

## 中国页岩油的形成和分布理论综述

张欣, 刘吉余, 侯鹏飞

东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318

**摘要:** 页岩油是指生成并滞留在烃源岩中, 以游离或吸附状态赋存在地层微纳米级储集空间中, 基本未运移或极短距离运移的低熟—半熟油气。通过总结泥页岩低孔低渗的特点, 对页岩油的形成机制、演化条件、保存条件以及分布特征进行了讨论。泥页岩中有机质的丰度、类型以及演化成熟度是泥页岩生油能力的主要影响因素。生油能力较好的 I 或 II 型干酪根是良好的有机质类型, 而 III 型干酪根则以生气为主。在适当的埋藏深度下, 达到生油门限, 即可发生热化学反应产生大量液态烃。弱水动力条件以及相对长时间稳定的构造活动, 都能使得有机质及沉积物缓慢沉降并演化。陆上优质泥页岩由于分布范围广、类型多、时代跨度大、陆相湖盆面积小、物源丰富且湖平面变化等原因, 有利于页岩油气形成。

**关键词:** 页岩油; 泥页岩; 演化条件; 保存条件; 形成机制

## A REVIEW ON THE FORMATION AND DISTRIBUTION THEORIES OF THE SHALE OIL IN CHINA

ZHANG Xin, LIU Ji-yu, HOU Peng-fei

*School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang Province, China*

**Abstract:** Shale oil refers to the low mature-semimature oil and gas that is generated and retained in source rocks and occurs in micro-nano level reservoir space of strata in free or adsorbed state, with little or extremely short migrated distance. The paper summarizes the characteristics of low porosity and low permeability of argillite, and discusses the formation mechanism, evolution, preservation conditions and distribution features of shale oil. The abundance, type and maturity of organic matter are the main factors affecting the oil-generating capacity. Type I or II kerogen with good oil-generating capacity is favorable organic matter, while type III kerogen is gas-generating dominated. At the proper burial depth that reaches the oil generation threshold, thermochemical reaction will take place to produce large amounts of liquid hydrocarbon. Both the weak hydrodynamic condition and relatively long-term stable tectonic activities lead to the slow subsidence and evolution of organic matter and sediments. Fine argillite on land contributes to the formation of shale oil and gas due to its wide distribution, various types, large time span, small area of lacustrine basin, abundant provenance and lake level changes.

**Key words:** shale oil; argillite; evolution condition; preservation condition; formation mechanism

收稿日期: 2018-09-04; 修回日期: 2018-11-22. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金“白云岩对陆相湖盆泥页岩层系储层物性和脆性的影响定量研究”(编号 41672113).

作者简介: 张欣(1995—), 女, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业, 通信地址 黑龙江省大庆市高新技术开发区发展路 184 号, E-mail//heinuwu@qq.com

通信作者: 刘吉余(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事石油开发地质学的教学和科研工作, 通信地址 黑龙江省大庆市高新技术开发区发展路 184 号, E-mail//heinuwu@qq.com

## 0 引言

当今阶段,世界石油工业面临的主要矛盾,是对能源日益增长的需求与常规石油能源的不断减少.为了缓解这一矛盾并寻求技术上的突破,人们把目光转向了非常规能源领域.

近年来,全球范围内对非常规油气的研究取得了突破性进展,使得世界石油工业渐有回暖趋势,也为石油工业经济的复苏带来了新的希望.

非常规油气包括三类:1)致密砂岩油气,主要赋存在致密砂岩储集层或灰岩中;2)碳酸盐岩油气,主要赋存在碳酸盐孔隙及裂缝中,比较常见裂缝型油气藏;3)页岩油气,主要赋存在以泥页岩为主的页岩层系中,也包括层系中的致密碳酸岩或碎屑岩的邻层和夹层泥岩.前两者统称为致密页岩油气,都是极低孔低渗状态下的非常规油气,但物性条件较好的情况下可以定义为常规油气.而页岩油气的形成、运移机制和赋存状态区别于致密砂岩油气或碳酸盐岩油气(滞留在烃源岩中基本未运移),是未来非常规油气勘探开发最具有潜力的领域.

## 1 页岩油的概念

### 1.1 页岩油的定义

不同国家、不同机构乃至不同的学者对于页岩油的理解和定义都有所差别.一般意义上来说,页岩油是指生成并滞留在烃源岩中,以游离或吸附状态赋存在地层微米级储集空间中,基本未运移或极短距离运移的低熟—半熟油气.富有机质的泥页岩既是生油岩,又是储集岩,是典型的自生自储式油气聚集类型.

邹才能等<sup>[1]</sup>通过短距离运移及未运移这样的运移机制将致密油气和页岩油气区分开来.而张金川等<sup>[2-3]</sup>则从赋存的主体介质入手,认为页岩油是“曾经有过生油历史或现今仍处于生油状态下的泥页岩地层,也包括泥页岩地层中可能夹有的致密砂岩、碳酸盐岩,甚至火山岩等薄层.”笔者通过阅读大量文献,总结出页岩油的形成与分布机制.

### 1.2 页岩油的形成及演化过程

#### 1.2.1 页岩油的形成条件

由于泥页岩具有极低孔低渗的特点,所以不能用常规储层的方法来研究.一直以来,泥页岩因为其富含有机质,被认为是良好的烃源岩,又因为其致密性被

视为防止油气逸散的良好盖层.直到近年来,随着油气勘探重点逐渐向非常规油气转移,人们把目光转移到泥页岩的储藏性能上.

页岩油在形成机制、分布特征等方面都与常规油气甚至致密油气有明显差别.

#### (1) 生烃基础

泥页岩中有机质的丰度、类型以及演化成熟度是泥页岩生油能力的主要影响因素.例如生油能力较好的Ⅰ或Ⅱ型干酪根是良好的有机质类型,而Ⅲ型干酪根则以生气为主.

从表 1<sup>[4]</sup>可以看出,泥页岩的生油能力随着 TOC(原始有机碳含量)和生烃转化率的增长而呈上升态势.

表 1 不同丰度、类型和成熟度有机质理论生烃量

Table 1 Theoretical hydrocarbon-generation quantity of organic matters

TOC/%	生烃潜力/ $10^{-3}$ (质量分数)	生烃转化率/%	生油/%
1	300	30	0.05
1	300	60	0.09
1	500	30	0.13
1	500	60	0.25
2	300	30	0.09
2	300	60	0.18
2	500	30	0.25
2	500	60	0.50

一般情况下认为,石油在页岩储层中的赋存状态主要是吸附态和游离态两种形式.当 TOC 较低时,页岩中生成的油气量较少,大部分以吸附态吸附在自身有机质和矿物上,可能有极少量游离态或溶解态.只有当 TOC 值增长到一定数值时,生成的油气才能够以游离状态为主填充到泥页岩基质孔隙与裂缝中,最后运移排出至常规储层.由此可见,要生成良好的页岩油资源,对于有机质类型、丰度和成熟度都有很严格的要求.

#### (2) 演化条件

页岩油主要形成在有机质演化的液态烃生成阶段,可以分为热解和热裂解两种反应条件,前者为有机质热解成熟油,而后者是由于干酪根或高分子烃在高成熟阶段裂解形成,为低分子高成熟油(含凝析油).在适当的埋藏深度下,达到生油门限,即可发生热化学反

应产生大量液态烃. 在不同演化阶段, 页岩内的孔隙结构、相对贡献以及控制因素也有可能不同<sup>[4-5]</sup>.

### (3) 储集条件

页岩油属于滞留聚集成因, 生成的原油未经排出或排出后残留在泥页岩中, 以纳米—微米级孔隙和裂缝为主, 是典型的“自生自储”储集模式.

页岩油通常为自身泥页岩中有机质热演化所生成的石油, 由于其致密性, 几乎不含有外来的油气. 有机质演化过程中, 由于油气生成、成岩演化、构造变动等多种因素的影响, 泥页岩中的孔隙和裂缝构造也会发生改变. 油气除了残留聚集于有机质孔隙以外, 也很容易进入微小的构造孔隙与裂缝, 这是泥页岩普遍含油性的原因. 页岩中脆性矿物含量越高, 黏土矿物含量越低, 岩石脆性越强, 页岩的孔隙度越高, 在外力作用下越易形成天然裂缝和诱导裂缝, 利于页岩油的储存和开采. 如表 2 可见, 黏土矿物含量小于 40%, 脆性矿物含量大于 50% 为优质泥页岩储层<sup>[6]</sup>.

### (4) 保存环境

除去良好的生烃基础、适当的演化以及储集条件, 页岩油藏的形成也需要良好的保存环境.

泥页岩形成于水动力较弱、沉积环境相对稳定的区域, 常见于深水—半深水相带. 由于深水区的缺氧环境和弱水动力, 有机质得以大量沉积并保存形成良好的泥页岩. 缺氧环境的形成主要有以下几种原因: ①相对海平面上升, 导致深水区形成缺氧环境, 有机质得以保存并演化; ②水体很浅的滞水区内生物分解大量耗氧, 导致水体呈还原环境; ③在温度、盐度等差异作用下, 汇水盆地上下水体循环受阻, 氧气无法流通导致底部滞水区缺氧<sup>[1]</sup>.

要生成有勘探价值的页岩油, 必须具有一定规模的有效生烃泥页岩、弱水动力条件以及相对长时间的稳定的构造活动, 使得有机质及沉积物能够缓慢沉降并演化. 随着富含有机质页岩沉积厚度的增大, 页岩

油藏的富集程度也会随之增大, 更有利于形成富含页岩油的“甜点”区, 并具有开采的经济价值<sup>[7]</sup>. 如表 2 所示, 当页岩厚度大于 40 m, 有机质厚度大于 15 m 时可认为是优质泥页岩储层.

### 1.2.2 有机质的演化

有机质的演化与油气形成可按岩石演化大致分为 3 个阶段(如图 1).

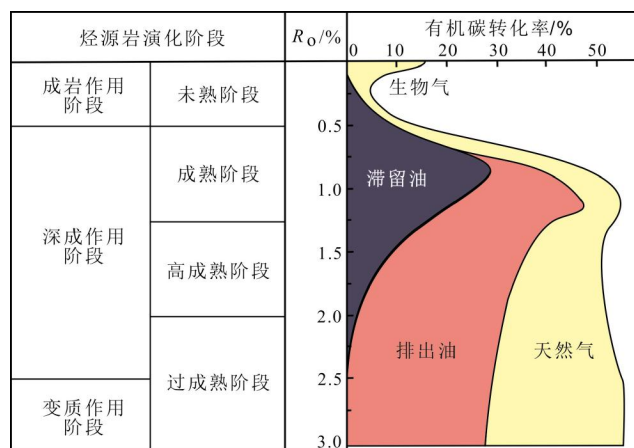


图 1 泥页岩生排烃演化模式

Fig. 1 Evolution model of hydrocarbon generation and expulsion in argillite

1) 未成熟阶段: 发生在岩石成岩阶段, 埋深较浅, 尚未达到生油门限, 镜质体反射率( $R_o$ )小于 0.5%. 以破坏有机与无机聚集物之间的物理—化学吸附力为主, 生成少量的可溶沥青, 一定量二氧化碳、甲烷等生物气, 主要以物理吸附的方式赋存于富有机质聚集体中, 伴随少量流动性差的游离油气.

2) 成熟阶段: 可进一步分为成熟早期、成熟中期及成熟晚期. 在成熟早期, 镜质体反射率在 0.5%~0.7%, 热降解能力逐渐加强, 生成的油气量逐渐增多. 此时的油气开始向游离态转化, 当油气量达到饱和时开始向外排出至邻近储集层. 当达到成熟中期, 镜质体反射率在 0.7%~1.0% 之间, 是烃源岩大量生烃的主要阶

表 2 页岩油储层评价参数及标准

Table 2 Evaluation parameters and criteria for shale oil reservoir

储层分类	TOC/%	Ro/%	页岩厚度/m	有机质厚度/m	孔隙度/%	脆性矿物/%	黏土矿物/%	杨氏模量/GPa	泊松比
I 类(目标储层)	>4	0.7~1.1	>40	>15	>6	>50	<40	>20	<0.25
II 类(有利储层)	2~4	≥0.5	≥30	≥10	≥4	≥40	≤50	≥18	≤0.20
III 类(无效储层)	<2	<0.5	<30	<10	<4	<40	>50	<18	>0.20

段, 富有机质聚集体中以游离态存在的油气开始初次运移大量排出泥页岩层, 少数烃类滞留在泥岩层中. 当埋深增加, 热降解强度增强, 有机质进入成熟晚期. 此时镜质体反射率在 1.0%~1.3%, 先前生成的未排出的大分子烃类以及其他残余的有机质生成分子量更小的烃类物质, 或者其他不溶的有机质. 相比于成熟中期排出与滞留的轻质烃与天然气增多, 流动性增强<sup>[8]</sup>.

3) 过成熟阶段: 埋深达到 6000~7000 m 时, 有机质进入深部高温生气阶段, 也就是过成熟阶段, 镜质体反射率大于 2.0%. 此阶段高温高压的特征导致滞留的液态烃和重质气态烃裂解, 干酪根进一步缩聚, 最终生成稳定的甲烷气体、碳沥青以及石墨.

### 1.3 页岩油的分类

根据岩性和裂缝的特征, 可将页岩油分为三类: 1) 致密型页岩油. 形成于致密泥页岩层系中, 包括致密碳酸盐岩或碎屑岩的邻层和夹层<sup>[9]</sup>; 2) 混合型页岩油, 为多组富有机质层相邻且连续形成的混合层系系统所产出的页岩油, 称为混合型页岩油; 3) 裂缝型页岩油, 富集于泥页岩层系的裂缝及微裂缝中. 其中混合型页岩油的勘探潜力最大, 裂缝型页岩油目前开采程度最高<sup>[10]</sup>.

根据其物理化学性质及开采难易程度, 可将页岩油分为两类: 粘稠型和凝析型.

根据页岩油的储集空间、勘探开发状况及开发经济效益, 可将页岩油分为三类: 1) 基质含油型; 2) 夹层富集型; 3) 裂缝富集型.

根据赋存状态可将页岩油分为三类: 1) 游离态; 2) 吸附态, 主要存在于有机质孔、絮凝晶间孔、黄铁矿晶间孔中, 附着于有机-黏土复合物和金属-有机复合物上, 以目前技术条件还难以开采<sup>[11]</sup>; 3) 溶解态, 以溶解状态赋存在孔喉流体中.

## 2 页岩油微观演化及评价

### 2.1 页岩油演化机理

大量实验者通过对油页岩的红外光谱分析发现, 油页岩中干酪根类型主要以Ⅲ型干酪根为主, 有机母质为脂肪烃, 伴随少量芳香烃及含氧基团, 而脂肪烃含量越高, 芳香烃的含量越少, 热解时产油率也越高. 笔者通过阅读文献了解到, 油气生成来源——干酪根, 是一种不溶于非氧化性酸、碱及其他有机质的复杂大分

子化合物, 普遍分散在沉积有机质中, 且结构稳定<sup>[12]</sup>.

在沉积盆地中, 油气生成过程大体可以分为两个阶段: 首先, 当地温和地压达到一定数值, 在干酪根核上, 连接芳核和脂肪族链状结构的共价键开始按照键能强度顺序逐步发生断裂, 越是大分子长链烃共价键的键能强度越低, 越容易在高温高压下从中部断裂, 形成少部分烯烃、小分子气和相对稳定的中间体——热解沥青; 其次, 随着温度和压力进一步升高, 有机质及沥青继续发生裂解, 形成最终产物——页岩油、气态烃以及残渣.

可以看出, 油气生成的过程即是干酪根热解过程, 链烃类在热解过程中发生断链、加成、脱氢、加氢等一系列反应, 接下来再发生氢化或烷基化反应进而生成稳定的饱和烃类, 或者环化脱氢<sup>[13]</sup>.

时间也是有机质演化生烃的主要控制因素, 且与温度具有一定的互补作用, 即长时间低温和短时间高温可产生相似的效果. 但以上所有理论并不能适用于一切反应, 要结合具体的反应物性质、活化能的分布、地质环境等条件的影响.

### 2.2 页岩油的储层评价

页岩油自生自储的成藏特点, 使得它对储层的评价要求很高, 主要以埋深、储层厚度、有机质丰度、有机质成熟度等作为储层评价要素.

#### (1) 埋藏深度

埋藏深度是页岩油形成的先决条件. 埋深直接影响到的就是地层压力和地温, 这两者是有机质反应成油的外部前提. 随着深度的增加, 地层压力增大, 压实作用增强, 储层的孔隙度和渗透率都降低. 温度升高, 促使有机质发生热解反应, 但是深度过深也会导致有机质热变质. 普遍认为, 埋藏深度在 1500~4000 m 是有利深度段, 有机质达到“生油窗”阶段, 油气大量生成, 孔隙发育良好, 有利于油气开采<sup>[14-15]</sup>.

#### (2) 储层厚度

达到一定厚度的储层具有很高的产油能力, 国内页岩油勘探定义具有商业开发价值的页岩层系厚度下限为 40 m, 其中有机质页岩有效厚度不小于 15 m. 我们普遍认为, 厚度大的页岩底部及顶部含硅质较高, 中部、中下部则物性相对较好, 而富含有机质页岩的厚度越大, 页岩油的富集程度也越高, 可以说储层的厚度决定了含油量和经济效益.

### (3)有机质丰度

首先,要形成具有商业价值的页岩油气流,勘探区域必须富含有机质,通过对大部分页岩油井的试油发现,可见产量的井段 TOC 都大于 2%,当 TOC 达到 4% 以上时,产量更大. 所以将具备勘探开采价值的油页岩的 TOC 界限定位于 2%~4%, 小于此值定义为无效储层,介于其间定义为低丰度储层,大于此值定义为高丰度储层. 但是不同地区的有机质类型和成熟门限有所差别,所以依靠总有机碳含量(TOC)来划分储层只能作为一个参考,要结合具体地域进行分析评价<sup>[16]</sup>.

其次,有机质在演化过程发生的化学反应和生成物都会在一定程度上影响储层物性.

### (4)有机质成熟度

对于不同类型的有机质,成熟的界限不同,Ⅲ型干酪根生气为主,Ⅰ、Ⅱ型干酪根在未熟、低熟阶段产生的液态烃分子量大,流动性差,不易开采,在高熟阶段则容易裂解变质,所以只有处于生油窗中后期以及生凝析油阶段才是有利成熟阶段,具有勘探潜力.

应当注意的是,对页岩油的评价,储层类型是最基本的要素,而以上各种流体参数是指示页岩油是否具有勘探与开发的潜力. 一般的原则是,应优先选择裂缝型或夹层型页岩储层,对于非裂缝型纯页岩储层,应以高成熟度的凝析型页岩油为主<sup>[17]</sup>.

## 3 中国页岩油分布情况及展望

### 3.1 中国页岩油的分布

富有机质页岩在层序内的纵向分布较为复杂,分布不受构造控制,无明显圈闭界限,含油范围受生油窗及富有机质页岩分布控制,大面积连续分布于盆地拗陷或斜坡区<sup>[18-19]</sup>(如表 3).

陆上优质泥页岩由于分布范围广、类型多、时代跨度大、陆相湖盆面积小、物源丰富且湖平面变化等原因,有利于页岩油气形成. 例如中国陆上松辽、鄂尔多斯、渤海湾等大型油田都以富有机质黑色泥页岩为主

力烃源岩. 由此可见,页岩油在此地的产量也是十分可观的,据统计,全国油页岩资源为  $7\ 199.37 \times 10^8$  t, 如果将油页岩折算成页岩油,全国页岩油资源为  $476.44 \times 10^8$  t. 除形成常规油和致密油,以及破坏散失的部分外,绝大部分滞留在生油岩内,可作为页岩油开发.

以渤海湾盆地为例,盆地面积  $19.5 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,为中生代发育的断陷湖盆,是典型的深湖-半深湖-三角洲相沉积,是我国主要的产油盆地之一,盆地的凹陷中心区以及临近凹陷中心的斜坡区都是页岩油气聚集的有利场所<sup>[20]</sup>. 渤海湾盆地在东营末期经历抬升运动,但遭受破坏强度较弱,泥岩沉积厚度大,封闭条件好,加之盐岩发育良好,超压带分布多样,容易形成泥岩裂缝油气藏,页岩油得以成藏和保存. 始新世发生 3 次较大规模的湖面上升,形成了最大湖泛期的孔二段、沙四段上部以及沙三段. 沙三段在沉积过程中水域面积最大,所以烃源岩厚度大,分布范围广,是最好的生油层系.

页岩中有机质生成的石油大部分滞留于泥页岩中形成页岩油,可占总生油量的 20%~50%.

### 3.2 中国页岩油的开发现状

美国页岩油主要分布于构造相对稳定的前陆或克拉通海盆中,分布广,埋藏浅,有机质丰度高,热演化适中,处于成熟-高成熟阶段,页岩油密度与黏度均较小,流动性好,可压裂性、保存条件和地面开采条件均较好. 对比而言,我国页岩油气的研究面临诸多问题. 从沉积环境和成储机理上看,我国湖相各盆地构造比较复杂,基本上为陆相半深湖-深湖相沉积,主要形成于中生代和古近纪,岩性以纯泥页岩、云灰质泥岩为主. 有机质成熟度普遍偏低,主体在 0.5%~1.0%之间,只有在部分盆地的深处才能达到 1.2%~1.5%. 孔隙度和渗透率偏低,岩层脆性指数高,黏度低,压力系数大于等于正常压力. 由此可见,我国陆相页岩油储层物性差,成熟度低,勘探潜力远不及北美等地区,所以要结合我

表 3 页岩油地质特征

Table 3 Geological features of shale oil

聚集特征			分布位置		
边界特征	油气水关系	油气水、压力系统	平面位置	纵向分布	深度
无明显圈闭界限	不含水或含少量水	无统一油气水界面,无统一压力系统	盆地斜坡和拗陷中心区	烃源岩内部	中深层为主

国复杂的泥页岩湖相盆地的复杂构造进行研究<sup>[21]</sup>。

页岩油的有效勘探开发的决定要素在于其可流动性,很明显,游离状态的油气流动性更好。但是要研究页岩油的流动性及其表征,我们首先要了解其在页岩中的赋存机理和状态。按照我们现在对页岩油气的了解,已经不能再使用常规油气的成储理论和评价方法,必须要寻求理论上的突破和技术上的进步<sup>[22]</sup>。

#### 4 结论

我国湖相泥页岩通常大面积连续分布于盆地拗陷或斜坡区,无明显圈闭,而且由于物源类型丰富、陆上构造复杂等原因纵向结构分布复杂。通过对国内页岩油资源储量及勘探结果对比得知,我国页岩油资源勘探潜力十分巨大。

根据页岩油自生自储的成藏特点,我们定义了埋深、储层厚度、有机质丰度、有机质成熟度等参数来评价储层,寻找有利勘探区域。与美国页岩油产层构造稳定相比,我国的页岩油成熟度偏低,因此必须采用适合于我国页岩油的技术开发手段。

页岩油属于滞留聚集成因,生成的原油未经排出或排出后残留在泥页岩中,以纳米—微米级孔隙和裂缝为主,是典型的自生自储集模式。页岩油的形成,对于有机质丰度、类型以及成熟度的要求都比较高。

泥页岩形成于水动力较弱、沉积环境相对稳定的区域,常见于深水—半深水相带。由于深水区的缺氧环境和弱水动力,有机质得以大量沉积并保存形成良好的泥页岩。

油气生成的过程即是干酪根热解过程,链烃类在热解过程中发生断链、加成、脱氢、加氢等一系列反应,接下来再发生氢化或烷基化反应进而生成稳定的饱和烃类,或者环化脱氢。

#### 参考文献:

[1] 邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J].石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.

[2] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩油分类与评价[J].地学前缘,2012,19(5):322-331.

[3] 周庆凡,杨国丰.致密油与页岩油的概念与应用[J].石油与天然气地质,2012,33(4):541-544.

[4] 李吉君,史颖琳,章新文,等.页岩油富集可采主控因素分析:以泌阳凹陷为例[J].地球科学,2014,39(7):848-857.

[5] 张廷山,彭志,杨巍,等.美国页岩油研究对我国的启示[J].岩性油气藏,2015,27(3):1-10.

[6] 陆益祥.页岩油地址要素及甜点预测[D].武汉:长江大学,2017.

[7] 姜在兴,张文昭,梁超,等.页岩油储层基本特征及评价要素[J].石油学报,2014,35(1):184-196.

[8] 徐旭辉,郑伦举,马中良.泥页岩中有机质的赋存形态与油气形成[J].石油实验地质,2016,38(4):423-428.

[9] 宋国奇,张林峰,卢双舫,等.页岩油资源评价技术方法及其应用[J].地学前缘,2013,20(4):221-228.

[10] 王民,石蕾,王文广,等.中美页岩油、致密油发育的地球化学特征对比[J].岩性油气藏,2014,26(3):67-73.

[11] 陈小慧.页岩油赋存状态与资源量评价方法研究进展[J].科学与技术,2017,17(3):136-144.

[12] 王茂林,程鹏,田辉,等.页岩油储层评价指标体系[J].地球化学,2017,46(2):178-190.

[13] 罗万江.页岩油热解过程及产物析出特性实验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.

[14] 李梦雅.页岩油热解中间体的生成及反应特性[D].北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2017.

[15] 田春桃,马素萍,杨燕,等.湖相与海相碳酸盐岩烃源岩生烃条件对比[J].石油与天然气地质,2014,35(3):336-341.

[16] 曹怀仁.松辽盆地烃源岩形成环境与页岩油地质评价研究[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所,2017.

[17] 赵喆,钟宁宁,黄志龙,等.碳酸盐岩烃源岩生烃增压规律及其含义[J].石油与天然气地质,2005,26(3):344-348.

[18] 付茜.中国页岩油勘探开发现状、挑战及前景[J].石油钻采工艺,2015,37(4):58-62.

[19] 邹才能,朱如凯,白斌,等.致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(1):3-17.

[20] 刘招君,董清水,叶松青,等.中国页岩油资源现状[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(6):869-876.

[21] 罗承先,周韦慧.美国页岩油开发现状及其巨大影响[J].中外能源,2013,18(3):33-40.

[22] 卢双舫,薛海涛,王民,等.页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J].石油学报,2016,37(10):1309-1322.