

文章编号:0253-9985(1999)04-0349-05

# 鄂尔多斯下古生界碳酸盐烃源岩评价与成烃特征

李延钧<sup>1</sup>,陈义才<sup>1</sup>,杨远聪<sup>1</sup>,吕强<sup>2</sup>,张军<sup>2</sup>,石晓英<sup>2</sup>

(1. 西南石油学院,四川南充 637001; 2. 长庆石油勘探局,陕西西安 710021)

**摘要:**在岩性、热解参数等原生性识别和碳酸盐烃源岩评价的基础上,经统计有机质丰度、类型、性质,确定有机质成熟度与演化阶段,进行综合评价与对比后,对研究区烃源岩的生烃能力作出了综合评价,认为原始生烃母质属Ⅰ—Ⅱ<sub>1</sub>型,具有中等生烃强度的烃源岩特点,属较好烃源岩范畴,研究认为,鄂尔多斯下古生界碳酸盐烃源岩具有三段式四阶段的生烃演化特征,即以 $R_o=0.65\%、1.50\%、2.25\%$ 划分为低成熟、成熟、高成熟三段式和热裂解气生成的第四阶段。第四阶段主要处于过成熟阶段,以残余干酪根的热裂解以生成高温甲烷干气为特征,马家沟组中下部和寒武系正处于这一成烃演化阶段。

**关键词:**海相;碳酸盐岩;烃源岩评价;有机质丰度;下古生界;鄂尔多斯

**第一作者简介:**李延钧,男,33岁,讲师,油气应用地球化学

**中图分类号:**P618.130.2<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A

鄂尔多斯盆地奥陶系和寒武系发育的海相碳酸盐岩,以下奥陶统马家沟组(共分六段)最为发育,残余有机质丰度较低,有机碳含量多 $<0.25\%$ ,热演化程度高,目前以生干气为主。长庆气田产气层主要分布在奥陶系顶部风化壳马五、马六段内,其主要气源来自奥陶系碳酸盐烃源岩,也有认为与上覆石炭—二叠煤系烃源岩有关。因此,准确客观的评价下古生界碳酸盐岩的生烃能力,并研究其成烃特征,对碳酸盐岩成烃理论和实际油气勘探都是十分必要的。

## 1 碳酸盐烃源岩的评价

### 1.1 原生性识别

烃源岩原生性包括两方面的含义:一是烃源岩有机质的原生性识别,确定有效烃源层;二是原始地化分析数据的原生性识别,以便选取真正代表有效烃源岩地化特征的参数。

鄂尔多斯盆地下古生界低丰度碳酸盐烃源岩,有机质原生性的识别十分重要。由于演化程度高,油气经历了长期的演化过程,风化溶蚀、溶孔带(如风化壳)及岩石裂隙的普遍存在;沉积的碳酸盐岩层厚度大,重质沥青或油不易排出;高、过熟天然气沿膨胀裂隙向上运移过程中,携入大量外来沥青

(运移沥青)并滞留于途中。因此,稍有污染会给丰度、类型、成熟度等参数带来较大的偏差,从而使生烃能力评价的可靠性降低。为此,我们采用岩性与热解参数相结合的方法进行烃源岩及其有机质原生性的识别。

#### 1.1.1 岩性识别

低能环境的碳酸盐烃源岩,岩性细腻致密,泥质含量高,颜色相对较暗,有机质相对富集,以泥晶、微晶等细粒碳酸盐岩或含泥、泥质碳酸盐岩(包括泥灰岩)为主。有机质多呈星点状均匀分布于碳酸盐岩颗粒间基质中,其中的泥质部分吸附有机质能力相对较强,因此泥质含量高的碳酸盐岩有机质丰度也高。高能环境不利于有机质的富集,岩石颗粒粗,孔隙发育,泥质含量低,较为纯净,颜色相对较浅,多以粗粒碳酸盐岩为主,如粗晶、鲕状、角砾状等碳酸盐岩,这一类碳酸盐岩可作为储层,为非烃源岩,对其地化分析数据应剔除。此外,存在裂缝或裂隙的碳酸盐岩即使属于烃源岩,但其地化分析数据不具原生性,也应剔除掉。

#### 1.1.2 热解参数识别

按照热解原理,残余有机碳含量与热解烃成正相关关系,而大量碳酸盐岩热解分析数据却出现异常情况,即使有机碳质量分数达 $0.5\%$ 以上,热解烃量 $S_2$ 仍十分低,岩石中烃均不大于 $0.10\text{ mg/g}$ ,大多数分布在 $0.05\text{ mg/g}$ 以下。而在这些异常点附近所取的数据却随有机碳含量的增大,热解烃量

\* 九五国家重点科技攻关二级专题(96-110-04-04-02)

收稿日期:1999-08-09

S<sub>2</sub> 也相应增加(图 1)。这些异常点我们认为 是外来沥青充填或固化(碳化)沥青残留,导致有机碳含 量偏高,为非原生烃源岩的典型特征。实际上,它 们的岩性多属粗颗粒岩石,包括鲕状、角砾状碳酸 盐岩。表明从原始热解数据上可以直接判断碳酸 盐烃源岩有机质的原生性,从而可以有选择的取舍 地化分析数据。

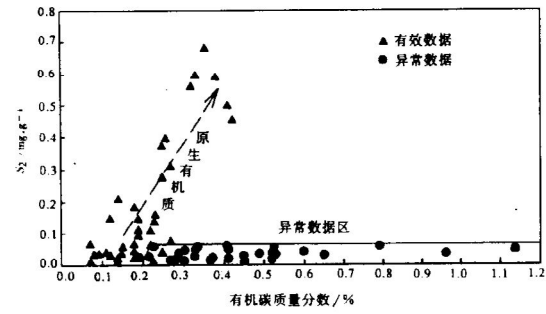


图 1 岩石热解烃 S<sub>2</sub> 与有机碳含量关系图  
Fig.1 Relations between pyrolytic hydrocarbon S<sub>2</sub> and organic carbon contents

1.2 评价标准

到目前为止,碳酸盐烃源岩丰度评价仍没有一 个统一的标准,最主要的原因是对碳酸盐烃源岩有 机质丰度下限认识不同。各家提出的有机质丰度 下限差别十分大,最小的 0.05%,最大的可达 0.40%,究其原因,我们认为各自针对的对象不 同:一是没有区分油源岩和气源岩;二是有机质演 化程度不同,高演化碳酸盐岩有机质丰度显然应低 于演化程度低的碳酸盐岩;此外,有机质类型不同 丰度下限也不同。

就这一现实情况,我们综合利用热模拟实验 法、生烃潜力算法、罐装岩屑-酸解法、全烃地 化法及残余气饱和度法确定出碳酸盐岩在成熟阶 段、高成熟阶段、过成熟阶段的有机质丰度下限分 别为 0.20%、0.10%和 0.06%,并依次确定了相应 的有机质丰度评价标准\*(表 1)。生烃潜量也是 烃源岩评价的重要指标,程克明等<sup>[1]</sup>对高-过成熟阶 段碳酸盐烃源岩残余生烃潜量和原始生烃潜量进 行了系统的研究,据此确定出相应的生烃能力评 价标准(表 2)。氯仿沥青“A”含量等也是烃源岩评 价常用指标,但由于碳酸盐岩有机质赋存形态的多样 性,特别是演化程度高的碳酸盐岩运移沥青的普遍

存在,往往数据变化幅度大,不宜作为低丰度碳酸 盐烃源岩评价指标。

表 1 鄂尔多斯盆地古生界碳酸盐烃源岩 有机碳丰度评价标准

Table 1 Evaluation criteria of organic carbon abundance from Lower Paleozoic carbonate source rocks in Ordos Basin

| 级 别            | 演 化 阶 段   |           |           |
|----------------|-----------|-----------|-----------|
|                | 成熟阶段      | 高成熟阶段     | 过成熟阶段     |
| 非生油岩有机碳质量分数/%  | <0.20     | <0.10     | <0.06     |
| 差生油岩有机碳质量分数/%  | 0.20~0.40 | 0.10~0.20 | 0.06~0.12 |
| 较好生油岩有机碳质量分数/% | 0.40~0.60 | 0.20~0.35 | 0.12~0.25 |
| 好生油岩有机碳质量分数/%  | 0.60~0.80 | 0.35~0.45 | 0.25~0.35 |
| 极好生油岩有机碳质量分数/% | >0.80     | >0.45     | >0.35     |

表 2 不同成熟阶段烃源岩生烃能力评价标准  
Table 2 Evaluation criteria of hydrocarbons generation ability from carbonate source rocks in different maturation stages

| 级 别    | 碳酸盐岩生烃潜量/mg·g <sup>-1</sup> |            |           | 泥岩生烃潜量/mg·g <sup>-1</sup> |
|--------|-----------------------------|------------|-----------|---------------------------|
|        | 未-低成熟阶段                     | 成熟阶段       | 高-过成熟阶段   | 低成熟阶段                     |
| 极差     | <0.5                        | <0.125     | <0.05     | <0.5                      |
| 差      | 0.5~1.0                     | 0.125~0.25 | 0.05~0.10 | 0.5~2                     |
| 中等     | 1.0~2.0                     | 0.25~0.50  | 0.10~0.20 | 2~6                       |
| 强(好)   | 2.0~5.0                     | 0.50~1.0   | 0.20~0.50 | 6~20                      |
| 极强(极好) | >5.0                        | >1.0       | >0.50     | >20                       |

2 生烃能力综合评价

2.1 有机质丰度

在烃源岩有机质原生性识别基础上,分组分岩 性统计了鄂尔多斯盆地古生界碳酸盐岩有机质 丰度(表 3),各组烃源岩几乎都达到了较好的标 准,并具有中等生烃强度。其中下奥陶统马家沟组 灰岩和白云岩在平面上展布范围广,厚度稳定,分 别为 100~150 m 和 150~350 m,统计的样品数也 相对最多,评价结果可靠,为下古生界海相碳酸盐 岩相对最有效的烃源岩。平凉组泥灰岩和灰岩残 余有机碳含量相对较高,生烃潜力较大,演化程度 相对较低,厚度分别为 10~50 m 和 250~350 m,但 展布范围有限,主要呈“L”型分布于盆地西南缘。

泥质含量高的碳酸盐岩(如泥灰岩)有机质丰 度和生烃潜量相对高于纯净的碳酸盐岩,显然平凉 组符合这一规律,而马家沟组泥灰岩有机质丰度和 生烃潜量低于灰岩和白云岩,可能与其分布局限有 关。灰岩与白云岩对比表明,灰岩有机质丰度和生 烃潜量相对略高于白云岩,可能与白云岩形成过程 中有机质损失有关。

\* 陈义才,李延钧,杨远聪,等:鄂尔多斯盆地中央古隆起及 周缘地区下古生界低丰度碳酸盐烃源岩生排烃能力评价,1998

表3 鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐岩有机质丰度及评价结果

Table.3 Organic matter abundance and evaluation results of Lower Paleozoic carbonate source rocks in Ordos Basin

| 地 层  | 岩 性  | 有效厚度/m  | 有机碳质量<br>分数/% | 生烃潜量 $S_1 + S_2$<br>/mg·g <sup>-1</sup> | 丰度(生烃潜力)<br>评价结果 | 演化阶段   |
|------|------|---------|---------------|-----------------------------------------|------------------|--------|
| 平凉组  | 泥灰岩  | 10~50   | 0.405/18      | 0.393/10                                | 较好(中等潜力)         | 成熟-高成熟 |
|      | 灰岩   | 250~350 | 0.314/92      | 0.375/65                                | 较好(中等潜力)         |        |
| 马家沟组 | 泥灰岩  | 0~20    | 0.186/24      | 0.120/10                                | 差(中等潜力)          | 高-过成熟  |
|      | 灰岩   | 100~150 | 0.280/109     | 0.170/92                                | 较好(中等潜力)         |        |
|      | 白云岩  | 150~350 | 0.196/254     | 0.140/235                               | 较好(中等潜力)         |        |
| 寒武系  | 碳酸盐岩 | 100~400 | 0.168/110     | 0.110/60                                | 较好(中等潜力)         | 过成熟    |

2.2 有机质类型与性质

2.2.1 干酪根

根据镜下显微组分鉴定结果,下古生界碳酸盐烃源岩多数样品属于Ⅱ<sub>1</sub>型干酪根,其次为Ⅰ型干酪根,二者含量接近,Ⅱ<sub>2</sub>和Ⅲ型干酪根很少(图2),其中平凉组以Ⅱ<sub>1</sub>型干酪根为主,Ⅰ型干酪根次之,Ⅱ<sub>2</sub>型干酪根较少;马家沟组以Ⅰ型干酪根为主,Ⅱ<sub>1</sub>型干酪根次之,Ⅱ<sub>2</sub>型较少,Ⅲ型极少;寒武系以Ⅰ型干酪根为主,Ⅱ<sub>1</sub>型干酪根次之,Ⅱ<sub>1</sub>型干酪根较少。镜鉴结果出现Ⅲ型有机质与下古生界原始生态环境不符合,主要原因我们认为与奥陶系顶部风化壳的长期风化、溶蚀、暴露、氧化作用有关,同时演化程度高也使有机质性质变差,所以,干酪根元素组成不宜用于判断有机质类型。

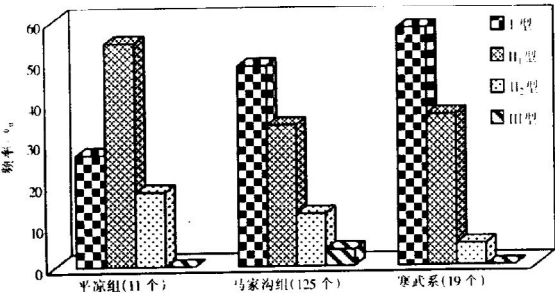


图2 干酪根镜鉴结果频率分布图

Fig.2 Frequency distribution of kerogen on microscopic examination

2.2.2 干酪根碳同位素

热模拟实验及自然演化研究表明,原始生烃母质在热演化的过程中,干酪根碳同位素组成仅发生微小的变化,因此它在高-过成熟碳酸盐烃源岩有机质的判断中十分有效。如图3所示的频率分布图,主峰位于-28‰~-30‰(PDB)之间,92.98%的样品分布在-26‰~-33‰(PDB)的范围内,7.02%的样品分布在-24‰~-26‰(PDB)之间,总体平均值为-28.98‰(PDB),干酪根类型主要为Ⅰ型,Ⅱ型十分少。说明原始生烃母质主要以水生浮游生物为主,为典型的海相有机质。

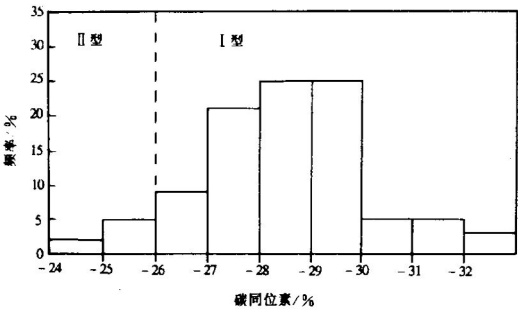


图3 干酪根碳同位素频率分布图

Fig.3 Frequency distribution of carbon isotopes in kerogen

2.3 有机质成熟度与演化阶段

由于下古生界海相碳酸盐岩中缺乏陆源镜质组,沥青反射率成为人们关注的焦点。Jacob<sup>[2]</sup>、丰国秀<sup>[3]</sup>、刘德汉<sup>[4]</sup>、郝石生等<sup>[5]</sup>认为,沥青反射率可以反映有机质的演化程度,但只有原生沥青才具有代表性,次生或运移沥青常常影响到烃源岩成熟度的评价。

我们采用 Jacob<sup>[2]</sup>提出的关系式  $R_o = 0.618 0R_{ob} + 0.4$  对沥青反射率( $R_{ob}$ )进行转换,并分区统计不同层位烃源岩镜质组反射率( $R_o$ )(表4)。同时按照碳酸盐岩演化阶段划分标准确定各烃源层的主要演化阶段。显然,除平凉组和马家沟组在盆地西缘逆冲带存在部分成熟阶段外,其余均进入高成熟,甚至过成熟的演化阶段。

表4 鄂尔多斯盆地地下古生界烃源岩成熟度与演化阶段

Table.4 Maturity and evolution stages of Lower Paleozoic carbonate source rocks in Ordos Basin

| 地 区   | 平 凉 组    |       | 马 家 沟 组  |       | 寒 武 系    |       |
|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
|       | $R_o$ /% | 演化阶段  | $R_o$ /% | 演化阶段  | $R_o$ /% | 演化阶段  |
| 西缘逆冲带 | 0.7~1.2  | 成熟    | 1.0~1.7  | 成-高成熟 | 1.5~1.9  | 高成熟   |
| 渭北隆起  | 1.8~2.4  | 高-过成熟 | 1.9~2.6  | 高-过成熟 | 2.2~3.0  | 过成熟   |
| 天环向斜  | —        | —     | 1.8~2.8  | 高-过成熟 | 2.0~3.0  | 高-过成熟 |
| 中央古隆起 | —        | —     | 2.0~2.5  | 高-过成熟 | 2.2~2.8  | 过成熟   |
| 伊蒙隆起  | —        | —     | 1.7~2.2  | 高成熟   | 1.8~2.4  | 高-过成熟 |
| 陕北斜坡  | —        | —     | 1.8~3.0  | 高-过成熟 | 2.0~3.4  | 高-过成熟 |

## 2.4 综合评价与对比

综合评价结果表明,鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐烃源岩有机质丰度虽然低,但多达到了较好的标准,并具有中等的生烃能力,原始有机质类型以偏腐泥型为主,热演化程度高,多达高-过成熟阶段。与国内其它碳酸盐岩分布区对比,该盆地地下古生界碳酸盐烃源岩的级别及生烃能力居于较前的位置。例如,塔里木盆地塔中4号油气田和四川盆地威远气田均与海相碳酸盐烃源岩有关,塔中地区较鄂尔多斯盆地热演化程度低,但统计的有机质丰度基本相当或略低一些,奥陶系灰岩平均有机碳仅为0.18%(33个样品)。四川盆地威远气区震旦系深灰色白云岩平均有机碳也仅为0.19%。其它地区,如华北冀中、辽河东部凸起及南方下古生界碳酸盐岩平均有机碳含量都低于0.15%。表明鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐烃源岩所谓的“低丰度”仅是相对于泥质岩类或演化程度低的碳酸盐岩,原始有机质丰度并不低,生烃能力也并不弱,可为长庆气田提供足够的气源。

## 3 成烃演化特征

碳酸盐烃源岩成烃演化特征与泥质岩类不同,近年来对其成烃机理的研究日益受到重视,认识也日趋一致,如傅家谟<sup>[6]</sup>、郝石生<sup>[5,7]</sup>、钟宁宁<sup>[8]</sup>和程克明等<sup>[1]</sup>都从不同的角度研究了海相碳酸盐烃源岩成烃演化特征,指出碳酸盐岩有机质具有差异演化和“三段式”生烃的特点,表现在成烃演化较其他岩类具有迟滞效应和不同赋存形式有机质之间演化的差异。

目前碳酸盐岩的“三段式”成烃已为多数学者所接受,即原始沥青解聚原生烃的形成、干酪根降解成烃和包裹有机质释放成烃,它们分别主要出现于未-低成熟阶段、成熟阶段和高成熟阶段。而天然气形成于两个方面,一是进入高成熟阶段后干酪根热裂解;二是已形成的各类液态烃在高温下的裂解。我们总体称之为“热裂解气阶段”。这里应注意的是:所谓的“三段式”主要系指源岩不同赋存形式有机质成烃的3种方式,同时兼有“阶段”的含义,而事实上它没有囊括烃类的整个演化过程,如热裂解气的形成阶段。因此,碳酸盐岩有机质的演化过程可分为4个阶段,即除“三段式”成烃所处的3个阶段外,还有热裂解气生成的第四阶段,处于高-过成熟阶段。因此,我们称碳酸盐岩有机质演

化具有“三段式四阶段”的成烃特征。

鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐烃源岩的成烃演化以  $R_o = 0.65\%$ 、 $1.50\%$ 、 $2.25\%$  划分为3种成烃方式——“三段式”成烃带和热裂解气阶段,一共4个成烃阶段(图4)。

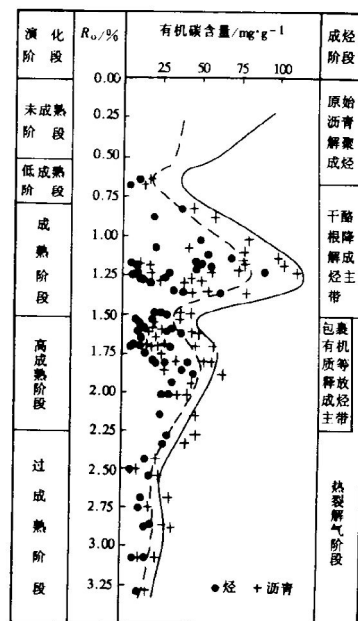


图4 鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐烃源岩成烃演化图

Fig. 4 Evolution model of hydrocarbon generation from Lower Paleozoic carbonate source rocks in Ordos Basin

第一成烃阶段为碳酸盐岩的早期成岩作用阶段,相应  $R_o$  值为  $0.20\% \sim 0.65\%$ , 有机质处于未成熟-低成熟阶段。来源于海洋生物(主要为浮游藻类和浮游动物)的有机质,可能由于碳酸盐矿物对类脂物分子聚合作用的抑制,沉积-成岩早期形成的分子量和分子交联度较低的地质大分子,可以直接通过解聚的方式形成解聚沥青(未成熟石油)。该阶段在鄂尔多斯盆地无自然演化的实际样品。

第二成烃阶段为碳酸盐岩成岩作用晚期,  $R_o$  值约为  $0.65\% \sim 1.50\%$ 。碳酸盐烃源岩干酪根在热力作用下开始大量降解生烃,属正常的干酪根热降解生烃阶段。生烃主峰  $R_o$  约为  $1.20\%$ 。平凉组和马家沟组上部碳酸盐岩主要处于这一成烃阶段。

第三成烃阶段从  $R_o = 1.5\%$  开始至大约  $R_o = 2.25\%$  止,属岩石的深成岩阶段和变生作用初期,相当于高成熟阶段。这一阶段干酪根的生烃潜力

大部分已经耗尽,主要由包裹有机质和部分束缚有机质继续提供烃类来源,导致碳酸盐岩在高成熟阶段仍能出现次要液态烃生成高峰,同时在干酪根和已生液态烃的热裂解作用下气态烃也大量形成。平凉组和马家沟组上部碳酸盐岩多处于这一阶段,但可能由于包裹等有机质含量低而多呈气态烃产出。

第四成烃阶段为热裂解气阶段,主要处于过成熟阶段,但在高成熟阶段也存在液态烃和干酪根的热裂解作用而形成湿气。过成熟阶段主要为残余干酪根的热裂解以生成高温甲烷干气为特征。马家沟组中下部和寒武系处于这一成烃演化阶段。

#### 4 结论

(1)碳酸盐岩有机质原生性的识别是烃源岩评价和研究工作的基础,它直接确定着生烃能力评价结果的可靠性。我们提出的岩性与热解参数的识别方法简便易行,在实际应用中取得了良好的效果。

(2)鄂尔多斯盆地地下古生界碳酸盐烃源岩有机质丰度低,演化程度高,多处于高-过成熟阶段,原始生烃母质属 I—II<sub>1</sub> 型。按照高演化碳酸盐烃源岩评价标准多数层段属较好烃源岩范畴,并且具中等生烃强度的烃源岩特点,与国内下古生界碳酸盐岩相比有机质丰度和生烃能力居于前列。

(3)该盆地地下古生界低丰度碳酸盐烃源岩具有“三段式四阶段”的成烃特征,即原始沥青解聚原生烃的形成、干酪根降解成烃和包裹有机质释放成烃及热裂解气生成阶段。

(4)鄂尔多斯盆地除长庆气田外,应积极探索下古生界内幕和中西部广大地区碳酸盐岩成因的油气聚集。

#### 参 考 文 献

- 1 程克明,王兆云,钟宁宁,等.碳酸盐油气生成理论与实践[M].北京:石油工业出版社,1996.29~90
- 2 Jacob H. Disperse solid bitumens as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas[J]. Erdol and Kohle, 1985, 38(3): 365
- 3 丰国秀,陈盛吉.岩石沥青的反射率与镜质体反射率的关系[J].天然气工业,1986,8(3):20~25
- 4 刘德汉.碳酸岩中沥青在研究油气生成演化和金属矿床成因中的应用[M].见:中国科学院地球化学研究所.有机地球化学论文集.北京:科学出版社,1996.133~138
- 5 郝石生,高岗,刚文哲,等.高过成熟海相碳酸盐岩[M].北京:石油工业出版社,1996.101~108
- 6 傅家谟,贾蓉芬,刘德汉,等.碳酸盐岩有机地球化学[M].北京:科学出版社,1989.193~195
- 7 郝石生,张有成,刚文哲.碳酸盐岩油气生成[M].北京:石油工业出版社,1993.82~89
- 8 钟宁宁,秦勇.碳酸盐岩有机岩石学[M].北京:科学出版社,1995.210~213

## SOURCE ROCK EVALUATION AND CHARACTERISTICS OF HYDROCARBON GENERATION FROM LOWER PALEOZOIC CARBONATE IN ORDOS BASIN

Li Yanjun<sup>1</sup> Chen Yicai<sup>1</sup> Yang Yuancong<sup>1</sup> Lü Qiang<sup>2</sup> Zhang Jun<sup>2</sup> Shi Xiaoying<sup>2</sup>

(1, Southwest Petroleum Institute, Nanchong, Sichuan; 2, Changqing Petroleum Exploration Bureau, Xi'an, Shaanxi)

**Abstract:** Based on primary lithology, thermolysis parameter of Lower Paleozoic carbonate source rocks in Ordos Basin, the abundance, types and nature of organic matter in the source rocks are used to determine the maturity and evolution stages of organic matter and estimate hydrocarbon generation ability of the study area. It is considered the kerogen was I—II<sub>1</sub> types with middle-intensity hydrocarbon generation. It is emphasized that hydrocarbon generation of Lower Paleozoic carbonate source rocks can be divided into three phases including four stages, that is, low-maturation phase with  $R_o = 0.65\%$ ; maturation phase with  $R_o = 1.50\%$  and high-maturation phase with  $R_o = 2.25\%$ , and the fourth stage of over-maturated pyrolysis gas stage. In this stage, residual kerogen was pyrolyzed and dry gas of high-temperature methane was generated. The source rocks of middle-lower parts of Majiagou Formation and the Cambrian System in the study area are of this stage.

**Key Words:** marine facies; carbonate rock; source rock evaluation; organic matter abundance; Lower Paleozoic; Ordos