

应用排烃强度预测深陷期 砂砾岩扇体的含油性

隋风贵^{1,2}, 罗佳强², 曹建军²

(1. 中国矿业大学, 北京 100083; 2. 胜利油田地质科学研究所, 山东 东营 257015)

摘要: 深陷期的砂砾岩扇体岩性油气藏是含气盆地勘探中后期油气勘探的重要目标, 其含油性主要取决于有效烃源岩的排烃强度、砂体的储集性能、油气排驱动力等要素及其相互作用的结果。对东营凹陷已钻探的深陷期砂砾岩扇体进行研究发现, 扇体的油气充满度与排烃强度密切相关; 在油源充足的情况下, 其成藏效果则主要受储集物性的影响。指出砂体的驱替效率指数 > 15%、且位于排烃强度 > $20 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 内的砂砾岩扇体易于形成充满度较高的油气藏, 而厚度 < 2m、孔隙度 < 12% 的砂体则不利于成藏。该方法已成功地应用于东营凹陷深陷期砂砾岩扇体的油气勘探实践, 并取得了较好的效果, 它对陆相断陷盆地深陷期岩性油气藏的勘探具有重要的指导意义。

关键词: 深陷期; 排烃强度; 砂砾岩扇体; 含油性; 油气勘探
中图分类号: TE122. 2 **文献标识码:** A

孙永传(1980)、董荣鑫等(1985)较早地研究了水下冲积扇沉积特征^[1,2], 之后与砂砾岩扇体有关的油气藏广为关注, 并成为我国东部陆相断陷盆地近年来油气勘探的重要目标。在油气勘探中, 不可能采用钻探的方法来认识所有的砂体是否含油, 但可以通过研究控制砂体成藏的相关要素来预测其含油性而降低勘探风险。为了准确地预测砂砾岩扇体的含油性, 提高油气勘探效益, 国内外的许多学者从砂体分布规律、沉积微相、物性和成藏的动力条件等方面, 采用包括模拟实验在内的多种方法对砂砾岩扇体的含油性进行了分析研究, 并取得了大量的研究成果。如崔攀峰等(2002)、张文朝等(1998)从沉积相、微相的角度研究砂体的含油性^[3,4]; 盛和宜(1993)、谢传礼(1999)研究了扇三角洲沉积模式^[5,6]; 于建国(1997)、李志华等(2002)利用地震等手段分别对砂体的含油性进行了预测^[7,8]; 王宁(2002)研究了砂体在成藏中的阻力条件, 提出了成藏指数的概念^[9]; 张云峰(2000)、陈章明(1998)等研究了松辽盆地砂岩透镜体油气藏的聚油机理, 并对透镜状砂体的聚油机理进行了模拟实验研究^[10,11]。上述有关砂砾岩扇体及其含油性等方面的研究, 已

对砂砾岩扇体含油性的定量评价方法进行了积极的探索。笔者在对东营凹陷砂砾岩扇体成藏条件的研究中发现, 其充满程度与烃源岩的排烃强度密切相关, 并且在油源充足的情况下, 其成藏则主要受其储集物性好差等因素的影响。本文通过定量地分析烃源岩的排烃强度、砂体的储集物性与砂砾岩扇体含油性的关系, 提出了一种预测砂砾岩扇体含油性的新方法。

1 砂砾岩扇体沉积背景

陆相断陷盆地在其形成、发育和演化过程中, 通常都要经历初始裂陷期、裂陷深陷期和萎缩期等 3 个发育演化阶段。一般在裂陷深陷期, 陆相盆地由于分割性强、古地形起伏大、构造活动强烈、多物源、多水流等原因形成了多种类型的沉积体系, 造成沉积地层厚度大、相变快, 不但发育巨厚烃源岩, 而且广泛发育多种成因类型的近源砂砾岩扇体, 它们往往具有规模小、类型多、横向变化大等特点, 并与有效烃源岩呈镶嵌式接触, 易于形成岩性油气藏。如东营凹陷在下第三系沙河街组三段(简称沙三段或

Es³)的裂陷深陷期,东营凹陷具有“北断南超”的盆地结构和“北厚南薄”的地层展布特征,在沙三段巨厚的烃源岩内广泛发育了大量的缓坡远岸浊积扇、陡坡深水浊积扇,以及扇三角洲和三角洲前缘滑塌浊积扇等砂砾岩扇体,其中的多数砂体都能形成岩性油气藏。

2 成藏机理分析

陆相断陷盆地与岩性油藏有关的浊积砂体主要有陡坡深水浊积扇、缓坡远岸浊积扇和三角洲前缘滑塌浊积扇等3类^[12-14]。它们通常被包裹于盆地在深陷期发育的成烃超压带内,具有基本相同的成藏条件,其成藏的关键主要取决于砂砾岩扇体周缘有效烃源岩的排烃强度,其次是其自身的物性条件。

通过研究东营凹陷深陷期(沙三段)发育在成烃超压带内的浊积砂体与源岩之间的相对关系可以发现,砂体主要存在被烃源岩包裹和处于烃源岩之上两种配置关系,并以被烃源岩包裹型为主。按照国内外学者对油气成藏机理的研究,分布在烃源岩内的砂砾岩扇体都有较好的成藏条件,并应被油气所充满;但在东营凹陷的牛庄—东辛地区,对烃源岩内砂砾岩扇体的含油性统计结果表明,已钻探的60余个砂体中,基本不含油的占45%,而在超压体系顶封隔层部位的贫烃泥岩内砂体只有少数能成藏。说明了砂体的成藏过程是极其复杂的,砂体在油气水交替中应是多种成藏要素共同作用的结果。

从成藏动力机制上分析,砂体能否成藏主要取决于烃源岩的供烃能力、油气排驱动力、砂体储集性能及其相互作用的结果。仅研究油气初次运移和聚集的动力条件并不能诠释砂体是否成藏。由于源岩供烃能力是油气成藏的最基本条件,也是决定砂体成藏与否的关键要素,特别是由于烃源岩在成烃过程中导致的增压作用而形成的异常高流体压力的大小主要取决于生烃强度;同时,以异常压力产生的微裂缝作为排烃通道,不仅在理论上得到了广泛的认同,而且在胜利油田近期开展的生、排烃模拟实验中,也观察到了烃源岩的荧光裂隙在一定深度范围内随深度加大而增加的现象。因此,在通过分析油气成藏要素来预测砂体的含油性时,源岩的供烃能力——排烃强度对成藏的作用应是首要的,其次是砂体储集物性的影响;在浊积砂体的油气运聚成藏中,无论是否有异常压力的驱动,二者的相互作用将决定砂体成藏与否及其含油程度的高低。

3 砂砾岩扇体含油性研究

3.1 排烃强度与成藏

油气分布与烃源岩密切相关,特别是高效烃源岩体对形成油气藏至关重要。所谓高效烃源岩体是指具有较高产烃率的烃源岩体。高效烃源岩体供烃数量与丰度自然成为决定砂体能否形成岩性油气藏及其油气充满程度的重要因素。即使具备其它要素而且条件优越,只要缺乏有效的烃源就不可能成藏。在烃源不足的情况下,油藏充满度偏低或油藏规模偏小。因此,在油气成藏研究中,研究者们普遍重视油源的作用。实际上“源控论”观点特别强调了油源从宏观上对油气藏分布的控制作用^[15];Magoon(1992)提出的含油气系统概念,同样是强调成熟烃源岩这个基本要素^[16]。含油气系统研究的重要对象以及系统划分的主要依据也是有效烃源岩,说明了源岩的质量与分布对油气成藏具有重要的控制作用。“场环论”也认为油气藏的分布从根本上由生烃洼陷控制,如东营凹陷各油田呈环状、半环状围绕生烃洼陷分布^[17]。又如东营凹陷内的利津洼陷生油量最大,以此为中心,围绕利津洼陷由胜坨、宁海、东辛、现河、利津等16个油田组成较完整的环状分布。

为了研究烃源岩与砂体油气充满程度的关系,本文以砂体的含油面积与总面积之比来代表其充满度,以砂体的含油饱和度代表其含油程度。通过分析东营凹陷深陷期层序内已经钻探的60余个砂砾岩扇体成藏特征,可以直观地反映出砂体岩性油藏的充满度与围岩的供烃丰度密切相关(图1)。

图1较好地反映了牛庄地区的源岩排烃强度与砂砾岩扇体油藏充满度的对应关系。在剖面中,2800~2950m深度段是烃源岩排烃强度的低值带,也是异常压力体系的顶封隔层。由于该深度范围内发育的泥岩段有机质含量较低,干酪根类型较差,为低排烃强度的烃源岩,因而被其包裹的砂砾岩扇体缺少有效烃源条件,基本不含油。只有部分砂体因为有裂隙或断层与下部高排烃强度烃源岩相连通形成了油气藏,但多数砂体的油气充满度较低(<50%)。而埋深在2950~3500m间的砂砾岩扇体,被高排烃强度烃源岩所包裹,大部分砂砾岩扇体都有较高的油气充满度(>50%)或完全为油气所充满。这种现象说明排烃强度是砂体能否形成大规模、高充满度油气藏的决定因素之一。

通过对东营凹陷有效烃源岩的生、排烃特征研究,建立了有效烃源岩排烃强度随深度变化的关系

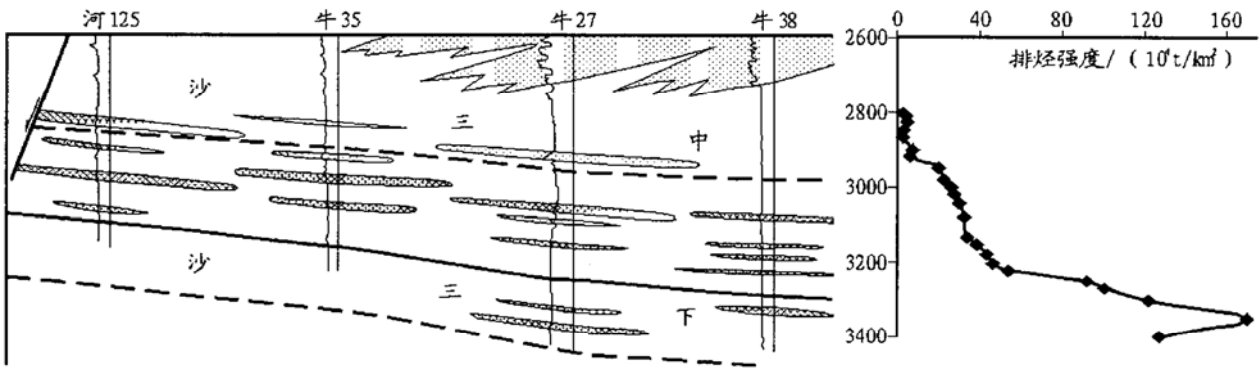


图 1 牛庄地区排烃强度与滑塌砂砾岩扇体油藏充满度关系图

Fig. 1 Relationship between impulsive intensity and pool abundance degree of collapse conglomerate fan in Niuzhuang Area

曲线(图 1), 并对砂砾岩扇体的含油气情况进行分析发现, 砂砾岩扇体能否成藏与有效烃源岩的排烃强度有明显的相关性。在 2 950m 界线上、下, 排烃强度值存在跳跃现象。在 2 950m 界线以上, 排烃强度通常 $< 10 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 多数砂砾岩扇体基本不能成藏; 在 2 950m 界线以下, 排烃强度一般 $> 20 \times 10^4 \text{ t/km}^2$, 大多数砂砾岩扇体都能成藏, 并且油气充满度较高。

3.2 砂砾岩扇体物性与成藏

在油源充足的情况下, 砂体的成藏效果则主要取决于其储集物性的好差。从成藏机理上说, 储集物性的好差(孔隙及喉道)决定了其驱替压力(成藏阻力)的大小, 并决定了在油、气、水交替中砂体与源岩二者之间的毛细管压力(成藏动力)的大小。对东营凹陷经钻探证实的 156 个浊积砂体统计分析表明, 影响储集物性的主要因素是砂体类型、埋深及砂体规模(包括厚度与面积)等。对于特定层位砂体, 如东营凹陷砂三中亚段的浊积砂体, 其埋深范围变化不大, 因此其储集物性主要与砂体规模有关。本文研究中以砂体厚度代表其规模大小, 通过统计分析实际砂体规模与物性的关系, 可以得到与上述理论分析相同的观点。

如图 2 所示, 对牛庄和史南地区已经钻探证实的 60 个规模较大的砂砾岩扇体(面积大于 1.0 km^2) 统计分析表明, 砂体厚度(H) 与孔隙度(Φ) 呈较好的正相关关系:

$$H = 1.704 \ln(\Phi) + 14.765 \quad (1)$$

式中砂砾岩扇体厚度(H) 单位为 m, 相关系数为 0.731。

采用地震和地质相结合的方法定量描述砂体规模等参数, 结合砂体围岩供烃强度研究, 可以定量地

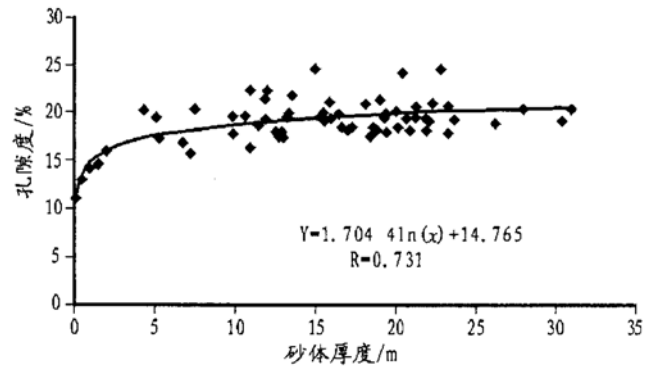


图 2 史南地区砂体厚度与孔隙度关系图

Fig. 2 Relationship of sandbody thickness and porosity in Shinan Area

对砂体含油程度进行钻前预测, 达到降低勘探风险的目的。对东营凹陷沙三段发育的浊积砂体来说, 供烃强度的有利界限是 2 700m, 该深度以下有利于砂体的成藏, 随着深度的增加, 油藏充满度增大; 砂体厚度界限是 2m, 通常 2m 以下的砂体孔隙度小于 12% 而不利于成藏, 5m 以上的砂体储集物性好, 对成藏非常有利。

3.3 砂体驱替效率与成藏

根据成藏动力学分析, 成藏动力(即围岩剩余压力)越大, 油气进入岩性圈闭的能力越强。而反映成藏阻力的砂体等效驱替压力越小(压汞实验中岩石进汞量 10% 时的压力值, 对应进汞量曲线的突变点, 该压力为等效驱替压力), 说明油气在相同成藏动力条件下进入岩性圈闭的可能性越大。反之, 围岩剩余压力越小, 等效驱替压力越大, 成藏的可能性就越小。因此笔者将围岩剩余压力(P_s) 与等效驱替压力(P_e) 之比定义为砂体驱替效率指数(I_d), 作为评价砂体岩性圈闭成藏效率的参数之一, 即:

$$I_d = P_s / P_e \quad (2)$$

由公式(2)可见,砂体驱替效率指数(I_d)是一个无量纲参数,其大小可以反映砂体成藏能力的高低,即指数(I_d)越大,砂体越利于形成岩性油气藏,反之就不利于成藏。

通过对东营凹陷25口探井钻遇的26个砂砾岩扇体的含油的研究发现(表1),油气充满度较高(>60%)的砂砾岩扇体,其驱替效率指数较大(>15%)。

3.4 模拟试验分析

关于烃源岩排烃强度对油气成藏的影响,已为室内模拟试验结果所证实。胜利油田地质院实验室在油水相对渗透率测定仪基础上改进了油水运移模拟流程,分别采用油水比为0.5%、2%、10%、50%、100%的油水混合物或油相流体代表油源供给丰度的变化,将不同比例的油水混合物注入砂岩孔隙介质模型中,观看油源供给丰度变化与砂岩孔隙介质模型中油气运聚数量的关系。实验结果证实,在油源供给充足条件下,油源供给丰度的不断增加能够提高砂体中暂储聚油数量(图3)。实验结果还证实,随单位时间内通过储层单位面积的液流量的增

加,储层中暂储聚集油相数量增加,而且先增加快,然后增幅减小。在全为油相条件下,油相运聚压力的大小、砂岩岩性是决定孔隙介质模型中油气运聚数量的重要因素。

总之,实例解剖与试验分析都证实了源岩供烃能力——排烃强度对砂砾岩扇体的含油气程度有着重要的控制作用。东营凹陷深陷期发育的砂砾岩扇体岩性油气藏的油气充满程度与烃源岩供烃强度密

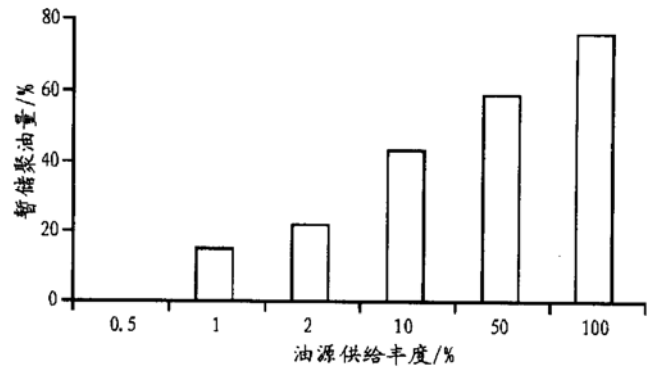


图3 油源丰度与砂体聚油量关系图

Fig. 3 Relationship between of source abundance and oil accumulative quantity of sandbody

表1 东营凹陷砂砾岩扇体含油性综合统计表

Table 1 Reservoir property conglomerate fan in Dongying sag

序号	砂体名称	含油程度/ %	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	等效驱替压力/ MPa	围岩剩余压力/ MPa	砂体驱替 效率指数
1	河 87A	100.0	20.2	70.0	0.5	17.9	35.8
2	史 115	100.0	23.0	17.0	0.5	18.0	34.9
3	坨 719	73.0	13.0	45.0	0.5	16.0	34.0
4	营 11	95.0	25.0	75.9	0.4	14.0	33.5
5	坨 142	69.0	23.0	120.0	0.2	7.0	29.7
6	坨 71	92.0	15.7	25.2	0.9	22.4	26.1
7	营 93	80.0	26.4	206.0	0.3	6.6	24.6
8	坨 143	100.0	21.3	65.0	0.5	11.2	22.5
9	樊 107	75.0	14.5	9.9	0.8	16.0	21.0
10	河 142A	100.0	20.4	26.0	0.7	15.0	20.4
11	史 109	100.0	18.7	5.0	0.7	12.2	18.3
12	史 108A	83.0	16.5	10.0	1.2	21.7	17.8
13	河 86A	79.0	20.0	30.0	0.7	12.4	17.6
14	史 119A	80.0	22.7	8.0	1.1	18.9	17.2
15	牛 106D	68.0	17.4	37.0	0.7	10.7	15.3
16	新坨 743	20.0	18.1	13.9	1.0	13.0	12.8
17	坨 74	20.0	22.0	40.8	0.6	7.4	12.7
18	樊 128	33.0	20.5	8.0	1.2	13.5	11.4
19	樊 101B	50.0	15.0	8.4	1.4	15.4	11.3
20	坨 76	43.0	15.0	14.0	0.7	8.0	11.3
21	牛 110	24.0	19.2	30.9	0.7	8.0	11.2
22	王 541A	44.0	19.0	7.0	0.8	8.0	9.7
23	樊 101A	40.0	16.0	9.5	1.3	9.5	7.6
24	樊 121	13.0	15.3	11.2	1.2	6.0	5.0
25	辛 142	0.0	22.0	100.0	0.4	1.9	4.6
26	牛 111	0.0	13.5	2.2	2.4	8.0	3.3

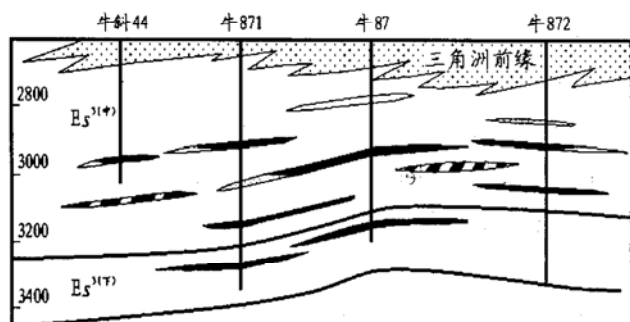
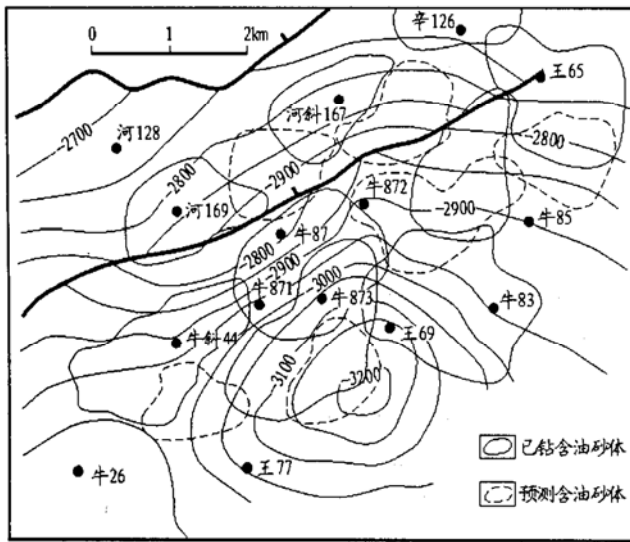


图4 牛871地区沙三段中亚段浊积砂体叠合图

Fig. 4 Turbidite superposition map in middle E_s^3 of Niu 871 Block

切相关,许多油气藏油柱高度小、含油饱和度偏低,都是烃源岩排烃强度小造成的。排烃强度与驱替效率指数二者结合起来,可以比较准确地预测砂砾岩扇体含油性的好与差。在东营凹陷,驱替效率指数 $> 15\%$ 、且位于排烃强度 $> 20 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$ 内的砂砾岩扇体易于形成油气充满度较高的油气藏,而厚度 $< 2\text{m}$ 、孔隙度 $< 12\%$ 的砂体则不利于成藏。

4 应用实例

东营凹陷的牛871地区,在深陷期(沙三段)发育了大量的缓坡远岸浊积扇和三角洲前缘滑塌浊积扇。通过测井约束地震反演描述了42个有利砂体,其中多数砂体为面积 $< 2.0\text{km}^2$ 、厚度为2~10m的单砂体,但在平面上呈叠合连片分布。从提高勘探效益角度考虑,不可能用逐个钻探砂体的方法来认识其含油性,需要采用整体部署、分批实施、动态调整的方式进行滚动式部署与钻探。在该区的勘探方案部署中,首先对已钻砂体的含油性进行了分析,研

究了浊积砂体的油气充满程度与有效烃源岩排烃强度、砂体物性的关系,对未钻探砂体含油性进行预测。经分析认为,该区位于有效烃源岩排烃强度 $< 20 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$,埋深 $< 2900\text{m}$ 的砂体,其油气充满度将 $< 50\%$;而位于有效烃源岩排烃强度 $> 20 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$,埋深为 $2900 \sim 3500\text{m}$ 、厚度 $> 3\text{m}$ 、孔隙度 $> 12\%$ 的砂体利于成藏。依据此成藏界限条件对砂体进行评价,并优选了17个成藏条件最为有利的砂体进行探井部署(图4)。从已完钻的牛871、872井情况看,均钻遇目的层系油气层,与预测结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 孙永传. 水下冲积扇——一个找油的新领域[J]. 石油实验地质, 1980, 2(3): 32-41.
- [2] 董荣鑫,等. 近岸水下冲积扇相特征及实例[J]. 石油实验地质, 1985, 7(4): 294-302.
- [3] 崔攀峰,赵惊蛰,等. 华池油田长3油层沉积微相与含油性关系[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2002, 17(1): 15-19.
- [4] 张文朝,崔周旗. 阿南油田阿四段河口水下扇砂体储层沉积相及含油性[J]. 西安石油学院学报, 1998, 13(5): 1-5.
- [5] 盛和宜. 粒度分析在扇三角洲分类中的应用[J]. 石油实验地质, 1993, 15(2): 185-191.
- [6] 谢传礼. 陆相断陷盆地陡坡扇三角洲沉积模式——以单家寺油田为例[J]. 石油实验地质, 1999, 21(增): 334-338.
- [7] 于建国. 砂砾岩体的内部结构研究与含油性预测[J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(A1): 15-19.
- [8] 李志华,刘正锋,等. 储层含油性分析的分形研究[J]. 油气井测试, 2002, 11(4): 16-18.
- [9] 王宁. 岩性油气藏形成的成藏指数[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(6): 4-6.
- [10] 张云峰,于建成. 砂岩透镜体油藏聚油机理及成藏模式[J]. 断块油气田, 2000, 7(2): 12-14.
- [11] 陈章明,张云峰. 凸镜状砂体聚油模拟实验及其机理分析[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 167-170.
- [12] 隋风贵,罗加强,郝雪峰. 东营凹陷缓坡远岸浊积扇体系序列及其含油性[J]. 矿物岩石, 2003, 23(3): 76-81.
- [13] 谢凤猛,等. 渤海湾盆地滨南油田砂砾岩扇体空间分布与成藏规律[J]. 石油实验地质, 2002, 24(4): 334-338.
- [14] 刘丽军. 北部湾盆地福山凹陷流沙港组湖底扇沉积特征及发育背景[J]. 石油实验地质, 2003, 25(2): 110-115.
- [15] 胡朝元. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. 石油学报, 1982, 3(2): 9-13.
- [16] Magoon L B, et al. The Petroleum System—Status of Research and Method[J]. USGS Bull, 1992, 2007: 2-11.
- [17] 刘兴材,钱凯,吴世祥. 东营凹陷油气场环对应分布论[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(3): 185-189.

APPLYING HYDROCARBON EXPELLING INTENSITY TO PREDICT OIL-BEARING POTENTIAL OF THE GLUTENITE FAN IN DEEP SAG STAGE

SUI Feng-gui^{1,2}, LUO Jia-qiang², CAO Jia-jun²

(1. *China University of Mining Industry, Beijing 100083, China;*

2. *Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257015, China*)

Abstract: Lithologic oil reservoir of the conglomerate fan-body developed in deep sag stage is the important target of oil-gas exploration in the mid-later term exploration in petroliferous basin, and its oil-bearing potential is mainly dependent on the hydrocarbon expelling intensity of effective source rocks, the reservoir condition of gravel-sand fan-body and the result of their interaction. It is found that the oil-gas full-up degree of fan-body has important relativity with the hydrocarbon expelling intensity, and its accumulation effect is mainly affected by the reservoir condition if there is enough oil-gas resource in deep Dongying sag. The gravel-sand fan-body of displacement efficiency index over 15% and the hydrocarbon expelling intensity over $20 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ is prone to form reservoir of high oil-gas full-up degree, and that the sand body of thickness over 2m and porosity over 12% is suitable for forming reservoir. The method has been applied to the oil-gas exploration of the gravel-sand fan-body in deep Dongying sag stage and has obtained better effect, Therefore it can be used to guide the exploration of lithologic oil reservoir in deep sag stage of continental basin.

Key words: deep sag stage; hydrocarbon expelling intensity; glutenite fan-body; oil-bearing potential; oil-gas exploration