气井普遍产水,并且产出水属于地层水(图 1-2-3)。按露点压力计算,在地层条件下,每 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 气凝析水含量为 $0.007 \sim 0.07 \text{ t}$ ($0.15 \sim 1.5 \text{ bbl/MMCF}$)。大绿河盆地致密砂岩气井水气比远高于该值,表明有地层水产出。

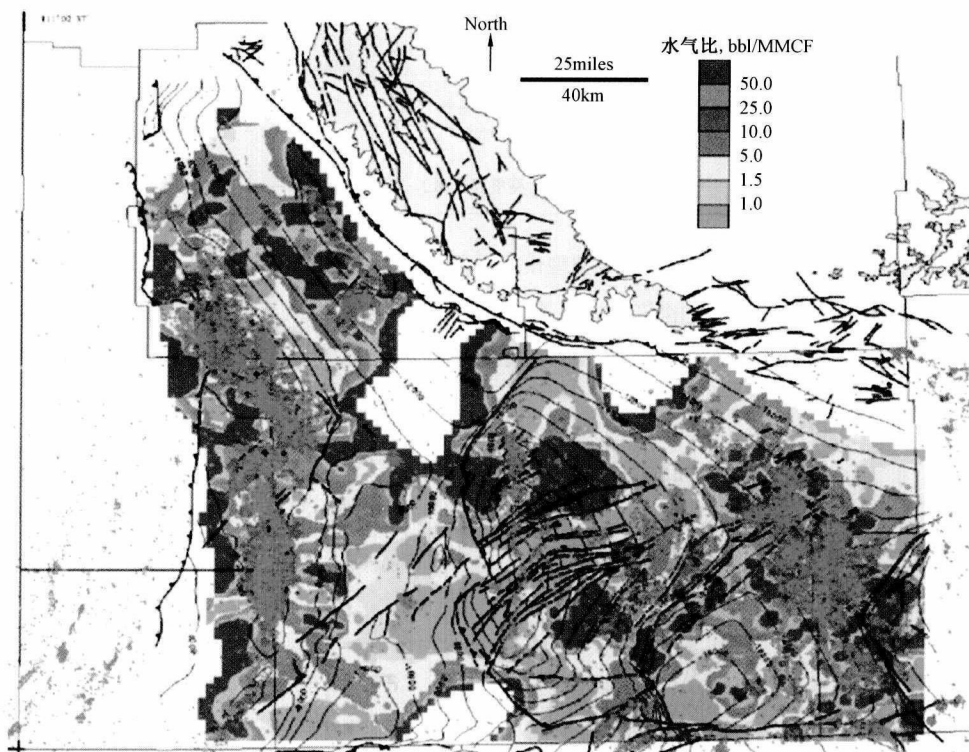


图 1-2-3 大绿河盆地水气比分布图(Shanley, 2004)

大绿河盆地致密砂岩气井产水量与构造位置有关,构造高部位只产凝析水,构造低部位产地层水,且构造位置越低,水气比越高(图 1-2-3)。

据大绿河盆地 7888 口井生产资料,按水气比 $0.007 \text{ t}/10^4 \text{ m}^3$ (0.15 bbl/MMCF) 统计,小于该值的井数占 16%,其产量贡献占 25%;按水气比 $0.07 \text{ t}/10^4 \text{ m}^3$ (1.5 bbl/MMCF) 统计,小于该值的井数占 35%,其产量贡献占 56%(图 1-2-4)。统计结果表明:至少有 44% ~ 75% 的气井产地层水,且约有 15% 的气井水气比超过 $1.0 \text{ t}/10^4 \text{ m}^3$ 。

二、深度与压力

致密砂岩储层埋藏深度有深有浅,威利斯顿盆地 Jadity River、Eagle 和 Carlisle 等致密砂岩气藏埋藏深度仅为 200 ~ 900m,但已经投入开发的致密砂岩气藏大多数位于 1000 ~ 3000m 深度范围内,也有的超过 4500m,如大绿河盆地 Mesavede 气藏。

致密砂岩气藏均存在不同程度的压力异常:既有异常高压,也有异常低压。高压异常的形

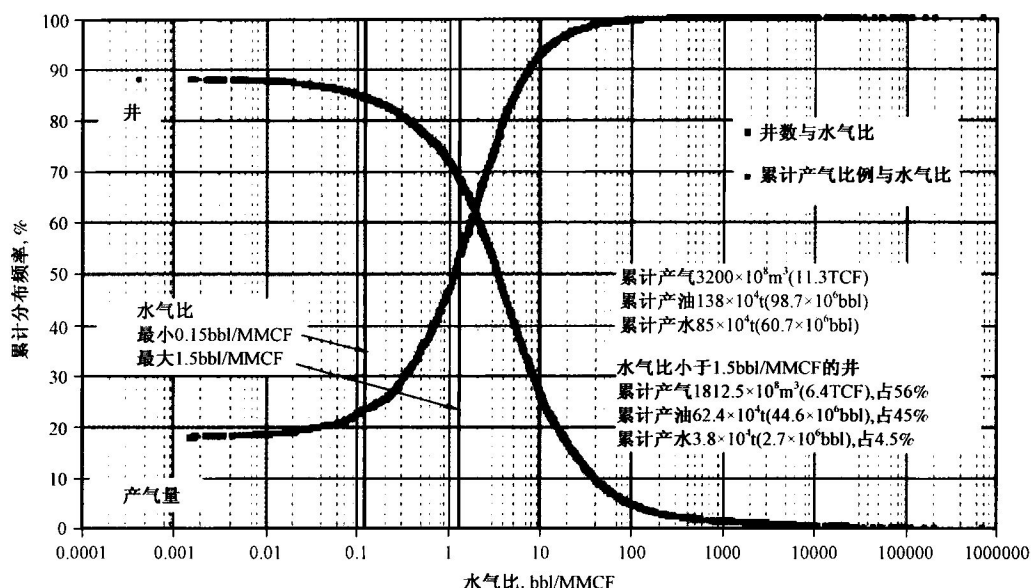


图 1-2-4 大绿河盆地不同水气比条件下井数与累计产气分布图(Shanley,2004)

成机制主要是烃类(特别是天然气)的不断生成,油气供给量大于其散失量,因为大量生烃的补给形成了地层超压。

低压异常由高压异常演化而来,当盆地动力学条件发生变化时,如古地温变化,局部和区域性构造隆起并遭受剥蚀,致使盆地冷却,当天然气散失量超过供给量时就形成低压气藏。

出现异常高压的盆地有威利斯顿盆地、粉河盆地、大角盆地、风河盆地、丹佛盆地、大绿河盆地、尤因它盆地、皮申斯盆地和安纳达科盆地,以及东得克萨斯—北路易斯安那盆地棉花谷组等。呈现低压异常的盆地或气藏有圣胡安盆地、丹佛盆地、阿巴拉契亚盆地和二叠盆地等,以及北路易斯安那州的 Travis Peak 气藏。

三、储层物性

Spencer(1985,1989)根据美国西部致密砂岩储层孔隙度的差异,将致密砂岩储层划分为高孔隙度(HP)储层和低孔隙度(LP)储层两类(表1-2-1)。

表 1-2-1 致密砂岩储层和常规储层对比 (Spencer,1985)

表征参数 \ 储层类型	常规含气砂岩	致密含气砂岩	
		低孔隙度储层	高孔隙度储层
储层产状	块状、层状和透镜状	层状和透镜状	层状
孔隙度, %	14 ~ 25	3 ~ 12	10 ~ 30
孔隙类型	原生孔隙(粒间)为主,部分次生孔隙	一般以次生(微孔洞)孔隙为主,部分粒间孔隙	原生孔隙为主,发育部分次生孔隙

续表

表征参数 \ 储层类型	常规含气砂岩	致密含气砂岩	
		低孔隙度储层	高孔隙度储层
孔隙连通性及孔隙结构特征	好—极好的短孔喉	连通性差;吼道呈片状或带状,为较长的毛管系统	连通性好,孔喉短,气体流动受黏土含量、小孔径和高含水饱和度的影响
黏土含量	低	高到中等	低—高
测井解释	在黏土含量低的储层中一般可靠	不准确,确定真实孔隙度较困难	一般不可靠(因储层薄、含水饱和度高)
含水饱和度, %	25 ~ 50	45 ~ 70	约 40 ~ 90
原始气体渗透率, mD	1.0 ~ 500	0.0005 ~ 0.1	< 0.1
毛管压力	低	相对高	中等
岩石成分	石英丰富、少量的长石和岩屑	石英占 60% ~ 90%, 常见岩屑、长石碎屑, 可能有碳酸盐胶结物	石英、长石、岩屑及黏土, 可能有碳酸盐胶结物
颗粒密度, g/cm ³	2.65	2.65 ~ 2.74、在粉砂岩中平均 2.68 ~ 2.71	未知, 可能为 2.65 ~ 2.70
储层压力	一般正常到低压	可能是低压或超压	低压
天然气采收率, %	75 ~ 90	15 ~ 20、对于个别储层估计偏低	未知, 可能较低

高孔隙致密砂岩储层主要分布在北部大平原威利斯顿盆地, 储集岩为粉砂岩、极细粉砂岩, 具有相对高的孔隙度和低的原始气体渗透率(小于 0.1 mD)。其砂粒细小, 发育微小的粒间孔及粒内孔, 含水饱和度为 40% ~ 90%, 孔隙度为 10% ~ 30%, 孔隙之间由很多短的孔隙喉道连通, 储层压力一般为低压或接近常压。

低孔隙类型的孔隙度一般为 3% ~ 12%, 原始渗透率 0.1 ~ 0.0005 mD, 毛管压力相对较高, 含水饱和度 45% ~ 70%。

对于常规和近致密储层, 采用标准的地球物理测井和常规岩心分析方法对储层进行标定和研究可取得良好的结果。但对于致密砂岩储层, 这些常规分析方法很难精确预测这类储层的物性参数。

无论是高孔隙度储层, 还是低孔隙度储层, 均表现出较强的非均质性。一方面, 在同一盆地内, 储层孔隙度和渗透率分布范围都很宽, 渗透率相差 2 ~ 3 个数量级, 甚至更大; 另一方面, 在相同的孔隙度条件下, 由于储层的粒度、分选和成岩作用等差异, 渗透率也表现出较大的差异(图 1-2-5)。

此外, 即使孔隙度较低, 由于天然裂缝的发育, 也会有较高的渗透率。

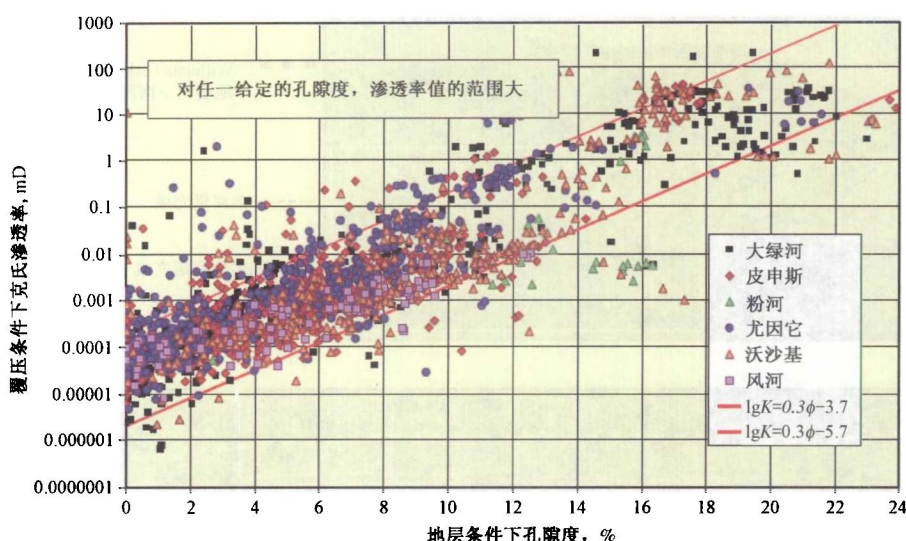


图 1-2-5 落基山地区部分盆地 Mesaverde 组储层孔渗关系图
(DeGolyer, 2009, 引自 A. P. Byrnes, 2008)

四、储层产状

致密砂岩储层,依据储层产状可以划分为层状和透镜状两类。

层状,通常亦被称为席状 (Sheet),或者毯状 (Blanket)。层状储层一般沉积于滨海环境,包括三角洲前缘和陆棚沉积。圣胡安、丹佛、风河、威利斯頓、棉花谷等盆地致密砂岩储层均为层状。

层状储层可以是低孔隙型也可以是高孔隙型。低孔隙型储层原先是常规储层,由于成岩作用的影响,自生黏土矿物充填,硅质胶结和碳酸盐胶结破坏了大部分原生孔隙而使储层的渗透性降低 (Soeder D. J, Randolph P. L., 1987; Byrnes A. P., 1997)。高孔隙型层状储层主要是细粒碎屑岩。这类储层因埋藏浅,未受强烈的成岩作用影响。在美国北部大平原区,该类储层中含生物气,早期饱和和生物气阻止或延缓了破坏性的成岩作用。

透镜状储层主要形成于河流相环境中,这类含气砂岩主要分布在白垩系和古近系,位于落基山盆地的较深部位,主要包括大绿河、尤因它和皮申斯 (图 1-2-6) 等盆地。由于压实作用、深部成岩作用及沉积环境因素的共同影响导致储层致密 (Frederic leder, Won C. Park, 1986; Dutton, S. P., Hamlin H. S., 1991)。透镜状砂岩体的几何形态、大小的预测难度较大,其内部非均质性明显,渗透率变化大。

美国能源部 (DOE) 和天然气研究院 (GRI) 在 20 世纪 80 年代实施了一项多井试验 (MWX),对致密砂岩气层进行多学科综合研究,以便准确地确定砂体的大小、形态、方位和分布,在储层定量描述和优化增产措施等方面取得了显著成果。