

# 国内页岩气地质理论研究进展

许长春

(中国地质大学,北京 100083)

**摘要:**随着北美页岩气勘探、开发所取得的巨大成功,国内页岩气的研究也迅速发展起来。近年来发表了大量的相关文献,但大多都着重对某一方面进行论述。在对大量相关文献研究的基础上,从成藏机理、地质特征、勘探方法、选区评价与资源量计算等方面对页岩气的地质理论进行了系统的总结与分析。对照北美页岩气的研究进展,分析了中国在页岩气研究中存在的问题,并认为中国页岩气的勘探开发应首先选择地质、经济条件合适的地区进行技术攻关,然后再向全国推广。

**关键词:**页岩气;成藏机理;自生自储;地质评价;储量计算;中国

**中图分类号:**TE132.2 **文献标识码:**A

## 引言

长期以来,在经典的石油地质学理论中都是将泥页岩作为烃源岩或盖层来研究,但随着能源需求的增长与理论、技术的进步,富有机质泥页岩现今也成为了油气勘探与开发的重要目标。美国与加拿大最先在泥页岩中寻找天然气,并已取得了显著的成果。中国页岩气虽未进入正式的开发阶段,但国内学者已做了大量的理论研究,并取得了一些重要成果。

## 1 页岩气的定义

Curtis 等按赋存状态将页岩气分为 3 个部分,即吸附于干酪根和页岩颗粒表面的吸附气、存储于储层孔隙和裂隙中的游离气和少量溶解气<sup>[1]</sup>。国内学者将页岩气定义为:主体位于暗色泥页岩或高炭质泥页岩中,以吸附或游离态为主要存在方式的天然气聚集,其中也包括存在于页岩夹层中的粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩,甚至是砂岩地层中的天然气聚集<sup>[2]</sup>。

值得注意的是,国内外所指的页岩在定义上是有所区别的。国内学者按有无纹层或页理构造将黏土岩(粒径小于 0.003 9 mm)划分为页岩

(shale)和泥岩(mudstone),而国外学者将粒径小于 0.003 9 mm 的细粒沉积岩统称为页岩,即国外所指的页岩包括了国内所指的泥岩与页岩。因此,在国内应将页岩气称之为泥页岩气,才更加准确。

## 2 成藏机理

### 2.1 成藏过程分析

烃源岩中的有机质经过一系列的热演化过程,形成大量油气,并在各种动力作用下向外排出,在邻近的渗透性地层中运移、聚集成藏。由于排烃作用有限,并不是所有的烃类都能及时排出,最终残留下来的部分在合适的地质条件下就可能聚集成藏,形成页岩气资源<sup>[3]</sup>。泥页岩既是烃源岩又是储集层,页岩气在成藏过程中无运移或只有很短的运移,具有典型的过渡性成藏机理,即自生、自储、自封闭的成藏模式<sup>[4]</sup>。页岩气藏不以常规圈闭的形式存在,在成藏上具有隐蔽性<sup>[5]</sup>。页岩气生成与成藏简化模型图见图 1<sup>[6]</sup>。

在不同的成藏条件下,页岩气藏可表现为典型的吸附机理、活塞式或置换式成藏机理,是天然气成藏机理序列中的重要组成和典型代表<sup>[7]</sup>。页岩气藏完整的充注与成藏过程可分为 3 个阶段<sup>[8-9]</sup>:

收稿日期:20110820;改回日期:20111021

基金项目:国家自然科学基金“中国南方下古生界海相富有机质页岩裂缝发育程度与主控因素定量关系研究”(41072089)

作者简介:许长春(1987-),男,2009年毕业于长江大学地质专业,现为中国地质大学(北京)矿产普查与勘探专业在读硕士研究生,专业方向为盆地分析与模拟。

第 1 阶段,初始生成的天然气首先满足有机质和岩

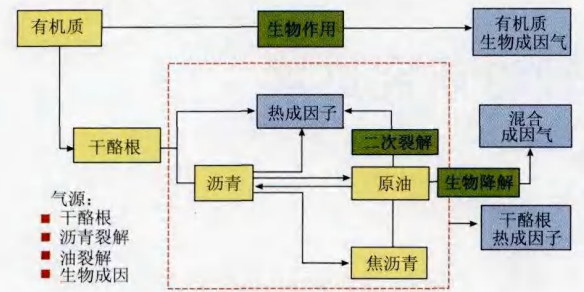


图 1 页岩气生成与成藏简化模型图

石颗粒的吸附作用,在该阶段形成的页岩气藏以吸附机理为主,具有与煤层气相似的特征;第 2 阶段,当吸附气量达到饱和后,剩余的气体便在基质孔隙或裂隙中聚集,其富集机理类似于孔隙型储集层中的天然气聚集,同时,温度、压力的升高会使泥页岩层产生大量裂缝,增加游离气的储集空间;第 3 阶段,

富余的天然气在生烃膨胀等作用下向外运移、扩散,从而使页岩地层与其中的砂岩薄互层均表现为普遍的含气性,若运移、扩散作用强烈,则会形成一定规模的排烃作用,在地质条件合适的情况下,就可能形成常规气藏或根缘气藏<sup>[10]</sup>。

2.2 与其他类型天然气的对比

常规和非常规天然气主要依据其赋存状态来界定<sup>[11]</sup>。常规天然气指赋存于常规构造、地层等圈闭类型中的天然气;其余赋存状态的天然气可统称为非常规天然气,如页岩气、煤层气、根缘气、可燃冰等。作为一种新型的天然气类型,页岩气藏在成藏机理和储层特征等方面具有自身的独特性,使其与其他类型的天然气之间既有紧密的联系,同时又存在着重要的差异。不同类型天然气藏基本特征对比见表 1<sup>[12]</sup>。

表 1 不同类型天然气藏基本特征对比

特点	页岩气	煤层气	根缘气	常规储层气
成因类型	生物气或热成因气	生物气或热成因气	热成因气为主	多样性
成藏动力	分子间作用力、生气膨胀力、毛细管力	分子间吸附作用力等	生气膨胀力、毛细管力、水动力等	浮力、毛细管力、水动力等
成藏机理	吸附平衡、游离平衡	吸附平衡	生气膨胀力与阻力平衡	浮力与毛细管力平衡
赋存状态	20% ~ 85% 为吸附,其余为游离和水溶	85% 以上为吸附,其余为游离和水溶	砂岩底部含气、气水倒置	富集于圈闭高点、不考虑吸附
储层	泥页岩及其间的砂质岩夹层	煤层及其中的碎屑岩夹层	致密储层及其间的泥、煤质夹层	孔隙性砂岩、裂缝性碳酸盐岩等
成藏特征	自生自储	自生自储	致密储层与烃源岩大面积直接接触	运移路径上的圈闭
主控因素	成分、成熟度、裂缝等	煤阶、成分、埋深等	气源、储层、源储关系等	气源、输导、圈闭等
分布特征	盆地古沉降 - 沉积中心及斜坡	具有生气能力的煤岩内部	盆地斜坡、构造深部位及向斜中心	构造较高部位的多种圈闭
主要成分	甲烷为主,少量乙烷、丙烷等	甲烷为主	甲烷为主,乙烷、丙烷等变化较大	甲烷为主,乙烷、丙烷等变化较大
运移特征	无运移或极短运移	无运移	较短运移	二次运移
保存条件	自身封盖、无圈闭	自身封盖、无圈闭	底部封盖、无圈闭	上部封盖、常规圈闭

页岩气与常规天然气之间的最大差异在于,页岩气属于自生自储的隐蔽型油气藏,吸附气是其重要的组成部分<sup>[13]</sup>;煤层气与页岩气的烃源岩不同,因此其发育的沉积环境存在着重要的差异,同时煤层气主要以吸附气为主,而页岩气除了具有吸附气之外,还包含了游离气及少量的溶解气<sup>[14-15]</sup>;根缘气最大的特征在于其“气水倒置”的关系,且根缘气在成藏过程中需要有排烃过程,只是一般储层与源岩相邻,运移距离很短<sup>[16]</sup>。

### 3 地质特征

作为一种新型的天然气类型,页岩气具有其独特的地质特征,在总结前人研究成果的基础上,对其进行了归纳。

#### 3.1 成因及类型

页岩气的生成贯穿于有机质向烃类转化的整个过程,其类型包括生物气、低熟—未熟气、热解气、裂解气、过渡带作用气(生物再作用气),以及沥青生气等,覆盖了生物化学、热解及裂解等几乎所有可能的有机生气模式<sup>[17-18]</sup>。

#### 3.2 烃源岩特征

其类型主要为富含有机质的暗色泥页岩、高碳泥页岩及富含沥青质的泥页岩等;组成成分一般为30%~50%的黏土矿物、15%~25%的粉砂质和1%~20%的有机质,多与浅色粉砂岩呈薄互层<sup>[4]</sup>。烃源岩中的总有机碳含量(TOC)一般较高;干酪根类型以Ⅰ型或Ⅱ型为主,少量为Ⅲ型<sup>[19]</sup>。

#### 3.3 赋存相态

页岩气的赋存相态具有多样性变化的特点<sup>[7]</sup>,包含游离态、吸附态和溶解态,其中以吸附态和游离态为主,是区别于其他类型天然气的主要特征之一。吸附气与游离气之间的构成比例差异很大,吸附气可占天然气总量的20%~85%。

#### 3.4 储层特征

(1) 孔隙度和渗透率极低<sup>[20]</sup>,总孔隙度一般小于10%,含气的有效孔隙度只有1%~5%,渗透率则随裂缝发育程度的不同而有较大的变化,在开

发过程中一般需要进行人工压裂。

(2) 主要发育微孔—纳米级孔隙,其中以纳米级孔隙为主<sup>[21]</sup>,其比表面积大,可增加吸附气的含量。

(3) 储层面积大、范围广,而且常呈区域性、连续性分布<sup>[22]</sup>。

(4) 储集空间的主要类型有:①基质孔隙,包括残余原生孔隙、有机质生烃所形成的微孔隙、黏土矿物伊利石化所形成的孔隙和不稳定矿物(如长石、方解石等)溶蚀形成的溶蚀孔;②裂缝,主要包括构造裂缝(如张性裂缝、剪切裂缝、滑脱裂缝、构造压溶缝合线、垂向载荷裂缝、垂向差异载荷裂缝)和非构造裂缝(成岩收缩裂缝、热收缩裂缝、溶蚀裂缝和风化裂缝)<sup>[23]</sup>;③孔—缝复合型,主要存在于以钙质泥页岩互层,夹薄层砂岩的地层中,具有泥页岩裂缝、层理缝和薄层砂岩孔隙等储集空间<sup>[7]</sup>;④不整合型,不整合面和沉积间断面等<sup>[22]</sup>。

#### 3.5 压力特征

由于具有大量的天然气聚集,原生页岩气藏一般具有异常高压。若发生构造升降运动,其异常压力将随之升高或降低<sup>[20]</sup>。

#### 3.6 资源潜力

页岩气藏为连续性气藏,具有饱含气性的特征,含气面积广、资源量丰富<sup>[21]</sup>。

#### 3.7 开发特征

页岩气井的单井日产量一般较低,但产量稳定,生产寿命长,最高可达30 a,年产量的递减率一般小于5%<sup>[24]</sup>。

### 4 勘探理论与技术

虽然中国页岩气还未进入实际的开发阶段,但国内许多研究者已在页岩气的勘探方面做了大量工作。就目前来说,可将页岩气的勘探研究划分为3个阶段<sup>[24]</sup>:第1阶段,引进和消化国外研究成果,对页岩气藏的认识由裂隙气藏转化为吸附气藏;第2阶段,将中国含有机质泥页岩盆地与美国已开发的页岩气盆地进行地质类比,对中国页岩气资源量进行整体评估;第3阶段,选取页岩气的有利发育区进行重点研究,分析页岩气富集的影响因



素,及其与美国页岩气的异同点,为进一步的勘探开发做准备。

(1) 地质异常找矿理论<sup>[25]</sup>。该理论认为,任何矿产的聚集成藏都会受到各种因素的影响,使矿产区与周围环境之间产生差异,即致矿异常。地质异常找矿理论就是基于各种控矿因素(地质异常)的系统性、层次性、关联性和有序性创立分层次查明致矿、分阶段矿产勘探的理论和方法。

页岩气的聚集成藏需要一系列的必备条件,也就是页岩气聚集的主控因素,即页岩气的地质异常。按地质异常对页岩气聚集的控制程度由低到高,可将其划分为背景地质异常(地层、岩性、古地理、古环境等)、聚集地质异常(地质、地球物理、地球化学异常)和商业地质异常(页岩气资源量、页岩的脆性及产能)。页岩气的勘探过程实际上就是对各种控矿因素进行有序排列的求解过程,这也正是地质异常找矿理论的基本思想。因此,地质异常找矿理论为页岩气的勘探提供了系统理论和科学方法。

(2) 构造生烃理论<sup>[26]</sup>。该理论认为,构造运动产生的断裂和裂缝可降低排烃能,使欠生烃的有机质在短时间内满足生烃条件,形成集中生烃,即构造生烃。生烃、滞留在泥页岩中的烃类和排烃呈现协调的动态平衡,即生烃与地层中页岩气含量之间的平衡、页岩气含量与排烃之间的平衡。

有机质的生烃过程并不是唯一的,页岩气不能

简单地用经典生烃理论中的生气窗来限定。按照构造生烃理论的观点,页岩气的勘探领域要广阔得多。页岩气不应局限于地台海相沉积层和陆相沉积、断陷盆地中,只要存在烃源岩,就有可能存在页岩气。

(3) 油气微生物勘探技术<sup>[27]</sup>。土壤中的专性微生物以轻烃气体作为唯一的能量来源,在油气藏正上方的土壤中将非常发育,并形成微生物异常带。利用现代生物技术,结合其他地质资料,就可预测含油气区、油气前景分级评价、剩余油分布等。该项技术的优点在于:微生物单解性强、灵敏度高,可将异常指数按指数级放大,油气可区分性强、分析便捷迅速。

(4) 地震勘探<sup>[28-29]</sup>。主要采用各种地震资料,认识复杂构造、储层非均质性和裂缝发育带;利用AVO叠前反演技术计算岩石物性参数,判断地层岩性、识别泥页岩地层;通过相干分析技术、地震属性分析、层间切片等预测页岩裂缝,提高勘探成功率;微地震技术可用于预测裂缝的各种特征参数。

(5) 测井技术<sup>[30-32]</sup>。通过测井资料可定量分析储层的岩性,确定储层的基本评价参数,如孔隙度、渗透率、含气饱和度、储层厚度等。目前国外较先进的测井技术有电阻率扫描成像、声波成像、阵列感应、核磁成像等。页岩气测井曲线响应特征见表2<sup>[33]</sup>。

表2 页岩气测井曲线响应特征

测井曲线	输入参数	曲线特征	影响因素
自然伽马	自然放射性	高值(>100API), 局部低值	泥质含量越高,其值越大;有机质中 可能含有高放射性物质
井径	井眼直径	扩径	泥质地层总扩径(有井眼扩大现象);有机质的 存在使扩径更加严重
声波时差	时差曲线	较高,有周波跳跃	岩性密度:泥岩<页岩<砂岩;有机质丰度高,声波时差大;含气量 增大,声波值变化大;遇裂缝发生周波跳跃;井径扩大
中子孔隙度	中子孔隙度	高值	束缚水使测量值偏高;含气量增大使测量值偏低; 裂缝地区的中子孔隙度变大
地层密度	地层密度	中低值	含气量大,密度值低;有机质使测量值偏低; 裂缝底层密度值偏低;井径扩大
岩性密度	有效光电吸收指数	低值	烃类引起测量值偏小;气体引起测量值 偏小;裂缝带局部曲线降低
深浅电阻率	电阻率值	总体低值,局部高值;深浅 电阻率曲线几乎重合	地层渗透率;泥质和束缚水均使电阻率偏低;有机质干酪根 电阻率极大,测量值局部为高值

(6) 录井方法<sup>[34]</sup>。在地质录井中分析岩心(屑)的变化,可直接判断储层的含油气特征;钻速的变化可反映泥页岩的矿物成分;气测录井(包括VMS)可检测游离气含量;地化录井可对吸附气进行检测;通过 $dc$ 指数法、Sigma法、泥页岩密度法、地温梯度法等可检测地层压力,间接反映地层的含气性特征。

## 5 页岩气选区评价

### 5.1 页岩气富集的影响因素

要对页岩气进行选区评价,首先应了解影响其富集的各种地质因素。总体来说,可将其分为内部因素与外部因素两大类。内部因素是指泥页岩地层本身的因素,外部因素指外界条件对页岩气富集的影响。

#### 5.1.1 内部因素

(1) 有机质类型及含量。不同类型干酪根由于化学组成不同,其生烃潜力也存在差异;有机质含量不仅是衡量烃源岩生烃潜力的重要参数,而且直接影响着吸附气的含量<sup>[35]</sup>。

(2) 热成熟度<sup>[18,36]</sup>。有机质热演化程度越高,残留在烃源岩中的气体也就越多;烃类的增加可使地层压力升高,从而提高页岩气的吸附性能。当压力升高到一定程度时,将产生微裂缝,为游离气提供良好的储集空间。

(3) 矿物组成。泥页岩中的无机矿物成分主要为黏土、石英和方解石,其相对组成的变化影响着泥页岩的岩石力学性质、孔隙结构和对气体的吸附性能<sup>[35,37]</sup>。黏土矿物可增加吸附气的含量;石英可提高岩石的脆性,使地层更容易产生天然和诱导裂缝;方解石在埋藏过程中可能发生胶结,从而降低泥页岩层的孔隙度和渗透率。

(4) 储层物性。①孔隙度和孔隙结构。孔隙度越高、孔径越大,可存储的游离气越多<sup>[31-32]</sup>;微孔所占比例越高,其表面积越大<sup>[19,35]</sup>,对气体分子的吸附能力越强<sup>[38]</sup>。②渗透率。主要影响气体的运移与游离气的储存<sup>[38]</sup>,裂隙的发育程度对其影响很大。

(5) 裂缝发育情况。裂缝一方面为页岩气提供了运移通道和储集空间;另一方面,若裂缝规模过大,可导致天然气大量散失<sup>[39]</sup>。石英含量的高

低是影响裂缝发育的重要因素。

#### 5.1.2 外部因素

(1) 温度与压力。温度与气体的吸附能力成负幂指数的关系,对吸附气的影响远大于有机碳含量<sup>[40]</sup>;压力的增加不仅能产生裂缝,还能降低气体吸附所需的结合能<sup>[19]</sup>。

(2) 埋深。主要通过温度和压力的变化来影响页岩气的富集<sup>[39]</sup>。

(3) 构造作用。虽然页岩气具有较强的抗构造破坏能力<sup>[40]</sup>,但构造运动对页岩气的聚集仍然具有重要的影响。首先,构造作用能够直接影响泥页岩的沉积和成岩作用,进而对泥页岩的生烃过程和储集性能产生影响;其次,构造运动的抬升与下降,可改变地层的温度和压力;再次,构造作用还可产生裂缝,有效改善泥页岩的储集性能<sup>[41]</sup>。

(4) 含水量与湿度。含水量的增加将减少游离气的储集空间、增加溶解气的含量。当岩石被水润湿后,将占据活性表面,降低吸附气的含量<sup>[38]</sup>。

(5) 沉积环境。较快的沉积条件和封闭较好的还原环境有利于黑色页岩的形成<sup>[19]</sup>。较快的沉积速率可使富有机质泥页岩在被氧化之前大量沉积下来;水体缺氧可抑制微生物的活动性,减小对有机质的破坏作用。

### 5.2 页岩气的选区评价

页岩气选区评价主要解决2个核心问题<sup>[24]</sup>:一是是否具有足够的天然气地质储量;二是是否具备足够的渗流能力与条件满足经济效益。在评价过程中,主要通过有机质丰度和成熟度、含气饱和度、泥页岩厚度、储层物性等来评价泥页岩储层的储气量大小,即地质储量(GPI);通过矿物组成、力学性质、裂缝发育情况等评价储层是否易于改造,能否在保证经济效益的前提下将其开采出来<sup>[41]</sup>。页岩气勘探开发有利区的选择应在综合考虑地质(如页岩气含量、含气范围、目的层深度等)、工程(如气层压力、渗透率、裂缝分布、气体组成、含气饱和度等)和经济(如地面设施、天然气管道、投资费用等)各种因素的基础上展开<sup>[42]</sup>。页岩气评价的3个方面及其相互之间的关系见图2<sup>[43]</sup>。

统计表明<sup>[3]</sup>,有利于开采的页岩气藏一般具有以下特征:分布面积广、埋深适中、厚度大(大于30 m)、有机质丰度高( $TOC > 2\%$ )、成熟度适中

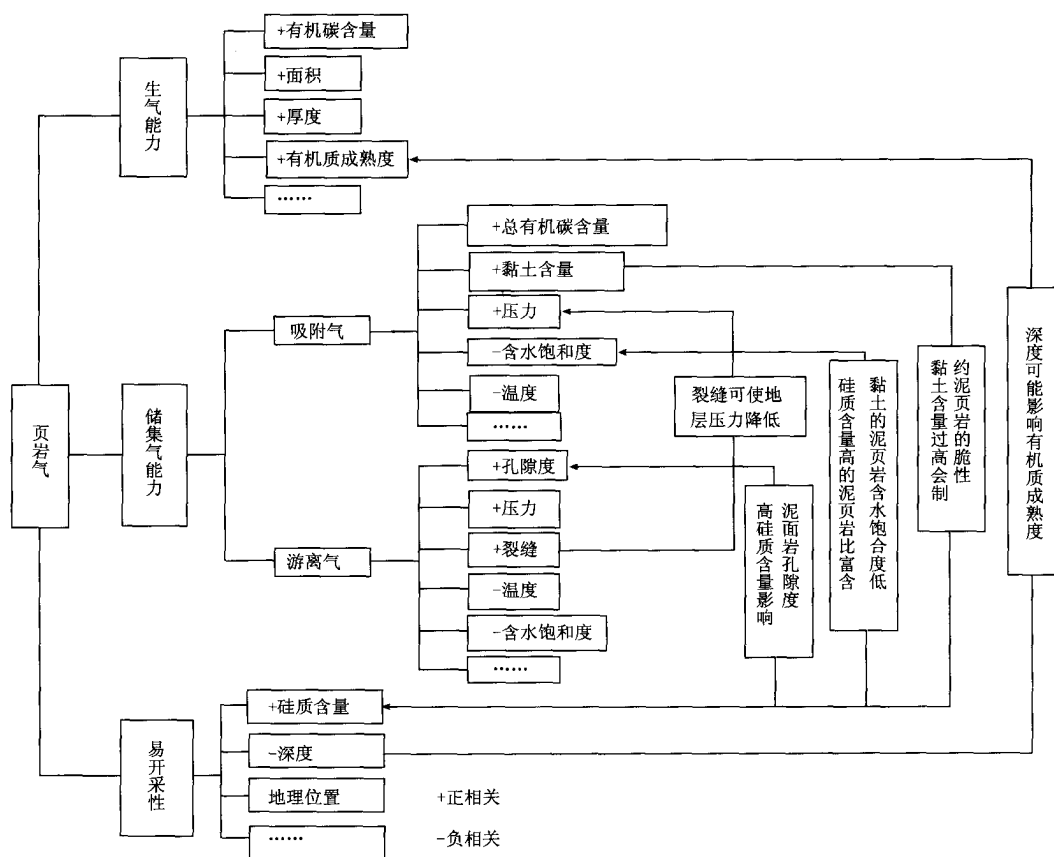


图2 页岩气评价的3个方面及其相互之间的关系

( $R_o$  介于 1.2% ~ 2.5% 之间)、含气量较高 (3 ~ 10  $\text{m}^3/\text{t}$ )、黏土含量中等 (小于 40%) 和脆性较高 (即低泊松比、高杨氏模量), 以及围岩条件有利于水力压裂等。

## 6 页岩气资源量计算方法

目前,页岩气资源量的计算方法主要可分为两大类<sup>[44]</sup>:一类是静态法,依据页岩储层的静态地质参数来计算其资源量;另一类是动态法,根据页岩气在开发过程中的动态资料来计算。

### 6.1 静态法

(1) 类比法。在勘探初期,探井等基础资料没有或较少的情况下,应用类比法比较简单有效<sup>[45]</sup>,可进一步分为资源丰度类比法和体积丰度类比法。其计算方法主要是将各关键评价参数 (如泥页岩

厚度、有机碳含量等) 与已成功勘探开发的页岩气区进行地质类比,以此来计算未开发区的资源量<sup>[26]</sup>。

(2) 容积法。这种方法估算的资源量往往要大于实际的生产量,适合开发设计前的储量预测<sup>[45]</sup>。其计算关键是确定游离气的有效孔隙度和含气饱和度,用取样所得的参数,配以储层体积,来推导整个页岩气藏的资源量。

(3) 成因法。其具体过程是通过实验求出泥页岩中剩余的总含气量与排烃系数,根据“页岩气资源量 = 总生气量 - 排烃量”的关系来求算。由于在常规的页岩气资源评价的方法中,页岩气是作为残留于烃源岩中的损失量来进行计算的,因此成因法是对页岩气资源量计算的重要补充<sup>[46]</sup>。

(4) 统计法。若已获得一定的生产资料,使用该方法可取得更加准确的数据。该方法主要是根

据所获得的大量数据之间的数理统计关系来推导出页岩气藏的资源量。

(5) 综合分析法。在上述各种方法的基础上,进行综合分析,可进一步得到更加可靠的数据<sup>[43]</sup>。在计算过程中,主要采用蒙特卡罗法、打分法、盆地模拟法、特尔菲综合法等来进行综合分析,并可通过概率分析来预测页岩气的平面分布<sup>[46]</sup>。

## 6.2 动态法

主要依据各种生产数据之间的拟合关系进行外推,来预测未知资源量的大小,包括压力累计法(累计产量与压力递减的关系)、物质平衡法(平均地层压力与采气量之间的关系)和递减曲线分析(生产时间与生产量之间的关系)<sup>[45]</sup>。

## 7 国内在页岩气研究中存在的问题及建议

中国页岩气的发展尚处于起步阶段,在相关理论和技术方面还存在一些问题:一是中国还没有实际意义上的页岩气藏,在储层评价与资源量计算上只能与美国页岩气藏的参数进行对比,这样所得的结果肯定会存在很大误差;二是中国的开发技术,特别是水平井与储层压裂改造技术与国外还存在较大的差距;三是开采中使用的水力压裂需要使用大量的水资源,而且在其中会加入化学物质,可能对环境产生不利的影响。

当前国内页岩气的发展状况是,大多数研究者都认为中国页岩气资源丰富,对页岩气的区域勘探研究越来越多,几乎遍布了全国,但至今也没有一口实际意义上的页岩气开发井。页岩气能否被开采出来,关键在于开发技术与经济条件的关系。因此,通过研究认为,目前页岩气的发展应在油气勘探开发程度相对较高,地理环境与经济条件相对较好的地区(如渤海湾地区)建立试验区,利用其丰富的地质资料与开发水平进行技术攻关,而不是盲目地在全国范围内进行勘探(如目前研究最多的扬子地区,除四川盆地外,其他地区整体的勘探程度都很低,且自然与经济条件也相对较差,要想在这样的地方取得进展,恐怕在短时间内是不可能实现的),这样既可以加快页岩气的发展步骤,也能

节约成本与资源。

## 参考文献:

- [1] Curtis J B. Fractured shale - gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921 - 1938.
- [2] 聂海宽, 张金川. 页岩气藏分布地质规律与特征[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(2): 700 - 708.
- [3] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 27 - 32.
- [4] 王冕冕, 郭肖, 曹鹏, 等. 影响页岩气开发因素及勘探开发技术展望[J]. 特种油气藏, 2010, 17(6): 12 - 17.
- [5] 许洁, 许明标. 页岩气勘探开发技术研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2011, 8(1): 80 - 82.
- [6] 陈更生, 董大忠, 王世谦, 等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 17 - 21.
- [7] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- [8] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15 - 18.
- [9] 陈更生, 董大忠, 王世谦, 等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 17 - 21.
- [10] 江怀友, 宋新民, 安晓璇, 等. 世界页岩气资源与勘探开发技术综述[J]. 天然气技术, 2008, 2(6): 26 - 30.
- [11] 张鸿翔. 页岩气: 全球油气资源开发的新亮点——我国页岩气开发的现状与关键问题[J]. 中国科学院院刊, 2010, 34(4): 392 - 400.
- [12] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136 - 140.
- [13] 张琴, 边瑞康, 唐颖, 等. 库车拗陷页岩气聚集条件与勘探前景[J]. 大庆石油学院学报, 2010, 34(6): 13 - 17.
- [14] 姜文利, 赵素平, 张金川, 等. 煤层气与页岩气聚集主控因素对比[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 1057 - 1060.
- [15] 郭洋. 页岩气与煤层气成藏条件与开发技术对比[J]. 内江科技, 2010, 31(12): 131.
- [16] 孙超, 朱筱敏, 陈菁, 等. 页岩气与深盆气成藏的相似与相关性[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(1): 80 - 86.
- [17] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151 - 156.
- [18] 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析——



- 以美国页岩气盆地为例[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 33-39.
- [19] 王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 350-356.
- [20] 赵群, 王红岩, 刘人和, 等. 世界页岩气发展现状及我国勘探前景[J]. 天然气技术, 2008, 2(3): 11-15.
- [21] 董大忠, 邹才能, 李建忠, 等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 324-336.
- [22] 米华英, 胡明, 冯振东, 等. 我国页岩气资源现状及勘探前景[J]. 复杂油气藏, 2010, 3(4): 10-13.
- [23] 丁文龙, 许长春, 久凯, 等. 泥页岩裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 135-144.
- [24] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 392-400.
- [25] 李桂范, 赵鹏. 地质异常找矿理论在页岩气勘探中的应用[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 119-124.
- [26] 熊斌辉, 米立军, 王存武. 构造生烃理论及其在页岩气上的应用[J]. 海洋石油, 2010, 30(4): 1-6.
- [27] 袁志华, 张玉清. 利用油气微生物勘探技术寻找页岩气有利目标区[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 406-409.
- [28] 胡进科, 李皋, 陈文可, 等. 国外页岩气勘探开发综述[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2011, 13(2): 72-75.
- [29] 陈俊. AVO反演技术在页岩气勘探开发中的应用[J]. 内江科技, 2011, 33(4): 94.
- [30] 莫修文, 李舟波, 潘保芝. 页岩气测井地层评价的方法与进展[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 400-405.
- [31] 潘仁芳, 赵明清, 伍媛. 页岩气测井技术的应用[J]. 中国科技信息, 2010, (7): 16-18.
- [32] 吴庆红, 李晓波, 刘洪林, 等. 页岩气测井解释和岩心测试技术——以四川盆地页岩气勘探开发为例[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 484-488.
- [33] 潘仁芳, 伍媛, 宋争. 页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J]. 中国石油勘探, 2009, 14(3): 6-9.
- [34] 庞江平, 罗谋兵, 熊驰原, 等. 志留系页岩气录井解释技术[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(S1): 28-31.
- [35] 杨振恒, 腾格尔, 李志明. 页岩气勘探选区模型——以中上扬子下寒武统海相地层页岩气勘探评价为例[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 8-14.
- [36] 刘良刚, 伍媛, 刘启亮, 等. 成熟指数 MI 值在页岩气预测中的应用[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(11): 13-16.
- [37] 张林晔, 李政, 朱日房. 页岩气的形成与开发[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 124-128.
- [38] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等. 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J]. 地球科学进展, 2010, 25(6): 597-604.
- [39] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 484-491.
- [40] 蒲泊伶, 蒋有录, 王毅, 等. 四川盆地志留统龙马溪组页岩气成藏条件及有利地区分析[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 225-230.
- [41] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(10): 7-12.
- [42] 孙玉凯, 李新宁, 何仁忠, 等. 吐哈盆地页岩气有利勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(1): 4-6.
- [43] 李延钧, 刘欢, 刘家霞, 等. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 28-34.
- [44] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 308-317.
- [45] 李艳丽. 页岩气储量计算方法探讨[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 466-470.
- [46] 朱华, 姜文利, 边瑞康, 等. 页岩气资源评价方法体系及其应用——以川西坳陷为例[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 130-134.

编辑 刘兆芝