

文章编号: 1001- 6112(2005)02- 0164- 05

# 油页岩在渤海湾盆地济阳坳陷 下第三系石油资源评价中的意义

罗佳强<sup>1,2</sup>, 沈忠民<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 北京华能国强科技发展有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 渤海湾盆地济阳坳陷下第三系沙四段上亚段( $E_3^{4上}$ )和沙三段( $E_3^3$ )均发育有大量的、含有葡萄藻属与颗石藻属等藻类富集层的油页岩, 它们生烃能力极强, 是烃类的重要贡献者; 侧向运移是油页岩中烃类初次运移的重要方式之一。页理的存在, 尤其是油页岩被断层切割时, 可能是烃类排出效率大幅度提高的主要原因。研究表明, 油页岩具有比暗色泥岩更强的生、排烃能力; 在暗色泥岩和油页岩都比较发育的含油气盆地中进行资源评价时, 二者不能对等处理, 应分开进行盆地模拟和油气资源评价。近年来, 在精细油、气-源岩对比的基础上, 发现济阳坳陷亿吨级大油田的形成都与沙四段上亚段和沙三段的油页岩有关。济阳坳陷下第三系石油资源评价单独对油页岩进行了盆地模拟和资源量的计算, 其石油资源量高达  $13.8 \times 10^8 t$ 。

**关键词:** 油页岩; 有机质富集层; 资源评价; 下第三系; 济阳坳陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

40 多年来, 随着石油地质科学、实验分析技术和油气勘探开发技术的发展, 随着基础科学向石油地质学的渗透和计算机技术的发展及其在石油地质领域的广泛应用, 在不断的油气勘探开发实践中, 对渤海湾盆地济阳坳陷石油资源的认识、评价和预测经过了一个由定性向定量方向发展的漫长过程。济阳坳陷先后进行过 3 次系统、全面的油气资源评价工作。第一次是 1981—1984 年以计算机盆地模拟为主进行的油气资源评价工作; 第二次是 1991—1994 年以“小洼陷”为模拟单元开展的精细油气资源评价; 第三次是 1999—2000 年以“聚油单元”为基本评价单元, 暗色泥岩和油页岩、石油与天然气分开的资源评价<sup>[1]</sup>。在第一次资源评价时, 虽未将油页岩作为生油岩, 但已认识到沙三段油页岩中像葡萄藻这种低等藻类有可能是贡献最大的油母物质, 并推测葡萄藻成熟早, 在成岩作用早期借助沉积岩的机械压实作用就可以把产出的烃类排挤出去; 在第二次资源评价中, 虽然也考虑了油页岩的生油作用, 但也仅限于将沙三段下亚段的油页岩作为生油岩来考虑; 随着研究的逐步深入和认识的进一步提高, 在第三次资源评价中对济阳坳陷大范围分布的油页岩的重要生烃贡献作用进行了重新认识, 通过精细油、气-源岩对比研究, 发现济阳坳陷亿吨级大油田(东

辛、坨庄、平方王、孤岛等)的形成都与沙三段下亚段的油页岩有关(图 1), 而牛庄洼陷南斜坡的低熟油来自沙四段上亚段油页岩。由于对油页岩能否作为

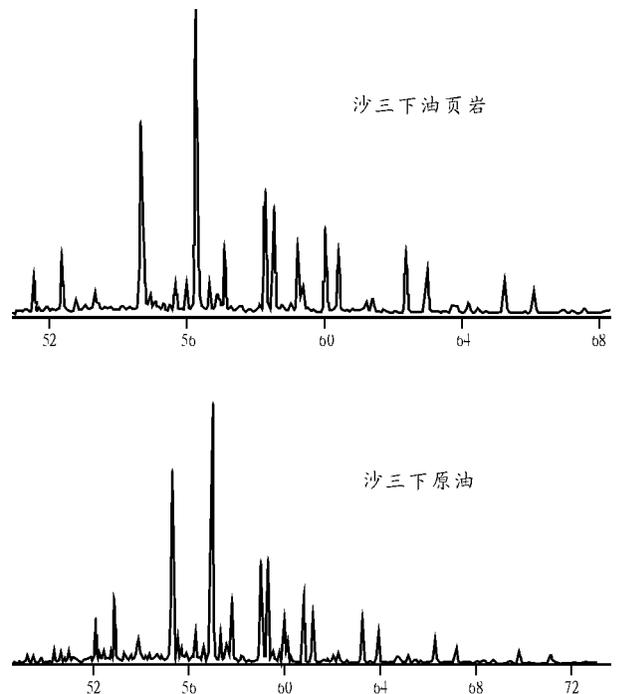


图 1 济阳坳陷油-源对比图

Fig. 1 Correlation map of oil and gas to source rocks in the Jiyang Depression

收稿日期: 2004- 09- 14; 修订日期: 2005- 02- 20。

作者简介: 罗佳强(1965—), 男(汉族), 湖南邵阳人, 高级工程师、博士生, 主要从事石油地质综合研究工作。

基础项目: 中国石化重点科技攻关项目(99- 01- 01)。

烃源岩认识的极大转变, 因此第三次资源评价对沙四段上亚段和沙三段的油页岩进行了全面系统的研究, 并单独进行了盆地模拟和石油资源量的计算。

### 1 油页岩特征

#### 1.1 区域地质背景

济阳拗陷为一典型的陆相断陷盆地, 石油地质条件非常复杂, 油气资源十分丰富<sup>[2]</sup>。它是在华北地台基础上发展起来的中、新生代断陷- 断拗- 拗陷盆地。自晚侏罗纪以来, 济阳拗陷经历了燕山运动和喜山运动, 发育了多个拉张型箕状断陷盆地, 形成了多凸多凹相间排裂的构造格局。济阳拗陷( 陆上) 共发育有 8 个凸起、3 个低凸起和 4 个凹陷, 凹陷普遍具有“北断南超、北厚南薄”的特征, 地层均为下第三系沙河街组的湖相沉积。油页岩主要发育于各凹陷的沙四段上亚段和沙三段下亚段<sup>[3]</sup>。

#### 1.2 沙四段上亚段油页岩

沙四段上亚段岩性以油页岩、暗色泥岩为主, 夹碳酸盐岩和砂岩。各凹陷岩性略有变化, 凹陷内不同部位亦有差别。油页岩中含有大量的不同属种的生物化石, 主要为德弗兰藻属(*Deflandrea*)、盘星藻属(*Pediastyum*)、古囊藻属(*Palaeostomacystis*)、渤海藻属(*Bohaidina*) 及副渤海藻属(*Parabohaidina*) 的德弗兰藻属组合、生烃能力极强的葡萄藻属(*Botryococcus braunii*) 和颗石藻属(*Coccolithophorida*)。需要特别指出的是, 沙四段上亚段上部的油页岩中普遍发育小古囊藻(*Palaeostomacystis mi-*

*nor*) 富集层。济阳拗陷沙四段上亚段的油页岩以型干酪根为主, 具有高有机碳(3%~ 13%)、低成熟度( $R_o = 0.32\% \sim 0.38\%$ )、高氯仿抽提物(0.59%~ 1.18%)、高氢指数(300~ 2 500 mg/g) 和高产油潜量(热解分析  $S_1 + S_2$  为 15~ 360 mg/g, 烃/岩石) 等特征, 主要分布于东营凹陷、沾化凹陷的渤南、四扣洼陷以及车镇凹陷的车西洼陷和惠民凹陷的临南、阳信洼陷, 最大厚度可达 40 m。有机岩石学研究认为, 沙四段上亚段的油页岩及其内的藻类富集层是形成低熟油的主力烃源岩。

#### 1.3 沙三段油页岩

沙三段油页岩主要集中在分布于沙三段下亚段, 以灰褐色油页岩夹深灰色泥岩为主, 微量元素  $Sr/Ba > 1.0$ , 古盐度在 8.0‰~ 12.0‰之间, 表明其形成环境为潮湿、微咸水的深湖、半深湖环境。油页岩中含有大量的不同属种的生物化石, 藻类以渤海藻属(*Bohaidina*) 和副渤海藻属(*Parabohaidina*) 为主, 局部受淡水影响的层段含有生烃能力极强的葡萄藻属(*Botryococcus braunii*) 和盘星藻属(*Pediastyum*) 等绿藻类, 未见生烃能力极强的颗石藻属(*Coccolithophorida*)。沙三段下亚段的油页岩中普遍发育有沟鞭藻富集层。沙三段下亚段油页岩具有有机质丰度高(最高可达 15%)、干酪根类型好(以型为主)、有机质成熟度高和高氯仿沥青“ A ”(最高可达 2.5%) 等特点。主要分布于东营凹陷、沾化凹陷的渤南、四扣、富林洼陷以及车镇凹陷和惠民凹陷的临南、阳信、滋镇洼陷, 最大厚度可达 120 m (图 2)。

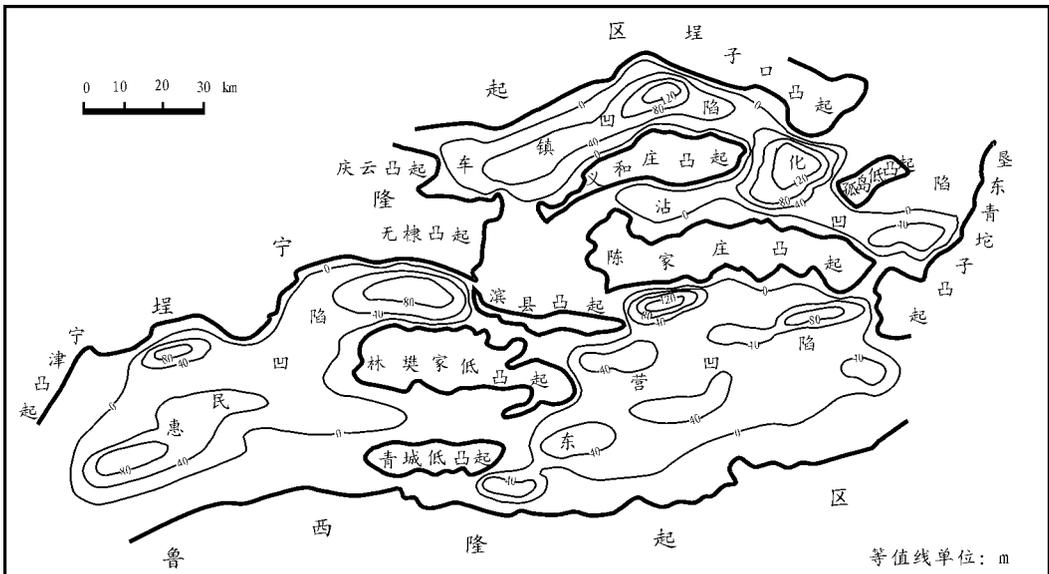


图 2 济阳拗陷沙三段油页岩厚度等值线图

Fig. 2 Isopleth chart of oil shale thickness of Es<sup>3</sup> in the Jiyang Depression

## 2 油页岩的资源量

### 2.1 生烃量

济阳拗陷沙四段上亚段和沙三段油页岩的生烃量是在输入油页岩厚度、有机碳含量、干酪根类型和烃产率曲线等相关参数后,由 SLBSS 2.0 软件系统直接模拟求得。模拟结果表明,济阳拗陷油页岩的总生烃量为  $107.6 \times 10^8$  t, 约占济阳拗陷下第三系有效烃源岩总生烃量的 1/6, 其中以东营凹陷最多, 为  $48.4 \times 10^8$  t, 沾化、车镇和惠民凹陷油页岩的生烃量分别为  $24.8 \times 10^8$  t、 $12.9 \times 10^8$  t 和  $21.4 \times 10^8$  t (表 1)。

### 2.2 排烃系数和排烃量

烃源岩的排烃受断层活动、沉积物压实作用、热力增压作用、渗透作用、蒙脱石向伊利石的转化等多种因素的影响。最近国内外的研究表明, 烃源岩的排烃系数( $k$ )可以很高, 最高可达 90.0% 以上<sup>[4-6]</sup>。求取排烃系数有多种方法, 其中较为先进的方法是采用泥岩压实平衡法原理, 通过数值模拟来求取排烃量, 并计算排烃系数。

参考国内外部分学者用不同方法研究得出的烃源岩排烃系数, 结合前人对济阳拗陷梁 28 井、利 14 井源岩排烃研究的结果<sup>[3]</sup>, 在具体的盆地数值模拟求取油页岩排烃量和排烃系数的过程中, 考虑了页理对排烃的有利影响。盆地数值模拟求取的济阳拗陷油页岩的排烃系数在 26.0%~28.7% 之间(表 1, 图 3)。

济阳拗陷及各凹陷油页岩排烃量的计算, 可由盆地数值模拟得到的生烃量和排烃系数经下式求取

表 1 济阳拗陷油页岩资源评价综合表  
Table 1 General list of oil shale resource evaluation for the Jiyang Depression

|      | 生烃量/     | 排烃系数, | 排烃量/     | 聚集系数, | 资源量/     |
|------|----------|-------|----------|-------|----------|
|      | $10^8$ t | %     | $10^8$ t | %     | $10^8$ t |
| 东营凹陷 | 48.4     | 26.0  | 12.6     | 47.9  | 6.0      |
| 沾化凹陷 | 24.8     | 28.7  | 7.1      | 51.9  | 3.7      |
| 车镇凹陷 | 12.9     | 26.3  | 3.4      | 40.2  | 1.4      |
| 惠民凹陷 | 21.4     | 27.7  | 5.9      | 39.1  | 2.3      |
| 济阳拗陷 | 107.6    | 27.0  | 29.1     | 47.3  | 13.8     |

$$Q_{\text{排}} = Q_{\text{生}} \times k \quad (1)$$

式中:  $Q_{\text{排}}$  ——排烃量,  $10^8$  t;

$Q_{\text{生}}$  ——生烃量,  $10^8$  t;

$k$  ——排烃系数, %。

盆地模拟结果表明, 济阳拗陷以沙四段上亚段和沙三段油页岩为源岩模拟求取的排烃量为  $29.1 \times 10^8$  t; 其中, 以东营凹陷油页岩的排烃量最多, 为  $12.6 \times 10^8$  t, 其余依次为沾化、惠民和车镇凹陷, 排烃量分别为  $7.1 \times 10^8$  t、 $5.9 \times 10^8$  t 和  $3.4 \times 10^8$  t(表 1)。

### 2.3 聚集系数

烃源岩排出的烃类可分为 2 部分, 即烃类在运移途中的散失量和最终形成油气藏的聚集量。王秉海等认为, 济阳拗陷烃类的散失量与聚集量较接近<sup>[3]</sup>; 查明等则认为, 运移通道(储集层)中残余的油量(散失量)取决于储集层的原始饱和度, 并指出运移通道上的残余油饱和度可达 10.0%~30.0%<sup>[7]</sup>; 盛志纬认为, 一般盆地和凹陷的聚集系数值均在 50.0% 以上, 聚集系数远大于排烃系数<sup>[8]</sup>。以上研

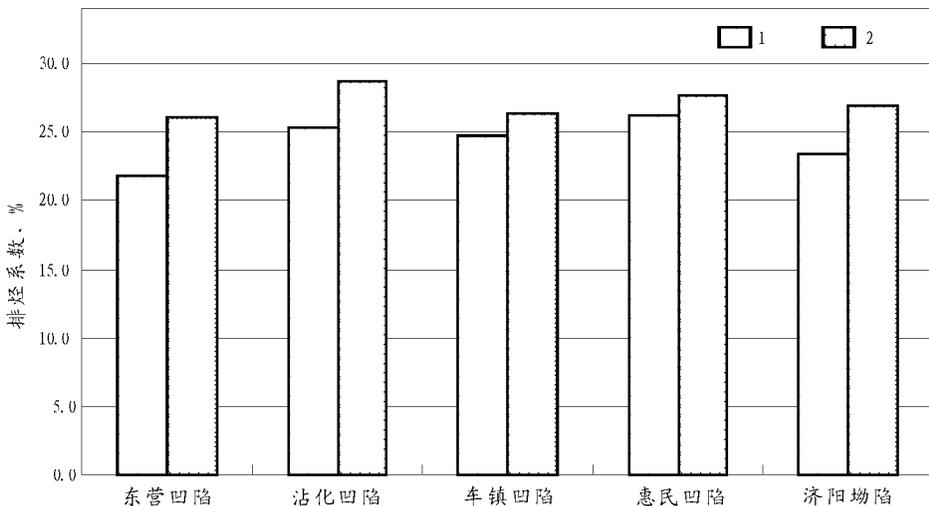


图 3 济阳拗陷暗色泥岩、油页岩排烃系数对比图

1. 暗色泥岩; 2. 油页岩

Fig. 3 Correlation chart of the hydrocarbon displacement factor of dark mudstone to that of oil shale in the Jiyang Depression

究表明, 烃类的聚集量占排烃量的 50.0% 左右是比较合理的。为了比较准确地计算济阳拗陷及各凹陷的石油聚集系数, 采用了地质综合分析法、福克-沃德法、网格统计法等多种方法对聚集系数进行了认真的求取<sup>[9-11]</sup>。济阳拗陷以沾化凹陷的聚集系数最高, 为 51.9%; 其余依次为东营、车镇和惠民凹陷, 聚集系数分别为 47.9%, 40.2% 和 39.1%。济阳拗陷聚集系数的均值为 47.3% (表 1)。

## 2.4 资源量

油页岩的石油资源量可根据下式求取

$$Q_{\text{资源量}} = Q_{\text{排}} \times a \quad (2)$$

式中:  $Q_{\text{资源量}}$  ——石油资源量,  $10^8$  t;

$a$  ——聚集系数, %。

计算结果表明, 济阳拗陷以沙四段上亚段和沙三段油页岩为源岩计算的资源量为  $13.8 \times 10^8$  t; 其中, 以东营凹陷油页岩资源量最多, 为  $6.0 \times 10^8$  t, 其余依次为沾化、惠民和车镇凹陷, 油页岩资源量分别为  $3.7 \times 10^8$ ,  $2.3 \times 10^8$  和  $1.4 \times 10^8$  t (表 1)。

## 3 影响油页岩生、排烃效率的主要因素

济阳拗陷沙四段上亚段和沙三段发育有大量的油页岩。油-源对比结果表明, 东营凹陷牛庄洼陷南斜坡的低熟油来自沙四段页岩层, 而与沙四段的泥岩及沙三段烃源岩无关; 东辛、坨庄、平方王、孤岛等亿吨级大油田的形成也都与沙三段下亚段的油页岩有关。因此, 重新认识影响沙四段上亚段和沙三段油页岩生、排烃效率的主要因素是非常重要的。

### 3.1 影响油页岩生烃效率的主要因素

前已述及, 济阳拗陷沙四段上亚段上部的油页岩中普遍发育小古囊藻 (*Palaeostomacystis minor*) 富集层和生烃能力极强的葡萄藻属 (*Botryococcus braunii*) 与颗石藻属 (*Coccolithophorida*); 沙三段下亚段的油页岩中普遍发育有沟鞭藻富集层及生烃能力极强的葡萄藻属 (*Botryococcus braunii*) 和盘星藻属 (*Pediastrum*) 等绿藻类。油页岩作为济阳拗陷有效烃源岩中的优质烃源岩已为越来越多的油气勘探实践和热模拟实验所证实。油页岩有机碳平均为 7%、热解生烃潜力为 50~52 mg/g, 每克有机碳的生烃潜量为 710~740 mg。含颗石藻烃源岩干酪根经镜下鉴定大部分为 I 型, 其氯仿沥青“*A*”的主要生成阶段是 200~300 °C, 相当于镜质体反射率  $R_o$  为 0.35%~0.55%, 表明来源于颗石

藻的有机质对未成熟—低成熟原油的生成有重要贡献。此外, 现代生物热模拟实验表明, 云南抚仙湖的葡萄藻氯仿沥青“*A*”含量和产率分别高达 41.05% 和 597.55 mg/g<sup>[12]</sup>。因此, 含有藻类富集层和生烃能力极强的葡萄藻属 (*Botryococcus braunii*) 与颗石藻属 (*Coccolithophorida*) 的油页岩是烃类的主要贡献者。

### 3.2 影响油页岩排烃效率的主要因素

耿安松等 (1991) 指出, 有机质丰度是制约生油岩排烃量的主要因素<sup>[13]</sup>。C. S. Mishra 等认为, 在实验室中高温条件下烃源岩中油气的突然生成可能形成微型裂缝, 并改善烃类的排出效率<sup>[14]</sup>。但 Momper (1978) 认为, 对于超压产生微裂隙, 烃类若发生运移, 则需要 1 m<sup>3</sup> 生油岩中至少存在 1.43 L 石油<sup>[14]</sup>。徐朝凤等 (2000) 在研究大民屯凹陷三台子地区古构造发育与排烃时指出, 三台子地区排烃较好, 并且油气以侧向运移为主, 断层的活动加大了侧向排烃的动力<sup>[15]</sup>。王新洲等 (1994) 认为, 流体间歇压裂运移是石油初次运移的重要方式之一<sup>[16]</sup>。Verrik (1994) 指出, 富有机质纹层的页岩在地下超压的环境条件下容易沿纹层面发生破裂, 导致低角度和顺层微裂隙的产生<sup>[17]</sup>。卓勤功等 (2003) 在研究湖相深水油页岩的成油意义时指出, 油页岩的页理发育有利于烃类的转化和排出<sup>[18]</sup>。

综上所述, 烃源岩不但可以进行垂向排烃, 而且也可以进行侧向排烃, 甚至以侧向排烃为主; 微裂隙的存在可以改善烃类的排出效率。而油页岩由于页理的存在将提高烃类的排出效率 (图 4), 尤其是油页岩被断层切割时, 油页岩中烃类的排出效率可能将大幅度提高。侧向运移是油页岩中烃类初次运移的重要方式之一。需要指出的是, 油页岩的排烃效率还要做进一步的实验研究工作。



图 4 沙三段油页岩的页理特征图

Fig. 4 Book structure characters of oil shale in Es<sup>3</sup>

## 4 结束语

1) 济阳拗陷沙四段上亚段和沙三段发育有大量的具有有机质丰度高、干酪根类型好、及高有机质成熟度和高氯仿沥青“ A ”等特点的油页岩。

2) 油页岩中的藻类富集层、生烃能力极强的葡萄藻属与颗石藻属的是烃类的主要贡献者; 侧向运移是油页岩中烃类初次运移的重要方式之一, 页理的存在将提高油页岩中烃类的排出效率, 尤其是油页岩被断层切割时, 烃类的排出效率可能将大幅度提高。

3) 油页岩具有比暗色泥岩更强的生、排烃能力。在暗色泥岩和油页岩都比较发育的含油气盆地中进行资源评价时, 二者不能对等处理, 应分开进行盆地模拟和油气资源评价。

### 参考文献:

- 1 罗佳强, 王学军, 郝雪峰等. 济阳拗陷石油资源评价技术 [A]. 见: 孙焕泉, 王端平, 张善文编. 胜利油区勘探开发论文集 (第三集) [C]. 北京: 地质出版社, 2001. 11~ 18
- 2 李丕龙. 胜利油区勘探现状及展望 [J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(1): 9~ 12
- 3 王秉海, 钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1992. 34~ 38
- 4 徐成华. 谭庄、沈丘凹陷下白垩统生油层排烃效率研究 [J]. 河南石油, 1994, 8(2): 11~ 19

- 5 白新华. 应用古龙凹陷生油岩地化数据资料进行排烃特征分析 [J]. 大庆石油地质与开发, 1993, 12(2): 20~ 23
- 6 张晓宇. 油气初次运移的控制因素与排烃效率 [J]. 江汉石油学院学报, 1993, 15(2): 23~ 26
- 7 查明. 断陷盆地石油二次运移与聚集 [M]. 北京: 地质出版社, 1997
- 8 盛志纬. 关于石油聚集量问题 [J]. 石油实验地质, 1989, 11(3): 228~ 233
- 9 宋国奇. 多因素油气聚集系数的研究方法及其应用 [J]. 石油实验地质, 2002, 24(2): 168~ 171
- 10 江汉油田石油地质志编写组. 中国石油地质志, 卷九, 江汉油田 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 470~ 472
- 11 华东石油学院岩矿教研室. 沉积岩石学 (上册) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991. 82~ 83
- 12 王新洲, 宋一涛, 王学军. 石油成因与排油物理模拟——方法、机理及应用 [M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1996
- 13 耿安松, 傅家谟, 盛国英等. 辽河油田大民屯凹陷下第三系生油岩排烃研究 [J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(2): 117~ 124
- 14 Mishra C S, Thomas N J. 石油的排出和运移 [J]. 谭试典译. 石油地质信息, 1997, 18(2): 73~ 77
- 15 徐朝凤, 高军, 刘世会. 三台子地区古构造发育与排烃 [A]. 见: 张厚福编. 油气运移研究论文集 [C]. 山东东营: 石油大学出版社, 1993. 248~ 254
- 16 王新洲, 周迪贤, 王学军. 流体间歇压裂运移——石油初次运移的重要方式之一 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(1): 20~ 26
- 17 Vernik L, Charles L. Elastic anisotropy of source rocks: implication for hydrocarbon generation and primary migration [J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(4): 531~ 544
- 18 卓勤功, 宗国洪, 郝雪峰等. 湖相深水油页岩段层序地层学属性及成油意义 [J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 20~ 22

## SIGNIFICANCE OF OIL SHALE IN THE EOGENE PETROLEUM RESOURCE EVALUATION OF THE JIYANG DEPRESSION, THE BOHAIWAN BASIN

Luo Jiaqiang<sup>1,2</sup>, Sheng Zhongmin<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Beijing Huaneng Guoqiang Science and Technology Development Co. Ltd., Beijing 102200, China)

**Abstract:** It was found in recent years that the formation of hundred million ton scale of oilfields was related to the oil shale of the lower sub-member of the 3rd member of the Shahejie Formation (for short Es<sup>3</sup>) in the Jiyang Depression on the bases of the detailed correlation of oil and gas to source rocks, and the important contribution of oil shale to hydrocarbons was understood again. There is a great amount of oil shale containing *Botryococcus braunii* and *Coccolithophorida* these algae-enriched layers of great hydrocarbon potential in the upper sub-member of Es<sup>4</sup> and Es<sup>3</sup> of the Jiyang Depression, it is an important contributor to hydrocarbons. Lateral migration was the important mode of primary hydrocarbon migration in oil shale. The existence of book structure, especially when oil shale cut by faults, was probably the main cause of the great enhancement of hydrocarbon discharge efficiency. Oil shale was separately basin-modelled and calculated in the Eogene petroleum resource evaluation of the Jiyang Depression, and its total amount resources was  $13.8 \times 10^8$  t.

**Key words:** oil shale; organic matter-enriched layer; resource evaluation; Eogene; the Jiyang Depression; the Bohaiwan Basin