

文章编号: 1000-0550(2004)01-0161-08

# 牛庄洼陷南斜坡未熟-低熟烃源岩排烃特征探讨

李素梅<sup>1</sup> 庞雄奇<sup>1</sup> 金之钧<sup>2</sup> 马晓昌<sup>3</sup> 句礼荣<sup>4</sup>

1(石油大学盆地与油藏研究中心,石油天然气成藏机理教育部重点实验室 北京昌平 102249)

2(Sinopec 勘探开发研究院 北京 100083)

3(江汉石油管理局清河采油厂 湖北荆州 262714)

4(胜利石油管理局滨南采油厂地质所 山东东营 256606)

**摘要** 牛庄洼陷及其南斜坡烃源岩孔隙度、声波时差与伊蒙矿物含量测定结果表明,2 600 m 为成岩作用早期与晚期阶段的界限,在早期演化阶段南斜坡没有出现明显的异常压力,牛庄洼陷成岩作用晚期阶段有明显的压力异常。生物标志物演化与  $R$  值测定反映,该区有机质大量成烃起始阶段为 2 700 m,牛庄洼陷南斜坡带 < 2 700 m 烃源岩不具备大量排烃的生烃量条件与地质证据。牛庄洼陷南斜坡八面河油田原油的混合成熟度特征与混合的均一性,反映原油的混合作用在初次运移阶段可能即已发生,推测牛庄洼陷深部烃源岩在异常压力作用下通过微裂隙等间歇式排烃的同时,浅层未熟-低熟烃源岩生成的少量原油经由断层、应力产生的微裂隙与层理面,在地层压力及深部流体过剩压力参与下与成熟油混合幕式排出。烃源岩未熟-低熟阶段的排烃效率低于成熟烃源岩。

**关键词** 牛庄洼陷 未熟-低熟烃源岩 间歇排烃 混合相 初次运移

**第一作者简介** 李素梅 女 1968 年出生 副教授 有机地球化学

**中图分类号** P593 **文献标识码** A

近三十年来,国内外很多学者对未熟-低熟油进行过深入的探讨,在生烃机理等诸多方面取得了重要的进展。但是,未熟-低熟烃源岩的排烃研究一直是薄弱环节,这是基于排烃作用受控于物理、化学与地质等因素,排烃机理复杂。物质平衡法(生烃量与残烃量相减)评价排烃门限与过程的方法<sup>[1~3]</sup>,回避了复杂的地质控制因素,不失为一种较好的研究问题的方法,但要真正了解烃源岩的排烃过程与特点,还需加强机理方面的研究。未熟-低熟油的普遍存在反映烃源岩具备早期生烃的能力,但某些油田未熟-低熟油资源量较低<sup>[4~7]</sup>,可能不仅与生烃量大小有关,排烃条件也至关重要。本文以典型未熟油发育区 东营凹陷牛庄洼陷南斜坡八面河油田为研究对象,探讨未熟-低熟烃源岩的排烃特征。

## 1 石油地质概况

中国东部断陷盆地典型“未熟-低熟油田”八面河油田位于东营凹陷牛庄洼陷南斜坡,该区石油地质与油气成因可见之于诸多报道<sup>[4,8~10]</sup>。东营凹陷主力烃源岩为咸化-半咸化环境形成的沙四上亚段泥岩与页岩、淡水相的沙三中、下段泥岩。早期研究中,牛庄洼陷南斜坡八面河、王家岗及相邻的广利等油田被

认为是典型未熟-低熟油田,牛庄洼陷南斜坡沙四上段富藻类页岩被作为是八面河油田的主力烃源岩,未熟油的排出以压实排液为主<sup>[9]</sup>。然而,最近调查结果显示,八面河油田原油为混有少量未熟-低熟油的正常油,油气主要来自牛庄洼陷沙四段常规烃源岩。最新研究成果是应用生物标志物绝对定量技术、层位标定化合物 甲藻甾烷等进行精细油源对比<sup>[4,11,12]</sup>、应用非烃化合物进行油气运移过程研究<sup>[13]</sup>并结合了烃源岩展布、生排烃量计算等地质研究结果得出的。牛庄洼陷南斜坡未熟-低熟页岩中高丰度的可溶有机质指示,未熟-低熟烃源岩具有一定的生烃能力,但未必具备充分的排烃条件,相关研究亦很薄弱。

## 2 烃源岩成岩与成烃作用阶段划分

排烃或初次运移作用受控于多种因素<sup>[3]</sup>,对于未熟-低熟烃源岩,主控因素主要包括:生烃量;残留烃临界饱和度;排烃动力。其中,生烃量大小与有机质类型、丰度、源岩厚度、地温梯度、沉积速率等有关。无论是哪种生烃机理,只有当生烃量满足了岩石吸附、孔喉充填、流体溶解等多种残留需要,多余的烃类才能排出<sup>[1~3,14]</sup>。残留烃临界饱和度取决于孔隙度、岩矿性质、地层水性等。排烃机理主要包括压实排烃、

压裂排烃、膨胀排烃及扩散排烃。有人提出,低熟油烃源岩与成熟烃源岩在生烃机理上不同,但其排烃机理是一致的<sup>[15]</sup>,李明诚<sup>[16]</sup>认为石油初次运移以油相为主,气溶相也具有重要意义,扩散相几乎没有意义。成岩与成烃作用的配置关系直接影响排烃方式,成岩作用早期阶段的排烃主要为压实机制,成岩晚期阶段则为压裂机制。无论原油是未熟-低熟还是成熟油,压实排烃、压裂排烃应是油气主要的排烃机理。

## 2.1 成岩作用

成岩作用包括早期和晚期两个作用阶段,前者是埋藏较浅、孔隙度与渗透率较高的浅埋阶段,孔隙流体可顺利流出,该阶段伴随蒙脱石向伊利石的演化和孔隙度的减小;后者是烃源岩埋藏较深、孔隙度和渗透率很小的深埋阶段,烃类等流体以压裂形式排出。牛庄洼陷沙四上亚段地层中页岩和泥岩相中平均粘土矿物含量在42%左右,灰岩为17%左右。在粘土矿物中,以伊/蒙混合矿物为主,伊/蒙比值随埋深呈规律性变化。当埋深小于1800m时,混合层中蒙脱石含量为80%~50%(图1a),1800~2600m时发生了显著的变化,即蒙皂石在混合层中含量迅速降低。蒙脱石向伊利石的转化使混合层孔隙缩小,随着层间水的排出,体积将缩小1/3。孔隙度由1800m的20%左右,下降到2600m时的不足10%(图1b)。声波时差的变化规律与矿物转化与孔隙度变化基本一致,其反映岩石密度与孔隙度的变化。位于牛庄洼陷的王53井声波时差在2500m之前变化于450~510 $\mu\text{m}^2$ ,2500~2700m发生急剧变化,降至300 $\mu\text{m}^2$ 左右(图1c)。依据以上分析,可将牛庄洼陷及其南斜坡烃源岩成岩作用划分如下:<2600m的烃源岩处于成岩作用早期阶段;>2600m烃源岩处于成岩作用晚期阶段。低演化阶段高孔隙度、渗透率和良好的连通性,以及大量的脱水和水参与,使烃类的排出似乎比高演化阶段容易。张林晔等<sup>[9]</sup>认为早期成岩阶段低熟油以大量层间水为载体进行排出。但是,判断主要排烃期必须结合生油状况,如果在成岩作用早期阶段未发生大量的生烃作用,则大规模的排烃作用不会发生。油源对比显示,牛庄洼陷南斜坡埋深小于2700m的烃源岩的成熟度远低于原油(下文讨论),表明目前和/或地史过程中埋深小于2700m的烃源岩不可能是该区原油的主力烃源岩,主要排油期不在早期成岩阶段深度范围。

## 2.2 成烃作用

烃源岩有机显微组分镜质体反射率、烃源岩生烃强度及氢仿沥青“A”含量与烃类组成的变化反映成烃作用演化阶段。牛庄洼陷烃源岩镜质体反射率 $R$ 在

2700m时达0.5%(图2a),指示该埋深为烃源岩进入生油窗的起始点,即大量生烃起始点。沙四段页岩与泥岩烃转化率 $A/TOC$ (%)随埋深变化与镜质体反射率有较好的对应关系(图2b,c), $A/TOC$ (%)值的降低意味着烃类的排出,图2指示牛庄洼陷沙四段烃源岩的大量生排烃深度>2700m。该区上覆沙三段烃源岩生排烃深度稍大于沙四段<sup>[9]</sup>。

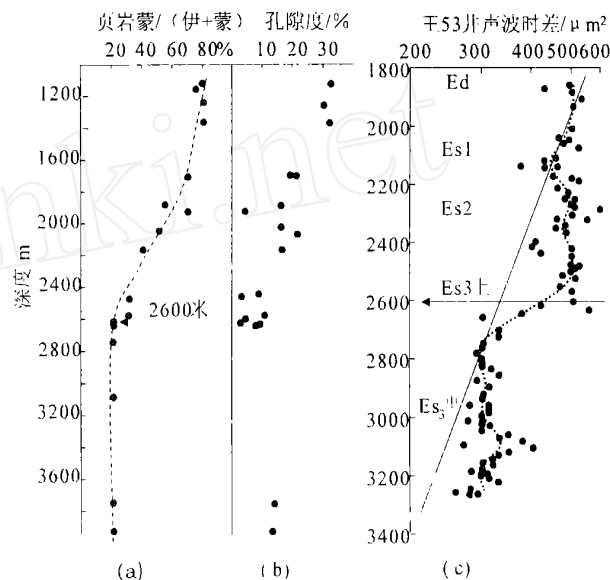


图1 粘土矿物、孔隙度与声波时差-深度关系

(a, b 据张林晔等,1999; c 据王捷等,1999)

Fig. 1 Variation of montmorillonite / (illite + montmorillonite) ratios, porosity and acoustic transit time of potential source rock with depth

(a, b, after Zhang *et al.*, 1999; c, after Wang *et al.*, 1999)

氯仿沥青A烃类化学组成同样指示烃源岩的成烃作用阶段,在热演化过程中,可溶有机质中甾类化合物的丰度与异构化程度均发生显著变化, $C_{29}$ 甾烷 $20S/(S+R)$ 值可从埋深<2700m时的小于0.2变化至>3000m时大于0.4(图3a)。浅埋样品(<2600m)三环萜包含 和 两种异构体,深埋样品只有 一种异构体,指标2600m是此类化合物热演化发生重要转变的深度(图3b)。 $C_{31}$ 藿烷 $22S/(S+R)$ 、伽玛蜡烷/ $C_{31}$ 藿烷也一致反映2600~2700m是烃类化合物从热不稳定向稳定转变的过渡阶段(图3c,d),对应着烃源岩有机质从未熟-低熟向成熟阶段的演化。上述分析表明,成岩作用与成烃演化阶段有较好的对应关系,晚期成岩阶段对应烃源岩成熟阶段。

依据层位标定化合物 甲藻甾烷、生物标志物绝对定量、多种参数与生物标志物指纹对比结果,牛庄洼陷南斜坡八面河油田的原油与2700m以下沙四段烃源岩有较好的相关性<sup>[4,11,10]</sup>,表明油气的深部来源。笔者在以往研究认定的主力烃源岩(牛庄洼陷南斜坡

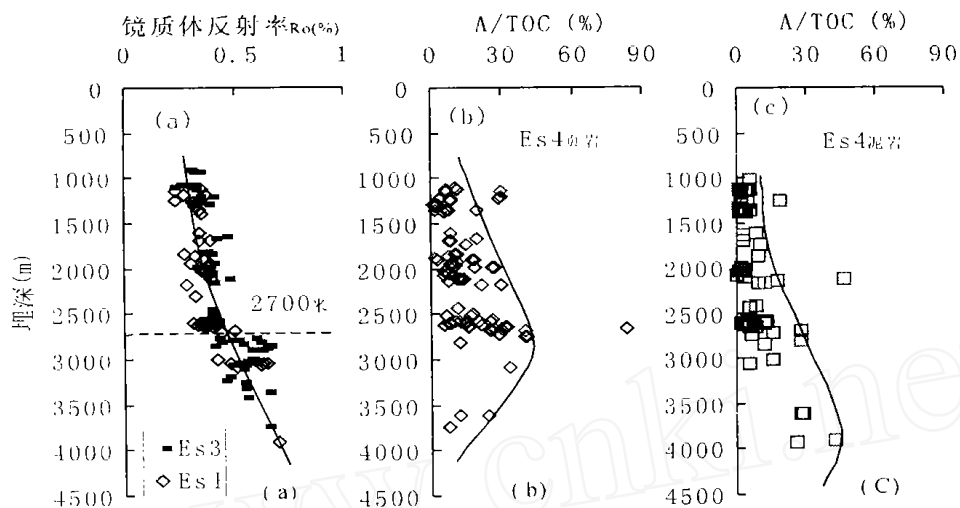


图 2 牛庄洼陷及其斜坡带烃源岩有机质演化与有机碳转化特征

Fig. 2 Thermal evolution of potential source rocks from Niuzhuang Sag, Dongyin Depression

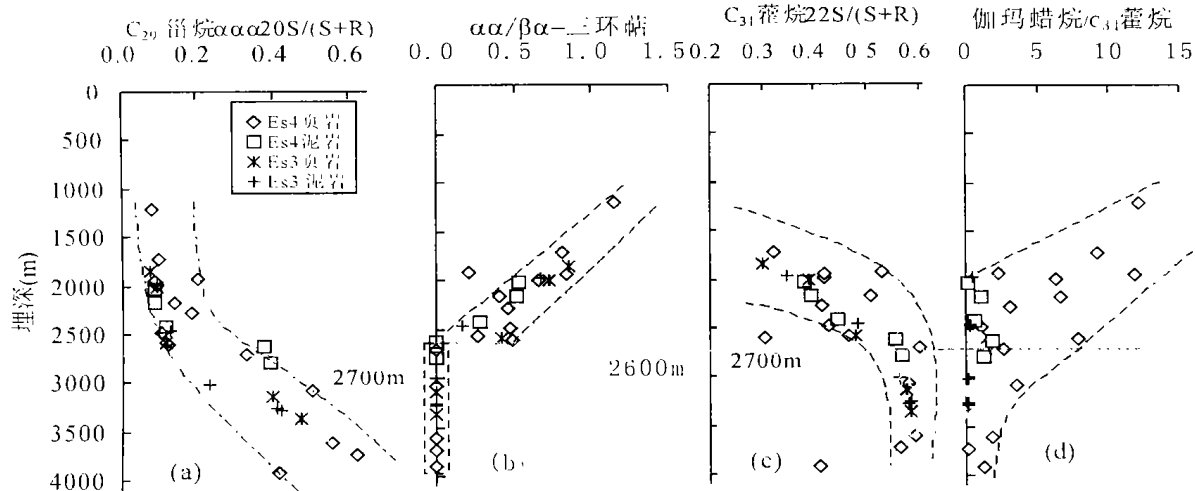


图 3 牛庄洼陷及其南斜坡烃源岩可溶有机质烃类生物标志物演化特征

Fig. 3 Variation of biomarker parameters with depth indicating thermal evolution

沙四段未熟-低熟页岩)中检测出丰富的甲藻甾烷,而原油中该特征性化合物并不存在或含量甚微;与之相一致,牛庄洼陷南斜坡未熟-低熟沙四段页岩 (< 2 700 m)的成熟度明显小于原油的成熟油<sup>[4,11]</sup>,表明沙四段未熟-低熟页岩并非主力烃源岩<sup>[17]</sup>。研究认为,该区原油的某些未熟-低熟特征系少量未熟-低熟油/烃的混入所致,生物标志物绝对定量分析表明,混合作用可导致甾烷成熟度参数  $C_{29}$  甾烷  $S/(S+R)$  大幅度降低,并使正常油中出现热稳定性低的化合物<sup>[5,18]</sup>。并且,第三次资源评价结果表明,牛庄洼陷及其南斜坡沙四上段页岩厚约 40 m,沙四上亚段暗色泥岩厚达 300 m,而早期研究认为沙四上段有利烃源岩在深洼区因相变不太发育<sup>[9]</sup>,实际上,在深洼带有

利烃源岩仍然存在,其为研究区油气的深部来源提供了地质依据。

### 3 未熟-低熟烃源岩排烃特征研究

#### 3.1 排烃动力

普遍认为油气的排驱机理主要为压实排烃、压裂排烃、膨胀排烃及扩散排烃,很多人认为压实作用是起决定作用的因素<sup>[16,19,20,21]</sup>。有人提出低熟油的排出过程与低熟油源岩的压实过程密切相关,低熟油主要在压实作用下从烃源岩中排出,并以油相进行运移<sup>[20]</sup>,低熟油生成时温度较低,不足以产生内部高压,压裂排烃对低熟油不太可能。童亨茂<sup>[21]</sup>则提出在热盆地,压实排烃占主导地位,在冷盆地烃源岩大量排烃

时,压实作用阶段可能已经完成,此时排烃机理转为地应力条件下的微裂缝排烃。目前大多数人认为异常超孔隙流体压力作用下的微裂隙排烃(亦称间歇混相运移)是油气初次运移的最重要机制<sup>[16,22]</sup>,异常的地层压力是油气运移最重要的动力<sup>[23,24]</sup>。而构造应力、温度及其产生的孔隙流体的热膨胀、有机质的热裂解等地质因素和作用实际上只是改变了流体压力值或改变了压力在烃源岩中的分布状态。无论油气以什么样的状态、通过什么样的通道进行运移,都需要在烃源岩与外界间存在过剩压力梯度从而形成相当的推动力的条件下才能发生<sup>[25]</sup>。

油源调查结果显示,牛庄洼陷南斜坡八面河油田原油主要来自2700 m以下的烃源岩<sup>[4,11]</sup>,烃源岩孔隙度变化、成岩演化与声波时差特征说明,在该区发生大规模的生排烃之时(>2700 m),早期成岩作用阶段已经结束,即压实排烃(压实作用阶段)不可能是八面河等油田原油的主要排烃方式,该区烃类只能以压裂排烃(压裂作用阶段)为主。孔隙度与声波时差资料反映,牛庄洼陷南斜坡带未出现异常超压与过剩流体压力现象,牛庄洼陷的异常高压带出现在牛庄洼陷<sup>[9]</sup>(图4),以王家岗断裂带为界。牛庄洼陷的压裂排烃应该发生在成岩晚期阶段。牛庄洼陷南斜坡八面河等油田原油携带成熟油特征的同时,也带有某些未熟-低熟油特征,尽管定量计算表明未熟-低熟烃含量较低,但这部分未熟-低熟烃类的混入除了可能与油气运移过程中烃源岩可溶有机质的侵染有关外,推测还与烃源岩早期演化阶段的少量排烃有关。对不同埋深的与烃源岩相邻的砂岩储层烃的分析表明,<2700 m油砂烃与邻近烃源岩可溶有机质化学组成没有可比性,指示浅层油砂烃主要为运移烃,原地烃源岩排烃量有限。未熟-低熟烃源岩自身很难形成高过剩压力(如牛庄洼陷南斜坡),其排烃动力可能与构造运动有关,另外,深部的超压流体也可能对浅部未熟-低熟烃源岩的排烃产生影响。东营凹陷是典型的超压地带<sup>[26]</sup>,超压的成因主要包括:地层不均衡压实、构造挤压、与流体作用(烃类生成、水热膨胀、粘土矿物脱水等)有关,油气的大量生成及排烃不畅导致超压的形成。异常压力可通过侧向与垂向传递<sup>[27]</sup>。异常超孔隙流体作用下的微裂隙排烃是油气初次运移的最重要机制<sup>[19,28,29]</sup>,已得到人们的赞同。张金功等指出<sup>[30]</sup>,异常超压带内的开启泥岩裂隙带是油气初次运移的主要地带。当地层压力接近或达到岩层破裂压力时,发生

水力破裂,郝芳等<sup>[31]</sup>提出超压流体幕式排放的层次性:流体从超压泥岩向邻近输导层的排放是初次排放;流体通过压力封闭层从超压系统向上覆常压或相对低超压系统的排放为二次排放。可见,流体的二次排放可促进上覆未熟-低熟烃源岩的排烃。

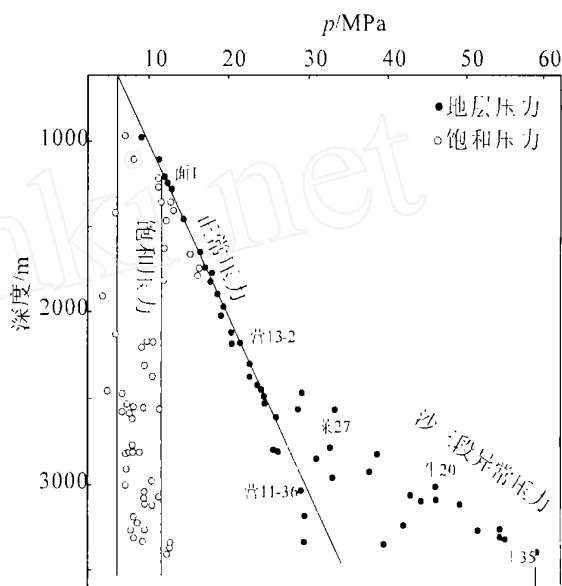


图4 牛庄洼陷地层压力、原油饱和压力随埋深变化  
(据张林晔等,1999)

Fig. 4 Variation of formation pressure and oil-saturation pressure with depth  
(after Zhang Linye et al, 1999)

### 3.2 排烃方式

八面河油田原油的形成并非以压实排烃为主要机理,以往确认的主要油源区—牛庄洼陷南斜坡浅层(<2700 m)也未出现异常压力与高过剩流体压力,反映牛庄洼陷南斜坡带未熟-低熟烃源岩生烃量、水动力强度有其局限性,也反映粘土中蒙皂石向伊利石的转化把结晶水转为自由水,虽然会增加孔隙水的压力,但在没有较强水动力、烃源岩有机质大量成烃增压条件下,一般不易出现高过剩压力。分析认为,八面河地区烃源岩的排烃方式有以下几种:

(1)通过断裂与应力产生的微裂隙排烃 烃源岩含油饱和度只有达某临界值时,石油的初次运移才能发生<sup>[32]</sup>。邹华耀等<sup>[15]</sup>通过对苏北盆地低熟油烃源岩( $R_o < 0.7\%$ )生油史与排油史模拟结果的对比,提出低熟油烃源岩相对于成熟烃源岩通常较难达到含油饱

和度排油门限,但是只要低熟油烃源岩区断层发育,在断层作用下石油的初次运移可以发生,并形成工业性油藏。Price 和 Clayton<sup>[33]</sup>也指出断层作用可以导致未成熟和低埋藏温度的富有机质岩石形成小型未成熟油藏。牛庄洼陷及其斜坡带除发育八面河及王家岗两条基底断裂带外,次级断层也较为发育(图 5)。这些断层对未熟-低熟油的排驱与运移应该起到促进作用。

(2) 页岩层理作为油气初次运移的通道 牛庄洼陷及其南斜坡沙三(上、中、下)、沙四段不同岩性(泥岩、页岩)、不同成熟度(未熟-低熟、成熟)烃源岩的排烃效率计算显示,不同成熟度页岩的排烃效率明显高于泥岩,未熟-低熟阶段沙三、沙四段页岩的排烃效率分别为 26.23%、24.63%(均值 24.7%),远高于未熟-低熟泥岩(<10.65%),与一般情形下的成熟泥岩接近(图 6);成熟阶段沙三、沙四段页岩的排烃效率分别为 39.38%、42.82%(均值为 40.28%),而沙三中、下亚段及沙四段泥岩一般为 24.03%~29.33%(图 6);以上特征说明,页岩的页理是初次运移的重要通道,导致其排烃效率高于块状泥岩。这与先前研究结果有相似之处<sup>[9]</sup>。

(3) 与深部异常压力(过剩流体压力)有关的幕式混相排烃“幕式突破”模式是超压盆地超压层流体活动方式<sup>[34,35]</sup>,幕式排烃可导致多源层烃类的混合运移和聚集。牛庄洼陷南斜坡地层没在超压现象,但牛庄洼陷沙三段在 2 500 m 已开始出现超压(图 4、5)。成熟生油岩生成的烃类累积到一定的程度,将通过异常超

孔隙流体压力作用下的微裂隙或其它途径排烃(间歇混相),过剩流体异常压力可能会穿层释放,带动浅层生油岩形成烃类的混相运移。八面河油田原油既显示未熟-低熟特征也显示成熟特征<sup>[11]</sup>,可能与异常流体压力下的初次运移阶段的间歇混相运移有关,不同成熟度烃源岩的排烃具有同期性。当然,混合作用也可发生在二次运移阶段,或者二次运移与初次运移两者兼而有之。八面河油田原油以成熟油为主<sup>[4]</sup>,进一步说明压裂排烃的主导作用。

### 3.3 排烃特点

以干酪根降解化学动力学为原理的资源量评价方法不太适用于未熟-低熟油,因可溶有机质低温生烃被作为一种重要的未熟-低熟油形成机制<sup>[9]</sup>。通过 Rock-Eval 热解实验法,可利用烃源岩生烃潜力的变化来反映排烃量,其适用于不同生烃机制<sup>[36]</sup>。利用该方法,笔者对牛庄洼陷及其周边地区不同岩性、不同层位与不同演化阶段烃源岩生、排烃量进行了计算(另文讨论),结果表明,牛庄洼陷及其斜坡带未熟-低熟阶段的排烃效率总体低于成熟烃源岩,其中,沙三段泥岩在未熟-低熟阶段的排烃效率极低,如沙三上、中、下的泥岩在未熟-低熟阶段的排烃效率分别为 0.47%、2.82%、0.77%(图 6),埋藏相对较深的沙四段泥岩的排烃效率稍高,达 10.65%,但沙三、四段泥岩在成熟阶段的排烃效率除沙三上段较低外,分布范围为 24.03%~29.33%,而沙三、四段页岩可高达 39.38%、42.82%(图 6)。可见,未熟-低熟阶段排烃效率不及成熟烃

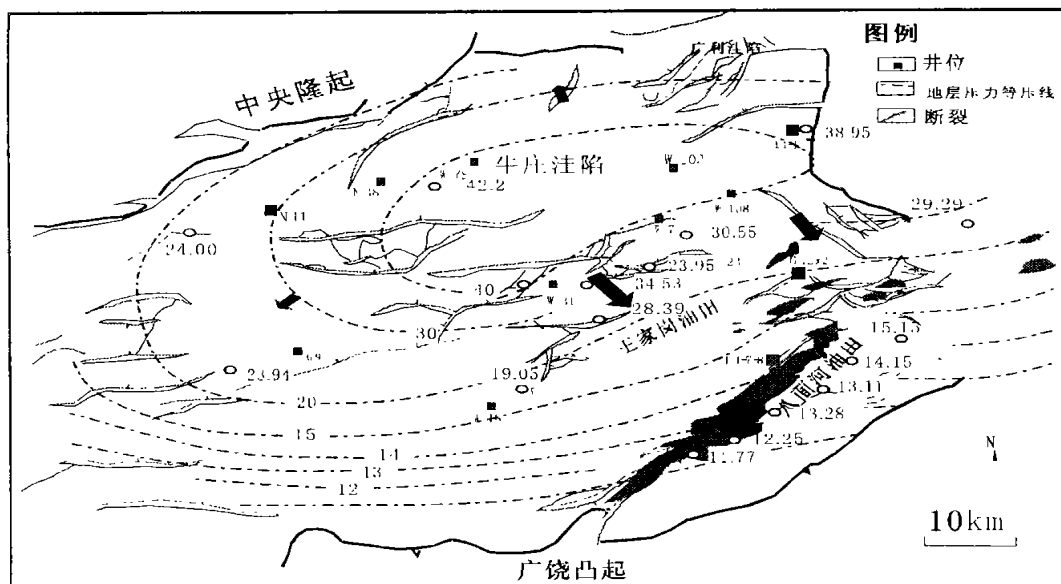


图 5 牛庄洼陷及其斜坡断裂与地层压力分布特征

Fig. 5 Distribution of faults and formation pressure in Niuzhuang Sag, Dongyin Depression

源岩是未熟-低熟油气资源量少的重要原因。以往研究认为牛庄洼陷南斜坡沙四段页岩是八面河油田的主力烃源岩,本研究认为,较之于其它层位烃源岩,沙四段页岩在未熟-低熟阶段生烃潜力、排烃效率(24.63%)虽然相对较高,但其体积远不及沙四段泥岩(图7),使其总排烃量仍然较低。

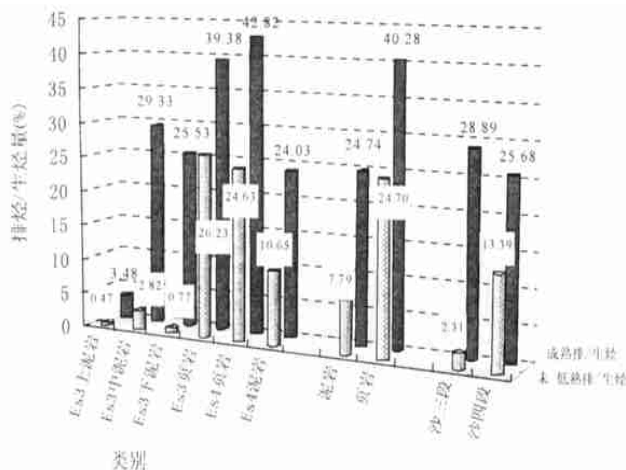


图 6 不同层位、不同阶段烃源岩排烃效率图

Fig. 6 Correlation of expulsion efficiency of potential source rocks from different intervals with different maturity in Niuzhuang Sag

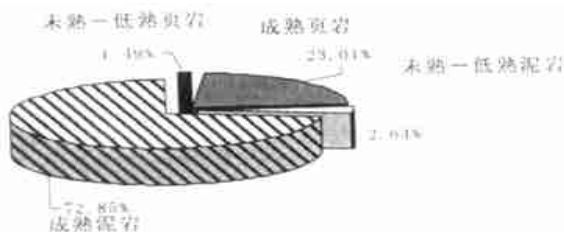


图 7 沙四段烃源岩相对体积对比图

Fig. 7 Percentages of volume of Es4 potential source rocks in Niuzhuang Sag

### 4 结论

岩石物性、岩矿转化与地层压力资料反映,牛庄洼陷及其南斜坡成岩作用早期阶段结束时期,烃源岩尚未进入大量生烃的起始阶段,反映压实排烃并非八面河油田原油的主要排烃机理。牛庄洼陷及其斜坡带广泛发育的断裂、页岩层理与超压现象有利于未熟-低熟烃源岩发生初次运移,推测以烃类为主的深部高压流体产生的过剩压力参与了浅层未熟-低熟烃源岩的排烃作用,不同成熟度烃源岩的幕式混相压裂排烃导致了八面河油田不同成熟度原油的均一混合作用。牛庄洼陷烃源岩在未熟-低熟阶段的排烃效率远低于成熟烃源岩,泥岩的排烃效率低于页岩,未熟-低熟阶段生

烃量少、排烃效率低是八面河油田混合油中未熟-低熟油含量低的根本原因。

### 参考文献(References)

- 1 庞雄奇,陈章明,陈发景.含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价.北京:地质出版社,1993.10~85 [Pang X Q,Chen Z M,Chen F J. Digital modelling the sedimentary history, and thermal evolution, hydrocarbons generation, residence ad well as expulsion procedure, and quantitative evaluation of source rocks in oil and gas bearing basins. Beijing: Geological Publishing House, 1993. 10~85]
- 2 庞雄奇.排烃门限控油气理论与应用.北京:石油工业出版社,1995.15-133. [Pang X Q. Theory of expulsion threshold controlling oil distribution and it's application. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995. 15~133]
- 3 庞雄奇, Ian Lerche, 王雅春, 等. 煤系源岩排烃门限理论研究与应用. 北京:石油工业出版社, 2001. 6~270 [Pang X Q, Ian Lerche, Wang Y C, et al. Theoretical study and application of hydrocarbon expulsion threshold of coal measures. Beijing: Petroleum industry press (in Chinese), 2001, 6~270]
- 4 Pang Xiongqi, Li Maowen, Li Sumei, Jin Zhijun. Petroleum systems in the Bohai Bay Basin: Part 2. Geochemical evidence for significant contribution of mature source rocks to "immature oils" in the Bamianhe field. Organic Geochemistry. 2003a. In press.
- 5 Pang Xiongqi, Li Maowen, Li Sumei, Jin Zhijun, Xu Zhonglong, Chen Anding. Origin of crude oils in the Jinhu Depression of North Jiangsur South Yellow Sea Basin, eastern China. Organic Geochemistry, 2003b, 34(4): 553~573.
- 6 王文军, 宋宁, 姜乃煌, 等. 未熟油与成熟油的混源实验、混源理论图版及其应用. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 34~37. [Wang W J, Song L, Jiang N H, et al. Mixing of immature and mature oils: laboratory results, calibration maps and potential application. Petroleum Exploration & Development, 1999, 26, 34~37]
- 7 Ruble T E, Lewan M D, Philp R P. New insights on the Green River petroleum system in the Uinta basin from hydrous pyrolysis experiments. AAPG Bulletin, 2001, 85(8): 1333~1371
- 8 Hu J, Xu S, Tong X, Wu H. The Bohai Bay Basin. In: Zhu X, ed. Chinese Sedimentary Basins. Amsterdam: Elsevier, 1989. 89~105.
- 9 张林畔, 张春荣. 低熟油生成机理及成油体系. 北京:地质出版社, 1999. 77~78, 16. [Zhang L Y, Zhang C R. Origins of Immature Oils and Related Petroleum Systems: Case Studies from the Southem Slope of Niuzuang Sag, Jiyang Depression. Beijing: Geological Publishing house, 1999. 77~78, 16]
- 10 Li Sumei, Li Maowen, Pang Xiongqi, et al. Petroleum systems in the Bohai Bay Basin: Part 1. Distribution and organic geochemistry of petroleum source rocks in the Niuzhuang South Slope. Organic Geochemistry, 2003, 34(3): 389~412.
- 11 庞雄奇, 李素梅, 黎茂稳, 等. 八面河地区“未熟-低熟油”成因探讨. 沉积学报, 2001, 19(4): 586~591 [Pang X Q, Li S M, Li M W, et al. Origin of immature oils in Bamianhe oilfield. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 4: 586~591]
- 12 Li Sumei. Distribution and significance of methyl steranes in Bohai Bay Basin, east China. Journal of China University of Geosciences, 2002,

- 13(4):321~329.
- 13 庞雄奇,李素梅,黎茂稳,等.八面河油田油气运移成藏模式探讨.地球科学,2002,6:666~670[Pang X Q, Li S M, Li M W, *et al.* Discussion on petroleum migration in Bamiange Oilfield of Dongying Depression, Eastern China. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2002, 6:666~670]
- 14 王新洲,周迪贤,王学军.烃源岩中残留死油量与运移门限值的讨论.石油勘探与开发,1995,22:17~24[Wang Xinzhou, Zhou Dixian, Wang Xuejun. A distribution of residual dead oil content in source rocks and its migration threshold. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22:17~24]
- 15 邹华耀,陆建峰.断层-低熟油烃源岩排油的控制因素.江汉石油学院学报,1998,20(2):33~27[Zhou Huayao, Lu Jianfeng. Faults: A key factor for expelling low mature oil. Journal of Jianhan Petroleum Institute, 1998, 20(2):33~27]
- 16 李明诚.石油与天然气运移研究综述.石油勘探与开发,2000,27(4):3~10[Li Mingcheng. An overview of hydrocarbon migration research. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4):3~10]
- 17 李素梅,庞雄奇,金之钧.八面河地区原油、烃源岩中甾类化合物的分布特征及其应用.地球科学,2002a,6:711-717[Li S M, Pang X Q, Jin Z J. Distribution and significance of steroids in Bamiange oilfield, East China. Eastern China. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2002a, 6, 711~717]
- 18 李素梅,庞雄奇,金之钧,等.苏北金湖凹陷混合原油的地质地球化学特征.石油大学学报.2002b,1:12~15[Li S M, Pang X Q, Jin Z J, *et al.* Geochemical characteristics of the mixed oil in Jinhu Sag of Subei Basin. Journal of the University of Petroleum, China, 2002b, 1:12~15]
- 19 李明诚.石油与天然气运移.北京:石油工业出版社,1994.12~90[Li M C. Oil and gas migration. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994. 12~90]
- 20 高岗.低熟油排出临界饱和度与泥岩压实关系探讨.中国海上油气,2000,14(4):266~269[Gao Gang. Correlation of critical expulsion saturation of immature oil with mudstone compaction. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2000, 14(4):266~269]
- 21 童亨茂.地应力对排烃的影响方式及作用模型.石油实验地质,2000,22(3):201~209[Tong Hengmao. The way and model of stress effect on hydrocarbon expulsion. Experimental Petroleum Geology, 2000, 22(3):201~209]
- 22 蒂索 B. P, 威尔特 D. H. 石油形成和分布(第二版).徐永元译.北京:石油工业出版社,1989.216~222[Tissot B P, Welte D H. Formation and distribution of petroleum. Translated by Xu Yongyuan. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989. 216~222]
- 23 Mann U, *et al.* Petroleum migration: mechanisms, pathways, efficiencies and numerical simulations. In: Welte D H and Baker D R, eds. Petroleum and basin evolution. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997. 405~520.
- 24 罗晓容.油气初次运移的动力学背景与条件.石油学报,2001,22(6):24-30.[Luo Xiaorong. Dynamic background and condition for oil primary migration. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(6):24~30]
- 25 Ungerer P, Burrus J, Doligez B, *et al.* Basin evaluation by integrated two-dimensional modelling of heat transfer fluid flow, hydrocarbon generation, and migration. AAPG, 1990, 74(3):309~335.
- 26 刘晓峰,解习农.东营凹陷流体压力系统研究.地球科学,2003,28(1):78~86[Liu Xiaofeng, Xie Xinong. Study on fluid pressure system in Dongying Depression. Earth Science - Journal of China University of Geosciences, 2003, 28(1):78~86]
- 27 刘晓峰.超压传递:概念和方式.石油实验地质,2002,24(6):533~536[Liu Xiaofeng. Over pressure transference: concept and ways. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(6):533~536]
- 28 王新洲,周迪贤,王学军.流体间歇压力运移-石油初次运移的重要方式.石油勘探与开发,1994,21(1):20~26[Wang Xinzhou, Zhou Dixian, Wang Xuejun. Intermittent fracturing migration of pore fluids - one of the major regime of primary migration of petroleum. Petroleum Exploration and Development, 1994, 21(1):20~26]
- 29 Hedberg H D. Methane generation and petroleum migration. AAPG Studies in Geology, 1980, 10:179~206.
- 30 张金功,王定一,邸世祥,等.异常超压带内开启泥岩裂隙的分布与油气初次运移.石油与天然气地质,1996,17(1):27~31[Zhang Jingong, Wang Dingyi, Di Shixiang, Li Pilong. Distribution of open fractures in abnormal overpressure mudstone and primary migration of hydrocarbon. Oil & Gas geology, 1996, 17(1):27~31]
- 31 郝芳,董伟良.沉积盆地超压系统演化、流体活动与成藏机理.地球科学进展,2001,16(1):79~85[Hao Fang, Dong Weiliang. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1):79~85]
- 32 Ozkaya I. Computer simulation of primary oil migration in Kuwait. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14(1):37~48.
- 33 Price L C, Clayton J L. Extraction of whole versus ground source rock: fundamental petroleum geochemical implications, including oil-source rock correlation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(1):1213~1222.
- 34 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. AAPG Bulletin, 1990, 74:1-12
- 35 Xie X N, Wang C, Li S T. Hydrofracturing and episodic compaction in low permeable muddy rocks of sedimentary basin. Chinese Science Bulletin, 1998, 42(9):666-670.
- 36 周杰,庞雄奇.一种排烃量计算方法及其应用.石油勘探与开发,2002,29(1):24~27[Zhou Jie, Pang Xiongqi. A method for calculating the quantity of hydrocarbon generation and expulsion. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(1):24~27]

## Discussion of Hydrocarbons Expulsion from Less Mature Source Rocks in the Niuzhuang South Slope of Dongyi Depression, Bohai Bay Basin

LI Su-mei<sup>1</sup> PANG Xiong-qi<sup>1</sup> JIN Zhi-jun<sup>2</sup> MA Xiao-chang<sup>3</sup> JU Li-rong<sup>4</sup>

1(Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education P. R. China;  
Basin and Reservoir Research Center, Petroleum University, Beijing 102249)

2(Sinopec Petroleum Exploration and Exploitation Institute, Beijing 100083)

3(Jiangnan Petroleum Exploration Bureau, Qinhe Oil-recovery Division, Jingzhou Hubei 262714)

4(Shengli Petroleum Exploration Bureau, Binnan Geological Institute, Dongying Shandong 256606)

**Abstract** It was suggested that 2 600 m is the boundary of early and later stage of diagenesis in Niuzhuang South Slope, Dongyi Depression, Bohai Bay Basin according to porosity, illite/montmorillonite ratio and acoustic transit time, and no abnormal formation pressure was observed from Es4 intervals located in the Niuzhuang South Slope. It was proved that 2 700 m is oil generation threshold ( $R_o = 0.5\%$ ) of normal oil window based on vitrinite reflectance and thermal evaluation of biomarkers as well as oil-source rock correlation results previously. No solid proofs support the opinion that Es4 shales located in the Niuzhuang South Slope should be the main source rock of oil pools in Bamihe oilfield.

It was assumed that less mature oils with small amount as suggested by our recent reinvestigation were expelled through faults, shale layer under formation pressure of overlying intervals periodically. Particularly, deeper fluid pressure was suggested to play active roles in hydrocarbons expulsion of shall intervals indirectly, which is created by large amount of generated and expelled hydrocarbons. Hydrocarbons generated by source rocks with wide range of thermal maturity were expelled by abnormal fluid pressure periodically and contemporaneously leading to mixing of the oils with different maturity during primary migration. Relative small amount of hydrocarbons generated and low efficiency of hydrocarbons expulsion are responsible for low immature petroleum resource of Bamihe oilfield.

**Key words** Niuzhunag Sag, immature source rock, episode hydrocarbon expelling, mixed phase primary migration