

文章编号:1673-5005(2009)05-0036-05

东营凹陷南斜坡古近系油气沿输导层 优势侧向运移的控因分析

王建伟¹, 宋国奇², 宋书君³, 王新征¹, 高 侠⁴

(1. 中国石化胜利油田分公司 现河采油厂地质所, 山东 东营 257068; 2. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000;
3. 中国石化胜利油田分公司 河口采油厂地质所, 山东 东营 257200;
4. 中国石化胜利油田分公司 物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要:运用钻井、测井、地层水测试和油气地球化学等资料,对东营凹陷南斜坡古近系油气输导体系及流体动力学特征进行研究,分析不同驱动机制下油气沿输导层优势侧向运移的控制因素。结果表明:浮力、水动力和异常流体压力是研究区油气运移的3种主要驱动机制类型;在浮力驱动下,中、浅部输导层正向构造“脊”控制着油气优势运移路径;在异常流体压力系统及其周缘,活动性断裂带诱发超压流体沿优势通道侧向运移、集中泄流泄压;在深部输导层正常压实环境下,油气受水动力和浮力联合驱动发生运移,优势运移路径主要受正向构造“脊”的控制,但输导层渗流能力非均质性也对其产生影响。

关键词:输导层;驱动机制;侧向运移;控制因素;东营凹陷

中图分类号:TE 122.12 **文献标识码:**A

Controlling factors for petroleum dominant lateral migration along Eogene carrier beds in southern slope of Dongying sag

WANG Jian-wei¹, SONG Guo-qi², SONG Shu-jun³, WANG Xin-zheng¹, GAO Xia⁴

(1. Xianhe Oil Production Plant, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying 257068, China;
2. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying 257000, China;
3. Hekou Oil Production Plant, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying 257200, China;
4. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying 257022, China)

Abstract: Many analytical data such as drilling, logging, formation water testing and petroleum geochemical property were used to analyze the carrier beds and fluid kinetics of Eogene in the southern slope, Dongying sag. Controlling factors of petroleum dominant migration along carrier beds were studied under different driving mechanism. The results show that there are three kinds of driving mechanisms including buoyancy, hydrodynamic force and fluid overpressure in the area. The buoyancy drives petroleum migration in the shallow, middle carrier beds, and positive structural elements control dominant migration pathways. In the overpressure zone, active faults induce overpressure fluid to dominantly migrate towards faults. In the deep carrier beds with low permeability and normal formation pressure, both hydrodynamic force and buoyancy interactively drive petroleum to migrate. Petroleum dominant migration pathways are mainly controlled by positive structural elements, but simultaneously affected by heterogeneous permeability of carrier beds.

Key words: carrier bed; driving mechanism; lateral migration; controlling factor; Dongying sag

国内外学者对油气的二次运移过程进行了大量物理模拟试验和数值模拟,证实油气二次运移只通过局限的优势通道进行^[1-2]。优势通道仅占油气输导系

统的极少部分,但它输导的油气可能占输导系统输导油气总量的绝大部分。处在优势通道上的圈闭容易富集油气形成油气藏,而处在优势通道之外的圈闭即

收稿日期:2009-03-15

基金项目:山东省博士后择优资助项目(200603027)

作者简介:王建伟(1975-),男(满族),河北承德人,副研究员,博士,主要从事石油地质学和储层地质学研究。

使离油气源很近也很难成藏或形成的油气藏充满度较低^[3]。优势通道是输导层的非均质性、能量场的非均一性和流体流动样式多样性等多种因素共同作用的结果^[4]。一些学者认为油气沿着输导层优势运移主要受到高孔渗条带的控制^[5],而另外一些学者则认为受到输导层构造“脊”控制^[6]。作为流体矿产,油气在多孔介质内的运移总体应受到运动学条件和动力学条件的联合控制。笔者结合东营凹陷南斜坡古近系不同成藏动力系统分布状况,针对不同层系因能量场的差异和输导层的发育特征,分别对不同驱动机制下油气优势侧向运移的主控因素进行分析。

1 区域地质概况

研究区位于东营凹陷南斜坡东段,西临纯化构造,东接八面河油田及广利油田,北至牛庄洼陷,南抵乐安油田,勘探面积约 500 km² (图 1)。新生界第

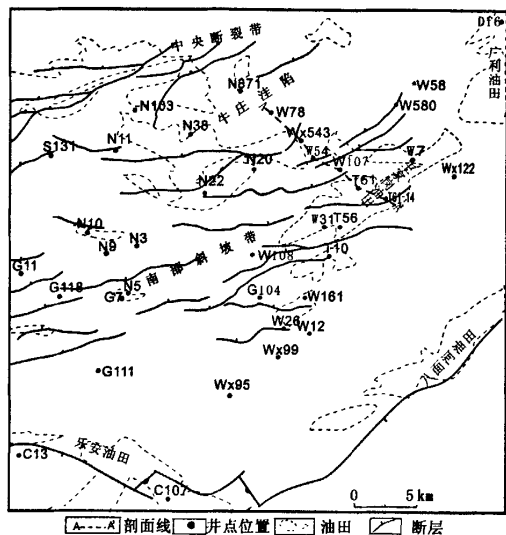


图1 研究区位置及构造简图

Fig. 1 Location and construction sketch of study area

三系地层自下而上发育有古近系孔店组(Ek)、沙河街组(Es)和东营组(Ed)以及新近系馆陶组(Ng)和明化镇组(Nm)。该区整体构造较为简单,主要表现为单斜和构造背景上发育各级鼻状构造带,同生断裂体系发育。

历经 40 余年的油气勘探工作,研究区的油气勘探程度较高。沙河街组沙三下亚段(Es_3^*)和沙四上亚段(Es_4^*)为该区两套主力生油岩,岩相为暗色油页岩和深灰色泥岩。主力生油岩埋藏深度普遍大于 3.0 km,热演化程度较高,生油能力强,这为该区油气勘探奠定了坚实的物质基础^[7]。油气储集层主

要由河流相砂体、三角洲前缘砂体、滑塌浊积砂体和深水浊积砂体构成,储集层十分发育^[8]。

2 输导层发育状况

自古新世后期(E_1)至渐新世末(E_3),东营凹陷主要发生了四幕构造沉降^[9]。在这种构造背景控制下,地层层序建造规律明显,呈现出多个次级旋回。钻、测井和地震资料揭示,研究区古近系主要存在3套区域物性盖层和输导层组合(图2)。依据驱替压力资料和非渗透性岩层叠合厚度综合判别沙中亚段(Es_3^{*})盖层质量最优,其次为沙一段(Es_1)盖

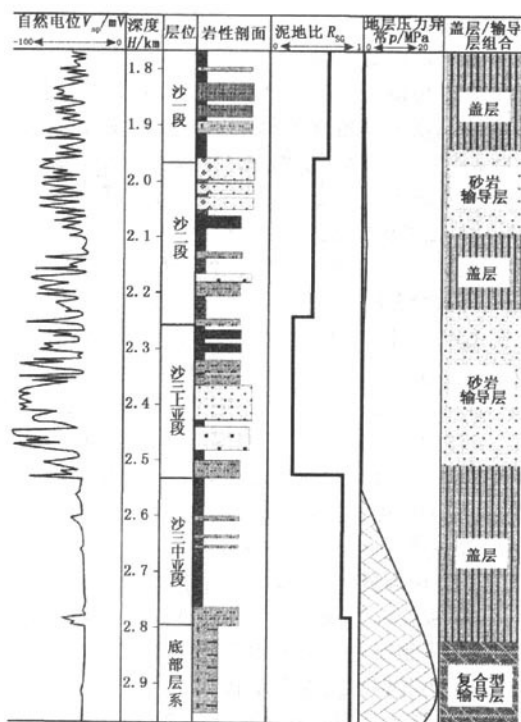


图2 东营凹陷南斜坡下第三系输导层纵向分布

Fig. 2 Longitudinal distribution of carrier beds in southern slope, Dongying sag

层,沙二下亚段(Es_2^*)封盖能力较差(图2)。 Es_1 段物性盖层主要由泥岩及化学盐岩构成,具有很强的物性封盖能力,但受其封盖的沙二段(Es_2)输导层岩相主要为砂岩与中-厚层泥岩互层,砂岩单层分布范围局限,区域输导能力较差。 Es_2^* 物性盖层的绝对遮挡能力及分布范围都比较有限,但相对于沙三上亚段(Es_3^*)连续性厚层砂岩及其渗流能力而言具有一定区域封盖能力,从而与 Es_3^* 厚层砂岩叠置构成了超压系统上的第一套区域盖层和输导层组合。

$E_{s_3}^*$ 物性盖层的遮挡能力强而分布广泛,其下部区域输导层由多个层系构成,渗流通道由多组微裂缝、岩石页理和薄层粉细砂岩复合而成。尽管渗流物性普遍低于 $0.01 \mu\text{m}^2$,但临近生油岩和处于独特的能量系统内,该套输导层对东营凹陷南斜坡东段油气分布具有重要的控制作用。

3 油气运移主要驱动机制类型

研究区驱动机制类型分为超压驱动、浮力驱动和水动力驱动 3 种类型。在牛庄洼陷及其南缘 $E_{s_3}^*$ 的顶部存在着超压盖层,自 $E_{s_3}^*$ 超压成藏动力系统开始发育,至 $E_{s_3}^*$ 超压强度达到最高,沙四段(E_{s_4})也存在一定程度的超压。油、气和地层水的质量传递和能量传输过程同时受到了超压盖层的限定,地层压力系数可以超过 1.8,地层水矿化度可以达到 200 g/L 。浮力是油气运移最持久的动力,与油气自身聚集状态密切相关。在异常流体压力系统内部及其边缘,油势梯度主要由浮力强度和超压强度矢量和构成,但超压强度明显大于浮力强度,异常流体压力对分散烃类物质运移起到了主要驱动作用^[10]。

$E_{s_3}^*$ 上部输导层处于正常压实环境,地层水均为 CaCl_2 型,地层水矿化度背景值都处于 $30 \sim 50 \text{ g/L}$ 。输导层主要由厚层中一粗砂岩构成,具有很高的渗流能力。油气沿着中、浅部主力砂岩输导层运移过程中,很容易达到浮力驱动所需要的门限烃柱高度,浮力成为油气运移的主要驱动力。

处于正常压实环境的 E_{s_4} 输导层,由于渗流通道主要由微裂缝化的岩石页理和薄粉砂岩层复合而成,总体渗流能力较差。油气沿着输导层运移过程中,理论上很难达到浮力驱动所需要的门限烃柱高度,水动力将对相对低聚集状态的烃类物质运移起到重要的驱动作用^[11]。相对于上部输导层,水动力驱动导致沙四段油藏的原油明显富集亲水性较强的族组分,如沥青质及非烃类物质,而饱和烃和芳香烃含量相对较低。实验室模拟试验证实,浮力驱动下 $\alpha\beta\beta\text{C}_{29}$ 甾(20R) 运移速度要比 $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$ 甾(20R) 快得多,即 $\alpha\beta\beta\text{C}_{29}$ 甾(20R) 和 $\alpha\alpha\alpha\text{C}_{29}$ 甾(20R) 相对含量明显受到地质色层效应影响^[12]。研究区 C_{29} 甾烷异构体的构成特征表明, E_{s_4} 输导层原油样品经历的地质色层效应很弱,诸多样品都沿着热演化趋势线分布,这进一步说明水动力是沙四段输导层内油气运移的主要驱动力(图 3)。

总之,研究区古近系动力系统分隔导致油气运移过程主要受到异常流体压力驱动、水动力驱动和

自身阿基米德浮力驱动,并且不同地区、不同层位油气运移的主要驱动机制不完全一致。

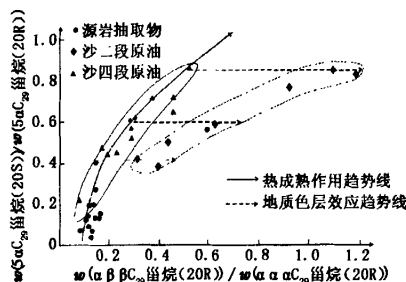


图 3 不同驱动机制下原油运移过程中 C_{29} 甾烷异构体色层效应对比

Fig. 3 Chromatographic effect correlation of C_{29} sterane isomeride for oil migration under different driving mechanism

4 油气优势侧向运移的控制因素

4.1 超压驱动

以 Ortoleva 为代表的学者将非线性科学中自组织理论引入流体封存箱研究,认为流体封存箱内流体的活动是与外界环境耦合的自组织过程^[13]。流体从超压泥岩向临近输导层的排放可能是盆地范围的,而超压流体从整个超压系统向常压或相对低超压系统的排放可能是通过一定的通道集中进行的,断层、超压系统内的构造高点和压力囊的隆起点是超压流体的优势释放点^[14]。

牛庄洼陷异常流体压力系统南部被同生断层所切割,超压系统内的地层流体沿着断裂带曾发生纵向幕式排放^[15]。与其对应,超压系统内的地层流体必然发生侧向运移,从而为断裂带纵向流体排泄和压力释放提供物质及能量条件的保证。因而,活动断裂带、底辟等诱发机制控制着超压系统内油气优势侧向运移方位(图 4)。处于超压混相流体优势侧向运移方位,砂岩透镜体在“半渗透膜”效应下富集成藏^[16]。

4.2 浮力驱动

在研究区中-浅部主力砂岩输导层内,油气主要受浮力驱动发生运移,可以用达西定律来描述。基于达西定律,输导层构造形态和渗流物性成为影响油气运移路径的两个重要因素。本次研究利用 Basin Mod 盆地模拟软件,分析说明浮力驱动下油气优势侧向运移的主要控制因素。模拟条件:输导层为区域均质输导层,渗透率为 $0.1 \mu\text{m}^2$,油、水密度差为 0.25 kg/L 。模拟结果表明:在输导层古构造形态

为单斜背景下,油气运移流线呈平行状展布;在输导层正向构造“脊”部,油气运移流线呈汇聚状沿着正向构造“脊”部优势侧向运移;在输导层构造相对低洼带,油气运移路径呈发散状,或没有油气运移流线,从而表现出优势运移路径间的“分隔槽”。

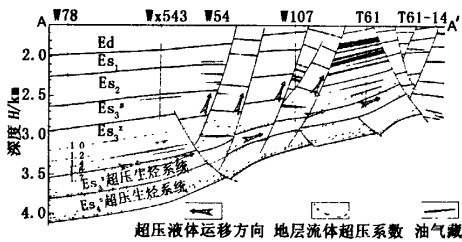


图 4 活动性断裂带诱发超压流体优势侧向运移
Fig. 4 Dominant lateral migration of overpressure fluid induced by active faults

在上述其他模拟条件不变的前提下,只将均质输导层改为非均质输导层。将构造低洼带输导层渗透率设置为 $0.1 \mu\text{m}^2$,而在正向构造“脊”部输导层渗透率设置为 $0.01 \mu\text{m}^2$,也就是说正向构造“脊”部与其相邻构造低洼带存在一个渗流级差(图 5)。从数值模拟结果看,油气优势运移路径并没有发生显

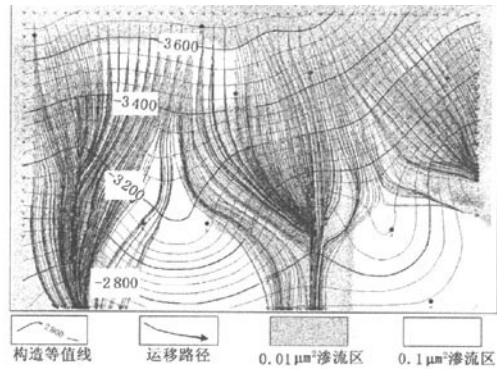


图 5 浮力驱动下油气沿非均质输导层侧向运移路径分布

Fig. 5 Petroleum dominant lateral migration pathways along heterogeneous carrier bed under driving mechanism of buoyancy

著变化。油气优势侧向运移路径仍位于输导层构造“脊”部,由于局部受输导层物性差异的影响,非均质输导层构造“脊”部较均质输导层构造“脊”部的油气运移路径汇聚性偏差。

总之,在浮力驱动下输导层物性只对油气运移路径起到局部控制作用,油气优势侧向运移主要受到势场即输导层构造形态的控制。在东营凹陷南斜

坡东段中、浅部,依据精细构造图完全可以确定油气优势及次级优势运移路径。

4.3 水动力驱动

东营凹陷古近系地下水活动具离心状压实流特点,这对油气运移和聚集具有重要的影响^[17]。为了从理论上进一步认识水动力驱动下油气沿输导层的运移特征,数值模拟条件将油、水密度差置为 0,即油、水密度相同。当输导层为均质输导层时,在水动力驱动下油气侧向运移路径仍然受到古地形的控制。相对于同等条件浮力驱动下的油气运移过程,运移路径比较发散,但油气优势侧向运移路径仍然处于输导层的正向构造“脊”部。在上述其他模拟条件不变的前提下,只将均质输导层改为非均质输导层进行数值模拟。将构造低洼带输导层渗透率设置为 $0.1 \mu\text{m}^2$,而将正向构造“脊”部输导层渗透率设置为 $0.01 \mu\text{m}^2$ 。当输导层为非均质输导层时,油气运移路径受到了输导层构造形态和输导层渗流能力非均匀性的共同控制(图 6)。相对于均质输导层,非均质输导层内油气运移路径更加发散,部分油气运移路径分布在构造低洼带的高渗流区域,另一部分油气运移路径则集中在输导层正向构造“脊”部。

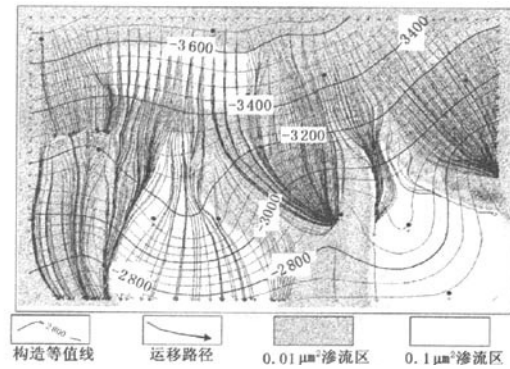


图 6 水动力驱动下油气沿非均质输导层侧向运移路径分布

Fig. 6 Petroleum dominant lateral migration pathways along heterogeneous carrier bed under driving mechanism of hydrodynamic force

实际上,油气和地层水总是存在着一定的密度差异,浮力是油气运移过程中最持久的动力,只是浮力受到油气聚集状态的制约。在水动力驱动分散烃类物质侧向运移过程中,油气在输导层内经历反复聚集,相应驱动机制和运移方式发生转换。高聚集状态的油气将变为浮力驱动为主,最终油气在输导层内的优势侧向运移路径仍主要受到古构造的控制。

5 结 论

(1) 东营凹陷南斜坡古近系存在三套输导层。中、浅部两套输导层由主力砂岩层构成,具有较高的渗流能力,而 Es_4 输导层由多组微裂缝化的岩石页理和薄砂岩层复合而成,渗流能力较低。

(2) 浮力、水动力和异常流体压力成为油气运移的主要动力,分别作用于油气的不同运移阶段。在生油洼陷及其周缘深部层系,油气运移主要受到异常流体压力驱动;在盆地中、浅部砂岩输导层内,油气运移主要受浮力驱动;在盆地较深部 Es_4 输导层内,油气运移受到了水动力和浮力的联合驱动。

(3) 处于生油洼陷及其周缘,异常超压驱动油气运移,活动性断层等诱发机制控制了油气优势运移方位;在盆地中、浅部砂岩输导层内,输导层正向构造“脊”部控制着油气优势运移路径;在盆地较深部 Es_4 输导层,油气优势运移路径主要受到输导层正向构造“脊”控制,但同时也受到输导层高渗流条带的影响。

(4) 油气沿着输导层优势运移的控因不同,决定了不同成藏动力系统内油气优势运移路径的评价方法及有利探区的选择应存在差异。

参考文献:

- [1] CATALAN L, XIAOWEN F, CHATZIS I, et al. An experimental study of secondary oil migration [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(5): 638-650.
- [2] HINDLE E A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a three-dimensional model [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(9): 1451-1481.
- [3] 李明诚. 石油与天然气运移研究综述 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 3-10.
LI Ming-cheng. An overview of hydrocarbon migration research [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 3-10.
- [4] 刘震, 张善文, 赵阳, 等. 东营凹陷南斜坡输导体系发育特征 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 84-86.
LIU Zhen, ZHANG Shan-wen, ZHAO Yang, et al. Development of carrying bed systems in the south slope of Dongying sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 84-86.
- [5] 毕义泉. 东营凹陷滨县凸起南坡砂砾岩体成因模式与成藏规律 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002, 26(4): 12-15.
BI Yi-quan. Sandbody formation models and pool-formation in the southern slope of Binxian prominence of Dongying sag [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(4): 12-15.
- [6] 赵文智, 何登发, 瞿辉, 等. 复合含油气系统中油气运移流向研究的意义 [J]. 石油学报, 2001, 22(4): 7-12.
ZHAO Wen-zhi, HE Deng-fa, QU Hui, et al. Study on the pathways of hydrocarbon migration of the composite petroleum system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4): 7-12.
- [7] 张林晔, 孔祥星, 张春荣, 等. 济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义 [J]. 地球化学, 2003, 32(1): 35-42.
ZHANG Lin-ye, KONG Xiang-xing, ZHANG Chun-rong, et al. High-quality oil-prone source rock in Jiyang depression [J]. Geochimica, 2003, 32(1): 35-42.
- [8] 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳坳陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因 [J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197-204.
ZHU Xiao-min, WANG Ying-guo, ZHONG Da-kang, et al. Pore types and secondary pore evolution of Paleogene reservoir in the Jiyang sag [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 197-204.
- [9] 郭兴伟, 施小斌, 丘学林, 等. 济阳坳陷新生代构造沉降特征 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(3): 6-11.
GUO Xing-wei, SHI Xiao-bin, QIU Xue-lin, et al. Characteristics of Cenozoic tectonic subsidence in Jiyang depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(3): 6-11.
- [10] 王建伟, 宋国奇, 宋书君, 等. 油气二次运移的驱动机制转换及其石油地质学意义——以牛庄洼陷及其南缘为例 [J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1423-1431.
WANG Jian-wei, SONG Guo-qi, SONG Shu-jun, et al. Transformation of driving mechanism for the second petroleum migration and its significance in petroleum geology—taking the Niuzhuang sag as an example [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10): 1423-1431.
- [11] 周东延, 李洪辉. “油气运移动态富集”概念及其在塔里木盆地油气勘探中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(1): 1-7.
ZHOU Dong-yan, LI Hong-hui. The concept of “petroleum migration and dynamic accumulation” and its application in petroleum exploration in cratonic area, Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(1): 1-7.
- [12] JOHNS R B. 沉积记录中的生物标志物 [M]. 王铁冠, 译. 北京: 科学出版社, 1991: 159-162.

(下转第 55 页)

- method [D]. Canada: University of Calgary, 2001.
- [12] 陈建江, 印兴耀, 张广智. 基于贝叶斯理论的振幅随偏移距变化三参数同步反演[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(3): 33-38.
CHEN Jian-jiang, YIN Xing-yao, ZHANG Guang-zhi. Simultaneous three-term AVO inversion based on Bayesian theorem [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(3): 33-38.
- [13] WANG S W, BANCROFT J C, LAWTON D C. Converted-wave (P-SV) prestack migration and migration velocity analysis [C]. USA: Society of Exploration Geophysics, 1997: 1575-1578.
- [14] BANCROFT J C, GEIGER H D, MARGRAVE G F. The equivalent offset method of prestack time migration [J]. Geophysics, 1998, 63(6): 2042-2053.
- [15] WANG W, PHAM L D. Converted-wave prestack imaging and velocity analysis by pseudo-offset migration [C/OL]. European Association of Geoscientists and Engineers, 2001, L-12. [http://www.pgs.com/upload/31116/Download%20printer%20friendly%20version%20\(1496Kb\).pdf](http://www.pgs.com/upload/31116/Download%20printer%20friendly%20version%20(1496Kb).pdf).
- [16] 殷文. 叠前弹性波反演非线性优化方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 45-49.
YIN Wen. Non linear optimization method on prestack elastic-wave inversion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3): 45-49.
- [17] 陈天胜, 刘洋, 魏修成. 纵波和转换波联合 AVO 反演方法研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(1): 33-37.
CHEN Tian-sheng, LIU Yang, WEI Xiu-cheng. Joint amplitude versus offset inversion of P-P and P-SV seismic data [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1): 33-37.

(编辑 修荣荣)

(上接第40页)

- [13] ORTOLEVA P. Basin compartmentation: definitions and mechanisms [J]. AAPG memoir, 1994, 60: 39-52.
- [14] 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 11-20.
HAO Fang, ZOU Hua-yao, JIANG Jian-qun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 11-20.
- [15] 隋凤贵. 东营断陷盆地地层流体超压系统与油气运聚成藏[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3): 17-23.
SUI Feng-gui. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying fault basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 17-23.
- [16] 王建伟, 宋书君, 王新征. 东营凹陷牛庄洼陷砂岩透镜体的成藏机理[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 39-59.
WANG Jian-wei, SONG Shu-jun, WANG Xin-zheng. Petroleum accumulation mechanism of lens-type sandstone in Niuzhuang subsag of Dongying sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 39-59.
- [17] 查明, 陈发景, 张一伟. 压实流盆地流体势场与油气运聚关系——以东营凹陷为例[J]. 现代地质, 1996, 10(1): 106-110.
ZHA Ming, CHEN Fa-jing, ZHANG Yi-wei. Fluids potential field and hydrocarbons migration and accumulation in compactional flow basins—an example from Dongying depression [J]. Geoscience, 1996, 10(1): 106-110.

(编辑 徐会永)

(上接第45页)

- [8] 殷文. 叠前弹性波反演非线性优化方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 45-49.
YIN Wen. Nonlinear optimization method on prestack elastic-wave inversion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3): 45-49.
- [9] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: theory and methods [M]. 1 ed. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980: 100-170.
- [10] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations [J]. Geophysics, 1985, 50(4): 609-614.
- [11] GASSMANN F. Über die elastizität poröser medien: Vierteljahrsschr [J]. Der Naturforsch Gesellschaft Zurich, 1951, 96: 1-21.
- [12] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid I: low frequency range [J]. Acoust Soc Am, 1956a, 28: 169-178.
- [13] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid II: high frequency range [J]. Acoust Soc Am, 1956b, 28: 179-191.

(编辑 修荣荣)