

LACUSTRINE SHALE GAS

陆相页岩气

王香增 著

石油工业出版社

LACUSTRINE SHALE GAS

陆相页岩气

第三卷

陆相页岩气

Lacustrine Shale Gas

王香增 著

石油工业出版社

内 容 提 要

以鄂尔多斯盆地东南部中生界延长组陆相页岩气为典型实例,从陆相页岩气源岩特征、陆相页岩气形成、陆相页岩储层特征、陆相页岩气赋存与成藏特征及陆相页岩气资源评价等方面,系统地对其中国特色的陆相页岩气勘探理论进行了全面论述。本书对陆相页岩气勘探研究具有重要指导意义和参考价值。

本书可供从事非常规油气资源勘探与开发的生产和科研人员参考,同时也可作为石油地质专业研究生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

陆相页岩气 / 王香增著 .

北京 : 石油工业出版社, 2014.6

ISBN 978-7-5183-0080-8

I . 陆…

II . 王…

III . 陆相 - 油页岩 - 油气勘探

IV . P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 127062 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 : <http://www.petropub.com.cn>

编辑部 : (010) 64523589 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

2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本 : 1/16 印张 : 14.5

字数 : 370 千字

定价 : 80.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

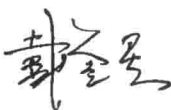
版权所有, 翻印必究

序

页岩气是主要以吸附或游离相态赋存于富有机质泥页岩中的一种非常规天然气，被认为是常规油气资源最重要的接替资源。21世纪以来随着全球油气勘探和能源供应形势的巨大变化，页岩气不但受到油气理论研究和勘探界的普遍重视，而且也成为了社会各界共同关注的对象。以美国为代表的西方发达国家在页岩气理论研究和勘探领域获得了巨大成功在国际上掀起了页岩气勘探热潮。我国页岩气勘探起步较晚，2004年开始跟踪国外页岩气理论研究和勘探进展，2005年我国开始页岩气资源调查工作，2009年国家不失时机地启动了我国重点地区页岩气资源潜力评价工作，其中以川渝黔鄂四大页岩气先导试验区为重点，开展页岩气勘探研究和开发试验工作，2012年年底，国家发展与改革委员会批准在鄂尔多斯盆地东南部设立了“延长石油延安国家级陆相页岩气示范区”。据不完全统计，截至2013年底，我国页岩气累计钻井200余口，页岩气产量接近 $2.0 \times 10^8 \text{m}^3$ 。目前页岩气勘探遍布全国各大盆地，页岩气已经成为我国油气勘探和研究领域的热点和重点。

与常规油气资源特征一样，国外页岩气资源勘探主要以海相泥页岩为主。而我国沉积盆地广泛发育陆相泥页岩，《陆相页岩气》一书就是在理论研究和勘探实践的基础上，对陆相页岩气形成和勘探理论进行了系统论述。本书从陆相页岩勘探实际资料出发，突出陆相泥页岩特殊的沉积环境和形成条件，以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7厚层富有机质黑色泥页岩为典型代表，深入解剖了陆相泥页岩地质特征，在陆相泥页岩烃源岩和地球化学、泥页岩储集性和含气性、成藏特征和资源评价等方面进行了详细分析，并取得了许多创新性认识。不但丰富和发展了国外页岩气形成和勘探理论体系，而且还开拓了页岩气勘探新领域，即陆相页岩气勘探。

本书在对陆相页岩气研究中应用了大量的分析测试数据和勘探第一手资料，这种客观的科学态度和研究方法值得肯定。作者王香增博士思路开阔、勇于创新，多年来全身心投入于陆相页岩气事业，《陆相页岩气》作为他多年来刻苦钻研的成果，集中反映了我国近年来在陆相页岩气勘探方面的理论成果，代表了陆相页岩气创新的勘探理论和先进的勘探评价技术，也是一本具有中国特色的陆相页岩气勘探研究的专著，我很高兴为本书作序。我相信，这本书的出版，不仅对发展我国陆相页岩气勘探理论和技术具有重要的促进作用，更重要的是，其对我国当前和今后页岩气勘探开发具有非常重要的指导意义。

中国科学院院士 

2014年1月22日

前 言

本书是笔者在近年来负责的鄂尔多斯盆地延长组陆相页岩气勘探研究成果的基础上，经过系统总结和完善编写而成的有关陆相页岩气专著。

我国页岩气研究和勘探时间相对较晚，因此，在查阅和收集大量国内外有关页岩气勘探研究的文献资料基础上，总结和吸取了国外海相页岩气研究成果和勘探经验，并在鄂尔多斯盆地实践了陆相页岩气勘探和研究工作。因此，《陆相页岩气》一书是继承和深化的具有中国特色的陆相油气勘探理论。

本书以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7和长9泥页岩为研究对象，以及陆相泥页岩为典型代表，深入剖析了陆相页岩气形成及其成藏特征，包括对陆相页岩形成环境、分布特征、泥页岩有机地球化学和生烃潜力、泥页岩储层特征、页岩气赋存状态、含气性特征及其控制因素等进行了详细研究，最后对鄂尔多斯盆地东南部延长组陆相页岩气资源量进行了综合评价。

本书共分六章，第一章介绍了页岩气基本特征、页岩气资源勘探和理论研究现状等。第二章系统介绍了鄂尔多斯盆地陆相页岩气形成，重点研究了陆相页岩气源岩特征、陆相页岩气成因和地球化学特征、陆相泥页岩生烃热模拟实验和生烃动力学实验。第三章详细研究了陆相泥页岩储层特征，重点介绍了陆相泥页岩储层分析测试方法、陆相泥页岩岩石学及物性特征和陆相泥页岩储层评价方法。第四章分析了陆相页岩气赋存相态和含气性特征，同时介绍了不同赋存相态的陆相页岩气含气量确定方法。第五章研究了陆相页岩气成藏特征，主要论述页岩气富集过程、气藏特征及页岩气成藏控制因素。第六章介绍了陆相页岩气资源评价方法，包括陆相页岩气资源量计算方法、陆相页岩气资源量评价参数选取，并且以鄂尔多斯盆地东南部为例，计算了陆相泥页岩不同赋存相态的页岩气资源量和陆相页岩气总资源量。

在本书的编写过程中，得到了陕西延长石油（集团）有限责任公司研究院张丽霞、高瑞民、高胜利、高潮、姜呈馥、杨潇等同志的大力帮助，中国科学院地质与地球物理研究所罗晓容教授、中国地质大学（北京）张金川教授、长安大学李荣西教授认真审阅了初稿，提出了宝贵的修改意见。在此，一并向以上同志表示衷心的感谢。同时，感谢中国石油勘探开发研究院戴金星院士，他不仅对本书的编写给予热忱的支持，而且为本书作序，在此深表谢意！

2014年2月8日

目 录

第一章 绪论	1
第一节 页岩气概述	1
一、泥页岩概念	1
二、页岩气概念	1
三、页岩气成因与分类	2
四、页岩气源岩特征	4
五、页岩气储层特征	6
六、泥页岩含气性特征	7
七、页岩气成藏特征	8
第二节 页岩气资源与勘探现状	11
一、美国含气页岩地质特征	11
二、中国含气页岩地质特征	14
三、世界页岩气勘探现状	16
四、中国页岩气勘探历程	17
五、中国页岩气勘探现状	19
六、陆相页岩气研究成果	19
第三节 页岩气勘探研究趋势和面临的挑战	21
一、页岩气发展趋势	21
二、页岩气勘探研究理论面临的挑战	22
第二章 鄂尔多斯盆地陆相页岩气形成	24
第一节 陆相页岩气源岩	24
一、烃源岩分布特征	24
二、烃源岩地球化学特征	24
第二节 陆相页岩气特征	31
一、页岩气样品采集与测试	32
二、页岩气地球化学特征	33
三、页岩气成因分析	37
第三节 陆相页岩生烃热模拟实验	42
一、热模拟实验	42
二、样品采集与测试	44
三、实验结果与分析	44
第四节 陆相页岩生烃动力学研究	48
一、实验参数	49

二、生气过程分析与评价	52
第三章 鄂尔多斯盆地陆相页岩气储层	56
第一节 陆相页岩气储层及其特殊性	56
一、陆相页岩气储层	56
二、陆相页岩气储层的特殊性	57
第二节 陆相页岩气储层测试	59
一、扫描电镜显微观测法	59
二、压汞法	60
三、气体吸附法	60
四、脉冲衰减法	62
第三节 陆相页岩气储层分布	62
一、陆相泥页岩发育地质背景	63
二、陆相页岩气储层识别	64
三、陆相泥页岩分布特征	70
第四节 陆相页岩气储层岩石学及其孔渗特征	73
一、泥页岩岩石结构模型	73
二、泥页岩矿物岩石学特征	75
三、孔隙类型及其结构特征	79
四、孔渗特征	101
五、非均质性特征	104
第五节 陆相泥页岩储层评价	107
一、陆相页岩气储层评价方法	107
二、陆相页岩气储层评价	109
第四章 陆相页岩气赋存特征	112
第一节 陆相页岩气赋存相态	112
一、吸附气	112
二、游离气	117
三、溶解气	117
四、多相综合赋存	118
第二节 陆相泥页岩含气量确定方法	119
一、解析法	119
二、等温吸附法	125
三、公式计算法	126
第三节 陆相泥页岩含气量特征	136
一、不同相态气含量特征	136
二、各相态含气量影响因素	142
第五章 陆相页岩气成藏作用及其影响因素	156
第一节 页岩气成藏特征	156

一、页岩气藏特征	156
二、页岩气富集条件	158
第二节 热演化程度对陆相页岩气形成的影响	160
一、陆相泥页岩构造埋藏史	161
二、陆相泥页岩热演化史	164
三、古地温演化对有机质成熟度的影响	166
第三节 流体压力对陆相页岩气藏的影响	168
一、陆相泥页岩压实特征	168
二、延长组过剩压力分布特征	171
三、陆相泥页岩孔隙流体压力特征及其对页岩气藏的影响	172
第四节 陆相页岩气聚集模式及影响因素	179
一、陆相页岩气成藏模式	179
二、陆相页岩气藏分布模式	183
三、陆相页岩气聚集主控因素	184
第六章 陆相页岩气资源量评价及展望	187
第一节 陆相页岩气资源量计算方法	187
一、静态法	187
二、动态法	190
第二节 陆相页岩气资源量评价参数	190
一、厚度和面积	191
二、总有机碳含量	192
三、孔隙度	192
四、原油密度及页岩密度	194
五、含油气饱和度	195
六、单位质量泥页岩含气量	197
七、页岩温度和压力	197
八、溶解气油比	197
九、溶解气水比	197
第三节 鄂尔多斯盆地东南部陆相页岩气资源量评估	198
一、游离气地质资源量	199
二、吸附气地质资源量	200
三、溶解气地质资源量	200
四、页岩气总地质资源量	201
五、有利区预测	203
第四节 鄂尔多斯盆地陆相页岩气勘探有利区展望	203
一、盆地内陆相页岩气有利区地质条件	204
二、陆相页岩气有利目标区	210
参考文献	219

第一章 绪 论

页岩气勘探开发始于美国。自 20 世纪 80 年代以来,由于从理论上认识到了泥页岩对天然气的吸附机理,美国拉开了页岩气勘探开发的序幕。首先在对位于美国东部阿巴拉契盆地泥盆系 Dunkirk 页岩进行勘探并获得了成功,与此同时,开展有关页岩气地质、地球化学、含气性和开发工程等课题研究。但是,页岩气大规模勘探开发始于 20 世纪末期对位于美国南部田纳西州和得克萨斯州福特沃斯盆地下石炭统 Barnett 页岩的勘探,到 2013 年美国页岩气产量达到 $2407 \times 10^8 \text{m}^3$,占天然气总产量的 37%。页岩气开发和利用降低了美国对石油资源的依赖,2008 年美国石油对外依赖度出现自 1977 年以来的首次下降,这得益于页岩气的开发和利用。在常规天然气产量增长幅度有限的情况下,加快页岩气勘探开发已成为世界各国的共同选择,近年来加拿大、俄罗斯、澳大利亚等能源大国将页岩气勘探开发提上了议事日程,将其列为 21 世纪重要的补充能源,并相继开展页岩气勘探和研究工作。现今页岩气已成为能源新宠,页岩气勘探与开发热潮已经在世界各国兴起。

第一节 页岩气概述

页岩气是近年来油气理论和勘探界十分关注的一种新的非常规天然气资源。页岩气是从泥页岩层中开采出来的天然气,其形成和富集有着自身独特的特点,其主要分布在厚度较大、分布广的泥页岩层中,页岩气可以形成于有机质生烃的各个阶段,主体上以游离相态存在于裂缝、孔隙中,同时也可以吸附相态存在于干酪根、矿物碎屑颗粒或孔隙表面,极少量以溶解相态储存于孔隙流体中。

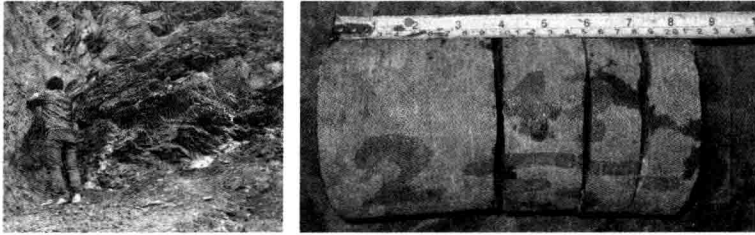
一、泥页岩概念

目前国内页岩气研究者将页岩定义为:具有薄页状或薄片层状的页理,主要是由黏土沉积经压力和温度形成的岩石,但其中混杂有石英、长石的碎屑及其他化学物质,属于泥质岩的一种;泥岩和页岩并不相同,国内研究者则更倾向于使用 mudstone 术语,对应于泥岩,shale 则专指页岩。但国外习惯使用 shale 术语对二者进行统称,译为页岩;针对这种情况,国内部分研究者也使用泥页岩这一术语,并不单纯指传统意义上的页岩。本书中采取泥页岩对页岩气储层的复杂岩性进行统称,将泥页岩定义为:由细粒碎屑、黏土矿物、有机质等组分组成具有砂岩(粉砂岩)纹层和页理构造的沉积岩。

鄂尔多斯盆地延长组泥页岩见图 1-1。

二、页岩气概念

国内外许多学者对页岩气概念进行过定义,一般将页岩气定义为从页岩层中开采出来的非常规天然气,这样就特指页岩气为赋存于页岩中的非常规天然气。但是,根据我国页岩气勘探现状和美国页岩气勘探开发情况表明,实际产出的页岩气是赋存在以厚层页岩为



a. 长7泥页岩露头

b. YY7井长7泥页岩岩心

图 1-1 鄂尔多斯盆地延长组泥页岩图

主的沉积岩系中，包括其中的砂岩和粉砂岩夹层。因此，页岩气并不严格限定于单一页岩性中的天然气。页岩气有一个明确的范畴，即页岩气是自生自储的天然气，也就是赋存天然气的页岩既是储层也是生气岩层（即烃源岩）。

综上所述，本书将页岩气定义为以吸附或游离相态赋存于富有机质泥页岩及其砂岩和粉砂岩夹层中，以甲烷为主要成分的非常规天然气。勘探开发实践表明，页岩气主要以吸附相态和游离相态两种形式存在于泥页岩孔隙、裂缝中，具有自生自储、无气水界面、大面积连续成藏、低孔、低渗等特征，是一种必须采用先进的储层改造工艺技术才能进行商业性开发的非常规天然气资源。

三、页岩气成因与分类

根据页岩气成因和含气泥页岩的沉积环境，可以对页岩气进行分类。按照 Curtis (2002) 对页岩气成因总结，认为页岩气在本质上就是连续生成的生物成因气、干酪根热解成因气或者两者均有的混合天然气。因此，页岩气按成因可分为 3 种类型，即生物成因页岩气、热解成因页岩气和混合型页岩气。生物成因气（又称生物气，或是生物成因天然气），在页岩气领域，可特指生物成因页岩气是沉积有机质在低温下经厌氧微生物分解作用形成的天然气；热解成因气（又称热解成因天然气）是沉积有机质在较高温度及持续加热期间经干酪根热降解和裂解形成的天然气。目前这 3 种类型的页岩气在美国都有发现，其中热解成因页岩气无论是气藏个数还是资源量都占绝对多数 (J. B. Curtis 2002)。

按照含气泥页岩的沉积环境，可以将页岩气分为海相页岩气、陆相页岩气和海陆过渡相页岩气。其中海相页岩气是由海相页岩生成并赋存在其中的天然气。美国目前勘探开发的页岩气就是以海相页岩气为主，我国南方古生界泥页岩基本为古生代时期古特提斯海域沉积的页岩，因此，我国南方古生界以海相页岩气为重要勘探目标。而我国北方沉积盆地中生界页岩均为陆相湖泊环境下沉积形成的，包括鄂尔多斯盆地三叠系延长组泥页岩，其页岩气勘探重点为陆相页岩气。我国南方局部地区二叠系和三叠系上部泥页岩，以及北方地区石炭系一二叠系页岩为海陆过渡沉积环境下形成的，这些地区具有海陆过渡相页岩气勘探前景。本书以鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相湖泊沉积背景下的泥页岩为典型，重点对陆相页岩气形成及其地质和地球化学特征等进行研究。

页岩气作为非常规天然气，其形成和勘探理论与常规天然气具有完全不同的特征。例如，无论是生物成因还是热解成因的页岩气，都是在天然气生成之后没有排出而大量聚集在烃源岩内形成的。从这个角度考虑，按照常规油气勘探理论和思路，那些在过去被视为无效烃源岩的没有达到排烃门限的富有机质厚层泥页岩，现在应该成为具有页岩气勘探潜

力的重点目标。

(一) 生物成因

生物成因的页岩气是指泥页岩中沉积有机质在成岩早期经过生物化学作用由细菌降解而产生的甲烷气体，即生物成因气。生物成因页岩气最重要的标志是甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值很低（一般小于 -55‰ ）。此外，由于一些中间微生物作用产生了副产品二氧化碳，所以可以根据同位素成分和二氧化碳的存在来判断是否为生物作用形成的天然气。

导致甲烷生成的生物成因作用主要有两种：醋酸盐发酵作用和二氧化碳还原作用。

醋酸盐发酵作用：



二氧化碳还原作用：



在生物成因甲烷的形成过程中，二氧化碳还原和醋酸盐发酵是同时发挥作用的。但是在不同的情况下，它们生成的数量不同。据同位素成分分析，大多数古代生物成因气可能是由二氧化碳还原作用生成的，而近代沉积环境中两种作用都广泛存在。近地表的、年轻的、新鲜的沉积物可以通过上述两种作用形成生物成因气。商业性天然气中生物成因气的主要形成途径是二氧化碳的还原。

还原作用生成甲烷所需的二氧化碳主要有 3 种来源：①低温下浅层二氧化碳，是由有机质经微生物作用（硫酸盐还原和发酵）发生的氧化作用形成；②较高温度下，深层二氧化碳，源于有机质的热脱羧作用；③较大深度处热成烃类的分解作用生成的二氧化碳。研究表明，形成商业聚集的页岩气藏需要多种来源的二氧化碳。

生物成因的页岩气受几个关键因素控制，其中富含有机质的泥页岩是页岩气形成的物质基础，缺氧环境、低硫酸盐环境、低温环境是生物成因的页岩气形成的必要外部条件，充足的埋藏时间是生成大量生物成因气的保证。另外，由于甲烷分子个体生成所需孔隙空间平均直径为 $1\ \mu\text{m}$ ，因此菌类繁殖需要一定的空间，一般泥页岩中有机质富集的细粒沉积物的孔隙空间很有限，但是泥页岩中的裂缝可以为生物生存繁殖提供空间。

目前发现的生物成因的页岩气藏可分为两类：一是早成型（气藏平面形态为径状），泥页岩沉积初期就开始生气；二是晚成型（气藏的平面形态为环状）（李登华等，2009），泥页岩沉积与开始生气间隔时间较长，主要是后期构造抬升埋藏变浅后开始生气。在美国，生物成因页岩气基本上为埋藏后抬升并经历淡水淋滤微生物作用形成的，例如美国密歇根盆地的 Antrim 页岩气就是由于酪根成熟过程中所产生的热降解气和甲烷菌新陈代谢活动中所产生的生物成因气组成的混合气，并且以后者为主。出现这种情况的原因可能是由于存在发育良好的裂缝系统，不仅使天然气和携带大量细菌的原始地层水进入泥页岩内，而且使来自上覆更新统冰川漂移物含水层中的大气降水也同时侵入，这样便给生物成因甲烷的形成创造了有利的条件。

(二) 热解成因

热解成因的页岩气是随着埋深的增加，温度、压力增大，泥页岩中大量有机质演化为干酪根并经过热降解和热裂解作用形成的天然气。按照 Jarvie (2003) 的分析，泥页岩中

热解成因气的形成有 3 个途径 (图 1-2), 首先干酪根分解成气体和沥青, 其次沥青再次分解为液态油和气体, 最后油二次裂解为气体、高含碳量的焦炭或者沥青残余物, 油的二次裂解主要取决于油的残余量和储层吸附作用。在有机质成熟作用的早期, 天然气主要通过干酪根热降解作用形成; 在晚期阶段, 天然气主要通过干酪根、沥青和石油裂解作用形成, 与生物成因气相比, 热解成因气在较高的温度和压力下形成。

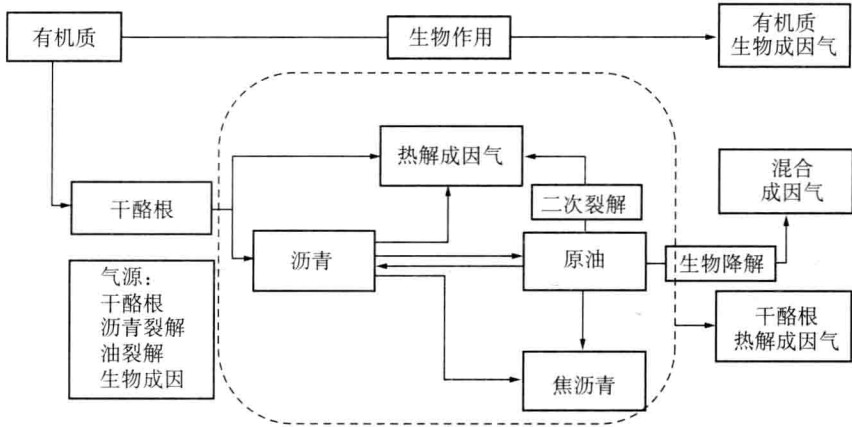


图 1-2 页岩气藏气源成因示意图 (据 Jarvie, 2003)

有机质生烃热模拟实验表明, 在沉积有机质整个成熟过程中, 干酪根、沥青和石油均可以生成天然气, 对于有机质丰度和类型相近或相似的泥页岩来说, 成熟度越高, 形成的烃类气体越多。泥页岩的有机质成熟度镜质组反射率 R_o 在 0.4% ~ 1.88% 之间, 所以泥页岩中的沉积有机质可连续生成天然气。在有机质成熟度 (镜质组反射率 R_o) 增加的方向上, 热解成因气在盆地地层中的体积含量呈增大趋势。美国得克萨斯州福特沃斯盆地 Barnett 页岩气就是通过干酪根热降解和残余油的二次裂解形成的, 而且主要以残余油的二次裂解为主, 有机质成熟度高, 主要以生气为主, 使得 Barnett 页岩气具有较大的资源潜力。

(三) 混合成因

混合成因的页岩气是指不同成因类型的天然气在泥页岩中共同富集存在, 表现为生物成因气和不同成熟度条件下形成的热解成因气同时存在的页岩气。例如: 伊利诺伊盆地南部深层天然气是热解成因的, 而来自盆地北部的页岩气则为热解成因和生物成因的混合气, 是高过成熟天然气和未成熟天然气混合而形成的页岩气藏。总之, 混合成因的页岩气是热解成因气和生物成因气共同富集的结果。

四、页岩气源岩特征

与常规天然气藏或油藏烃源岩特征一样, 页岩气烃源岩特征主要包括总有机碳含量 (TOC)、有机质类型和有机质成熟度三大标志特征。研究表明, 高总有机碳含量 (TOC) 泥页岩常常具有更高的含气量, 大量统计表明, 含不同类型干酪根的泥页岩其 TOC 最少应达到 2% 以上才具有潜在勘探价值。同时对于热解成因页岩气, 热演化程度具有重要影响。一般地, 页岩气形成的 R_o 应该在 1.0% ~ 3.0% 之间; 当 R_o 大于 1.4% 时, 具有很好的产气潜力; 当 R_o 大于 2% 时, 开始裂解形成干气。

(一) 有机质丰度

有机质丰度是评价烃源岩好坏的一个重要指标, 沉积盆地中烃源岩的有机质丰度在很大程度上控制着油气分布的有利区域。总有机碳含量 (TOC) 是反映页岩有机质丰度的一个重要指标, 也是影响页岩气聚集的一个重要因素。美国是页岩气理论研究先进和勘探开发程度较高的国家, 根据大量研究表明, 美国含气泥页岩的总有机碳含量一般在 1.5% ~ 25% 之间, 不同盆地、不同层位泥页岩总有机碳含量变化较大。例如, 美国最重要的含气泥页岩之一的密歇根盆地 Antrim 页岩 Lachine 层段和 Norwood 层段的总有机碳含量介于 0.5% ~ 24% 之间; 而 Antrim 页岩下部的 Paxton 段为泥灰岩和灰色页岩互层, 其总有机碳含量为 0.3% ~ 8%。New Albany 页岩的总有机碳含量绝大多数大于 1%, 但纵向上变化较大, 最高可达 25%。在肯塔基州、印第安纳州和伊利诺伊州东南部地区的 Blocher 层段底部和 Grassy Creek 上段页岩总有机碳含量较高, 一般为 8% ~ 15%, 而 Sweetland Creek 和 Selmier 段页岩总有机碳含量仅为 2% ~ 6%, 在伊利诺斯盆地西北部的 Saverton 和 Hannibal 段页岩总有机碳含量一般小于 1%。福特沃斯盆地 Barnett 页岩的总有机碳含量变化范围为 0.4% ~ 10.6%, 平均值为 4.0%。Ohio 页岩总有机碳含量一般在 0.5% ~ 23% 之间, Lewis 页岩总有机碳含量在 0.5% ~ 2.5% 之间。据目前已有的实验数据表明, 我国页岩总有机碳含量一般在 0.2% ~ 30% 之间。

(二) 有机质类型

有机质类型是评价烃源岩质量的一个重要指标, 烃源岩有机质类型决定了其生烃能力和生成烃类的性质。根据已有研究成果, 北美泥页岩中的有机质主要以 I 型与 II 型干酪根为主, 部分是 III 型干酪根。例如, Antrim 页岩的主要产气层段以 I 型干酪根为主。New Albany 页岩干酪根类型主要为 II 型。Barnett 页岩干酪根类型以生油的 II 型 (藻类) 为主, 得克萨斯州福特沃斯盆地 Gordondale 页岩及哥伦比亚东北部侏罗系干酪根以 I 型或 II 型为主。Ohio 页岩有机质类型以 II 型和 I 型为主, 不排除 III 型干酪根的贡献, Lewis 页岩以 III 型为主。

我国页岩气烃源岩类型丰富, 存在海相、陆相及海陆过渡相 3 种不同沉积类型的泥页岩, 它们广泛分布在华南地区、鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、松辽盆地等。我国古生代沉积的主要为海相黑色泥页岩, 其干酪根类型主要为 I 型和 II 型, 主要分布在四川盆地、塔里木盆地、上扬子东南缘。其中四川盆地海相泥页岩包括下寒武统黑色页岩和志留系龙马溪组黑色笔石页岩; 塔里木盆地泥页岩主要有寒武系灰色泥灰岩、黑色页岩和下奥陶统黑色页岩, 干酪根类型均为 I—II 型。上扬子东南缘奥陶系五峰组—志留系龙马溪组底部黑色页岩有机质以 I 型干酪根为主。

海陆过渡相泥页岩有机质类型以 II、III 型干酪根为主, 其中典型的有柴达木盆地和河西走廊盆地石炭系暗色泥岩和碳质泥岩, 以及华北盆地石炭系煤系地层暗色页岩。

陆相泥页岩以鄂尔多斯盆地三叠系延长组中下部长 7 黑色泥页岩和松辽盆地白垩系青山口组黑色页岩为典型代表, 其有机质类型以 I—II 型干酪根为主。

(三) 有机质成熟度

有机质成熟度是评价一个地区生烃量与油气资源前景的重要指标之一。有机质成熟度对油气资源量具有重要控制作用。根据美国页岩气主产区泥页岩成熟度研究发现, 页岩气

产层的有机质成熟度变化较大,从未成熟、成熟到高、过成熟的页岩气均有发现。因此,根据页岩有机质成熟度可以将页岩气分为3种类型,即高成熟页岩气、低成熟页岩气和高低成熟度混合页岩气。福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏的天然气是由高成熟 (R_o 大于 1.1%) 条件下的原油热裂解形成的。阿巴拉契亚盆地 Marcellus 页岩有机质成熟度 R_o 的变化范围为 0.5% ~ 4.0%,弗吉尼亚州和肯塔基州页岩成熟度 R_o 为 0.6% ~ 1.5%,宾夕法尼亚州西部 R_o 为 2.0%,在西弗吉尼亚州南部 R_o 最高可达 4.0%,且只有在成熟度较高的地区才有页岩气产出。New Albany 页岩的 R_o 较低,约为 0.44% ~ 1.5%,高值区主要位于该盆地的西南部,低值区位于盆地中部,Ohio 页岩 R_o 介于 0.4% ~ 1.3% 之间。

Gilman 等 (2011) 研究认为,最有利页岩气形成的 R_o 值为 1.75% ~ 3.0%, Gilman 等通过对阿科马盆地 Woodford 页岩中约 800 口水平井的 R_o 及单井产量统计分析表明,该区页岩气井的单井产量随 R_o 的增加而增加,对比 Doig、Woodford 和 Marcellus 页岩成熟度,发现它们的 R_o 比较接近,均值在 1.45% ~ 1.51% 之间, Barnett 和 Haynesville 成熟度相近, R_o 均值在 2.25% ~ 2.37% 之间,这些富含有机质的泥页岩具有较大的生气潜力。

我国南方地区古生界海相泥页岩沉积厚度巨大,并经历多期次构造运动,后期构造改造作用强烈,其中深埋作用导致古生界海相烃源岩热演化成熟高。例如下寒武统烃源岩 R_o 在大部分地区都大于 3.0%,局部地区高达 4.0%;下志留统 R_o 集中在 2.0% ~ 3.0% 之间,个别地区高达 4.0%;二叠系沉积有机质 R_o 集中在 1.5% ~ 2.0% 之间,局部地区可达 3.3%。

从页岩气成因分析认为,成熟度高低不是制约页岩气成藏的主要因素,在成熟度高的地区可以形成页岩气,在低成熟甚至未成熟地区也可以形成页岩气(生物成因页岩气),只是低成熟页岩形成页岩气量有限,因为大部分形成了液态油,而只有当液态油在高成熟条件下热解成天然气聚集在泥页岩中才会形成页岩气藏。

五、页岩气储层特征

(一) 泥页岩厚度

泥页岩厚度是页岩气储层特征评价的重要参数,在区域内,最重要的是垂向上 TOC 富集的页岩厚度,而不是整个区域的页岩厚度。根据大量资料统计,在一个区域内高总有机碳含量 (TOC > 3%) 的泥页岩连续厚度达到 15m 即为具有潜在页岩气勘探前景的区域(侯读杰, 2012)。

(二) 泥页岩物性特征

泥页岩储存条件主要取决于泥页岩裂缝发育情况,如密歇根盆地北部 Antrim 页岩主要发育北东向和北西向两组近乎垂直的裂缝系统。其次,孔隙发育情况对泥页岩储集性能影响较大,通过对泥页岩岩相学和扫描电子显微镜 (SEM) 观察研究,识别出泥页岩中不同类型的孔隙,根据其大小分为两大类,即微孔隙(孔径不小于 0.75 μm) 和纳米级孔隙(孔径小于 0.75 μm)。

研究表明,泥页岩中大部分微孔隙与化石、化石碎片或者黄铁矿微球粒有关,一些粒内微孔隙实际上是有孔虫的体腔孔,大多数与化石有关粒内孔隙都被碳酸盐、二氧化硅和(或)黄铁矿胶结物充填,例如在 Barnett 页岩一些富含壳体的岩层内发现由二氧化硅交代

的化石中有大量粒内孔，包括没有被矿物完全充填的藻类体和孢子体等有机组分中的残留空隙。在粉砂级粒径的长石颗粒内也观察到了沿着节理溶解产生的次生孔隙。

纳米级孔隙是 Barnett 样品中最主要的孔隙类型。Loucks (2009) 对得克萨斯州福特沃斯盆地 Barnett 页岩微观孔隙特征进行了研究，发现这些泥页岩发育大量纳米级孔隙，而且绝大多数纳米级孔隙是干酪根颗粒内孔隙，其中不乏较多的微孔隙。干酪根纳米级孔隙大多数呈不规则形态，似气泡状、椭圆状的横截面，孔隙大小范围一般为 5 ~ 750nm，均值大约为 100nm。根据扫描电镜分析的数据测量出干酪根颗粒内孔隙度达到 20.3%。研究认为，这些干酪根中的纳米级孔隙是 Barnett 页岩的主要孔隙类型，而且它们的发育程度与有机质成熟度有关。

大量分析测试表明，优质的含气泥页岩其孔隙度应至少达到 4%。孔隙分布集中的区域应该与有机质富集的区域一致。含气泥页岩的渗透率明显小于致密砂岩的渗透率，含气页岩的渗透率范围一般为 0.00001 ~ 0.001mD，而致密砂岩的渗透率通常为 0.001 ~ 0.1mD。例如，Cluff 地区含气页岩渗透率至少比相同孔隙度的致密砂岩储层的渗透率小 1000 倍。

(三) 页岩气储层矿物特征

页岩的脆性对水力压裂效率及诱导裂缝的稳定性十分重要，页岩的脆性与其矿物成分含量有关。

对美国福特沃斯盆地 Barnett 等多个页岩气产区的泥页岩矿物成分分析认为，页岩气储层物性与其中的石英、长石、碳酸盐矿物等所谓的脆性矿物含量有关，其中 Barnett、Marcellus 和 Woodford 页岩中石英含量均较高，Marcellus 页岩中长石含量较高，Haynesville 页岩中石英和方解石含量均较高，Doig 页岩中黏土矿物含量相对较少，长石、石英和碳酸盐矿物（方解石、白云石）含量均比其他页岩含量高，总之，美国海相泥页岩石英、长石和碳酸盐矿物等脆性矿物含量相对较高，而黏土矿物含量相对较低。

重庆市彭水县连湖镇西北的渝页 1 井是我国第一口页岩气战略调查井，累计钻探深度 325.48m，共获得岩心 281.13m。根据其 21 个井下样品全岩定量分析测试结果表明，渝页 1 井泥页岩矿物成分以石英为主，最高含量为 53.0%，最低含量为 12.2%，平均含量为 39.4%；黏土矿物含量最高为 53.2%，最低为 17.4%，平均含量为 33.1%；长石含量最高为 17.1%，最低为 3.0%，平均含量为 11.3%；黄铁矿含量平均为 7.2%。相比较于美国海相泥页岩，我国的泥页岩表现出黏土矿物含量相对较高，脆性矿物含量相对较低的特点。

六、泥页岩含气性特征

泥页岩中含气性主要表现为泥页岩储层中的总含气量，为游离气、吸附气和溶解气含量的总和，可以用不同的方法进行测试，以获得泥页岩中不同赋存相态的天然气的含量及其总含气量。

吸附相态是页岩气的主要赋存相态之一，也是影响泥页岩含气量的关键因素。泥页岩中黏土矿物颗粒、干酪根及孔隙表面分子受力有差异，因而存在剩余表面力场，从而形成表面势能，使得气体分子在细小颗粒表面上的浓度增大，形成了吸附现象。

在泥页岩中，大部分页岩气以物理吸附相态存在，泥页岩表面分子与甲烷分子间的作用力为范德华力。当处于运动状态的气体分子因外界温度、压力等条件的变化导致动能增

加，克服引力场，由泥页岩表面脱离成为游离相，即发生解吸现象。页岩气的解吸是吸附的逆过程。

Sondergeld (2010) 通过对 Barnett 页岩岩心的微观特征研究发现，Barnett 页岩样品有机质孔隙体积占有有机质体积的 48% ~ 55%，页岩总含气量中有部分来自有机质孔隙。从 Barnett 页岩典型的甲烷吸附曲线可以看出，吸附气含量约占总含气量的 40% ~ 45%，占总含气量 55% ~ 60% 的游离气位于基质孔隙、裂缝和有机质孔隙中。

吸附相态页岩气的解吸程度与页岩中泥质含量及页理发育程度有关，泥质含量越高，页理越发育，其解吸程度就越高。页岩气藏投入开发的初期，其产量主要来自泥页岩的裂缝和基质孔隙中游离相的天然气。随着游离态天然气的采出，泥页岩层压力逐渐降低，泥页岩中吸附气被解吸并进入储层基质中成为游离气，再经裂缝系统流入井底，这就是页岩气的开采过程。值得注意的是，吸附相态及少量溶解相态天然气随着开采过程的继续，会不断地发生解吸和出溶，从而使泥页岩层达到一个相对稳定的状态，这也使得页岩气的开采具有产量低但周期长的特点。

目前研究表明，泥页岩总有机碳含量与页岩气吸附能力间存在着正相关关系，在相同压力下，泥页岩总有机碳含量越高，甲烷吸附量就越高。例如，Jarvie 等 (2004) 通过对多个盆地的研究发现，泥页岩中总有机碳的含量与页岩产气率之间有良好的线性关系。Ross 等 (2007) 对加拿大大不列颠东北部侏罗系 Gordondale 组页岩研究发现总有机碳含量与甲烷吸附能力有关系，还与温度、压力等其他因素有关。Chalmers 等 (2008) 利用加拿大哥伦比亚省下白垩统 Bucking Horse 组页岩中不同母质类型的有机质，在 6MPa 条件下进行甲烷气吸附能力及相关特性模拟实验，结果同样表明，总有机碳含量与甲烷吸附量呈正相关性关系，但不同有机质类型、不同演化程度和不同总有机碳含量的泥页岩的等温吸附能力存在差异。

七、页岩气成藏特征

(一) 页岩气藏基本特征

如前所述，从成因角度来讲，页岩气是生物成因、热解成因或两者混合成因的天然气连续性聚集的结果；在赋存特征方面，页岩气可以是储存在泥页岩天然裂缝和原生粒间孔隙内的游离气，也可以是干酪根和页岩黏土颗粒表面的吸附气或是干酪根和沥青中的溶解气。张金川等 (2004, 2008, 2012) 认为，页岩气是指主体位于暗色泥页岩或高碳泥页岩中，以吸附或游离相态为主要存在方式的天然气聚集，为天然气生成之后在烃源岩层内就近聚集的结果，表现为典型的“原地”成藏模式。从某种意义上来说，页岩气藏的形成是天然气在烃源岩中大规模滞留的结果。

页岩气成藏过程包括生成、运移、聚集、赋存和保存等多个方面。页岩气的生烃条件及过程与常规天然气相同，页岩的有机质丰度、有机质类型和热演化程度决定其生烃能力和时间。页岩气边形成边聚集，不需要构造背景，为隐蔽圈闭气藏。页岩气具有自生自储特征，页岩既是气源岩层，又是储层，页岩气以多种相态赋存，使得页岩具有普遍的含气性。页岩气运移距离相对较短，具有“原地”聚集成藏特征。同时，页岩气对盖层条件要求没有常规天然气高。页岩气储层中气水关系复杂，储层孔隙度较低（通常小于 5%）、孔隙半径小（以微孔隙为主），裂缝发育程度不但控制游离相态页岩气的含量，而且影响着页岩气的运移、聚集和单井产量。