

文章编号: 0253-9985(2007)02-0287-06

惠民凹陷沙河街组三段岩性油藏储层 孔隙结构特征及油气意义

张小莉^{1,2}, 查明³, 杨懿^{1,2}

(1. 西北大学 地质学系, 陕西西安 710069 2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069
3. 中国石油大学 山东东营 257061)

摘要: 按照 Edward D. Pittman 的方法对惠民凹陷沙河街组三段储层的压汞曲线重新处理, 确定了峰点孔喉半径, 建立了峰点孔喉半径与孔隙度、渗透率之间的关系, 分析其峰点孔喉半径与含油性间的关系, 表明惠民凹陷沙河街组三段为常压背景下的岩性圈闭或构造-岩性圈闭, 若具备油源供给, 圈闭中含油砂层的最小峰点孔喉半径取决于油柱高度。临南洼陷深凹区沙河街组三段为明显超压区, 其岩性圈闭中含油砂岩的最小喉道半径取决于圈闭幅度和压力条件。砂岩峰点孔喉半径与其含油性之间的关系实际上反映了不同盆地成藏动力条件。在具备油源供给和圈闭的情况下, 峰点孔喉半径是反映不同成藏条件下砂岩中是否聚集油气的重要条件。

关键词: 储层孔隙结构; 峰点孔喉半径; 异常压力; 负压; 油气聚集; 惠民凹陷

中图分类号: TE112.2 文献标识码: A

Pore structure features of lithologic reservoirs in the third member of Shahejie Formation in Huimin sag and their significance in petroleum exploration

Zhang Xiaoli¹, Zhang Ming², Yang Yi¹

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

2. State Key Laboratory for Continental Dynamics Northwest University, Xi'an 710069

3. China University of Petroleum • East China, Dongying, Shandong 257061)

Abstract By adopting the method proposed by Edward D. Pittman in reprocessing the mercury injection curves obtained from reservoirs in the third member of Shahejie Formation in Huimin sag the apex versus pore apertures are determined and their relationship with porosities and permeabilities is established. An analysis of the relationship between the apex versus pore aperture and the hydrocarbon enrichment indicates that reservoirs in

收稿日期: 2007-02-06

第一作者简介: 张小莉 (1968-), 女, 副教授, 博士, 石油地质、测井资料处理与解释

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划 (编号 RT0559) 与国家自然科学基金 (40474045) (联合 PP 波和 PS 波各向异性弹性参数分布反演) 联合资助

储层孔隙结构决定储层微观孔隙内流体运移与聚集。Washburn(1921)首次建议利用实验室压汞实验确定岩石孔喉分布^[1]。Schowalter通过压汞电导率研究认为汞饱和度为 10% 时的压力为排替压力^[2]。而 Katz 和 Thompson(1984 1985)则把门限压力定为汞能形成整个岩样连通通道时的压力,并指出实测门限压力对应于压汞曲线图上的拐点(压汞曲线上凸的地方)^[3]; Edward D(1992)对压汞曲线进行重新变换,以汞饱和度除以压力为纵坐标,汞饱和度为横坐标绘图,压汞曲线为双曲线型,压汞曲线的峰点所对应的孔喉半径称为峰点孔喉半径(apex versus pore aperture),并认为该值对油气圈闭具有重要意义。储层峰点孔喉半径的物理意义是单位压差下进汞量最大的位置。峰点处于优势孔径分布区间。所以一旦油气突破峰点孔喉半径,含油饱和度能迅速增加,也只有突破峰点孔喉半径,储层才成为有效的油层。

1 储层孔隙结构特征

惠民凹陷包括滋镇洼陷、中央隆起带、临南洼陷、惠民南斜坡、里则镇洼陷、阳信洼陷等构造单元。其中,岩性油藏中多为层状油层,油层与水层、干层间互出现。那么,砂层含油与否的控制因素是什么?很多学者进行了探索并从不同方面得出一些认识^[4~7]。总体看,若具备油源供给,根据“短板效应”,砂岩是否可以成为输导层或富集油气,受其油气渗滤过程中最大阻力控制,也就是受控于储层孔喉半径。

中央隆起带基山砂体、临南洼陷、夏口断裂带附近,以岩性油藏和构造-岩性油藏为主^[8]。基山砂体主要为极细粒岩屑长石砂岩和细粒岩屑长石砂岩,孔隙度 9.0%~23.0%,渗透率 $0.16 \times 10^{-3} \sim 20.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔喉半径 $0.17 \sim 0.52 \mu\text{m}$,排驱压力 0.5~1.5 MPa。临南洼陷沙河街组三段储层以中-细粒岩屑长石砂岩为主,孔隙度 5.6%~30.9%,渗透率 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1765.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均孔喉半径 $0.12 \sim 10.89 \mu\text{m}$,排驱压力 0.002~10.0 MPa。夏口断裂带,砂岩孔隙度 15.2%~22.5%,渗透率 $50.0 \times 10^{-3} \sim 1160.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。物性、压汞实验结果反映,沙河街组三段砂岩储层孔隙结构复杂,非均质性强。

基山砂体、临南洼陷、夏口断裂带沙河街组三

段样品的压汞曲线,按照 Edward D P的方法进行了重新整理。结果表明,10口井中沙河街组三段 45 条压汞曲线中,44 条为双曲线。位于基山砂体的商 852 井、位于临南洼陷的夏 942 井沙河街组三段油层的压汞曲线特征如图 1 所示。根据处理后的压汞曲线,确定每一压汞曲线的峰点孔喉半径及对应的汞饱和度,同时确定汞饱和度为 35% 时对应的孔喉半径 r_{35} ,进而统计峰点孔喉半径(r_p)、孔喉半径 r_{35} 与 $\sqrt{k/p}$ 之间的关系,关系式为:

$$r_p = 7.5732(\sqrt{k/p})^4 - 22.639(\sqrt{k/p})^3 + 21.385(\sqrt{k/p})^2 - 5.2805(\sqrt{k/p}) + 0.623 \quad (1)$$

公式(1)相关性 $R^2 = 0.9459$ 样品数 45。

$$r_{35} = 5.8778(\sqrt{k/p})^4 - 16.707(\sqrt{k/p})^3 + 14.398(\sqrt{k/p})^2 - 2.3989(\sqrt{k/p}) + 0.2596 \quad (2)$$

公式(2)相关性 $R^2 = 0.8784$ 样品数 45。

式中: r_p 为峰点孔喉半径, μm ; r_{35} 为示饱和度为 35% 时对应的孔喉半径, μm ; k 为空气渗透率, $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ 为有效孔隙度, 小数。

统计关系表明,峰点孔喉半径 r_p 与 $\sqrt{k/p}$ 相关性最好,孔喉半径 r_{35} 与 $\sqrt{k/p}$ 相关性次之。

2 油气成藏动力特征

惠民凹陷压力-深度关系反映,地层压力在静水压力带附近较为集中,负压现象表现较明显,超压现象不明显,仅 3200 m 以下局部出现超压异常^[9]。惠民凹陷整体上流体压力方面的运移动力较弱(图 2)。综合前人研究成果认为,沙河街组三段除临南洼陷街斜 2、临 83、夏 50、夏 941 井所围限区域存在明显压力异常外,油气成藏主要动力是油水密度差产生的浮力(驱动力),浮力(驱动力)和毛细管压力(阻力)的相互作用下,引起油气运移与聚集。

浮力:

$$F = (\rho_w - \rho_o)Hg \quad (3)$$

毛细管力:

$$F_1 = 2\sigma_{ow} \cos\theta_{ow} (1/r_1 - 1/r_2) \quad (4)$$

油气成藏的必要条件为:

$$F \geq F_1 \quad (5)$$

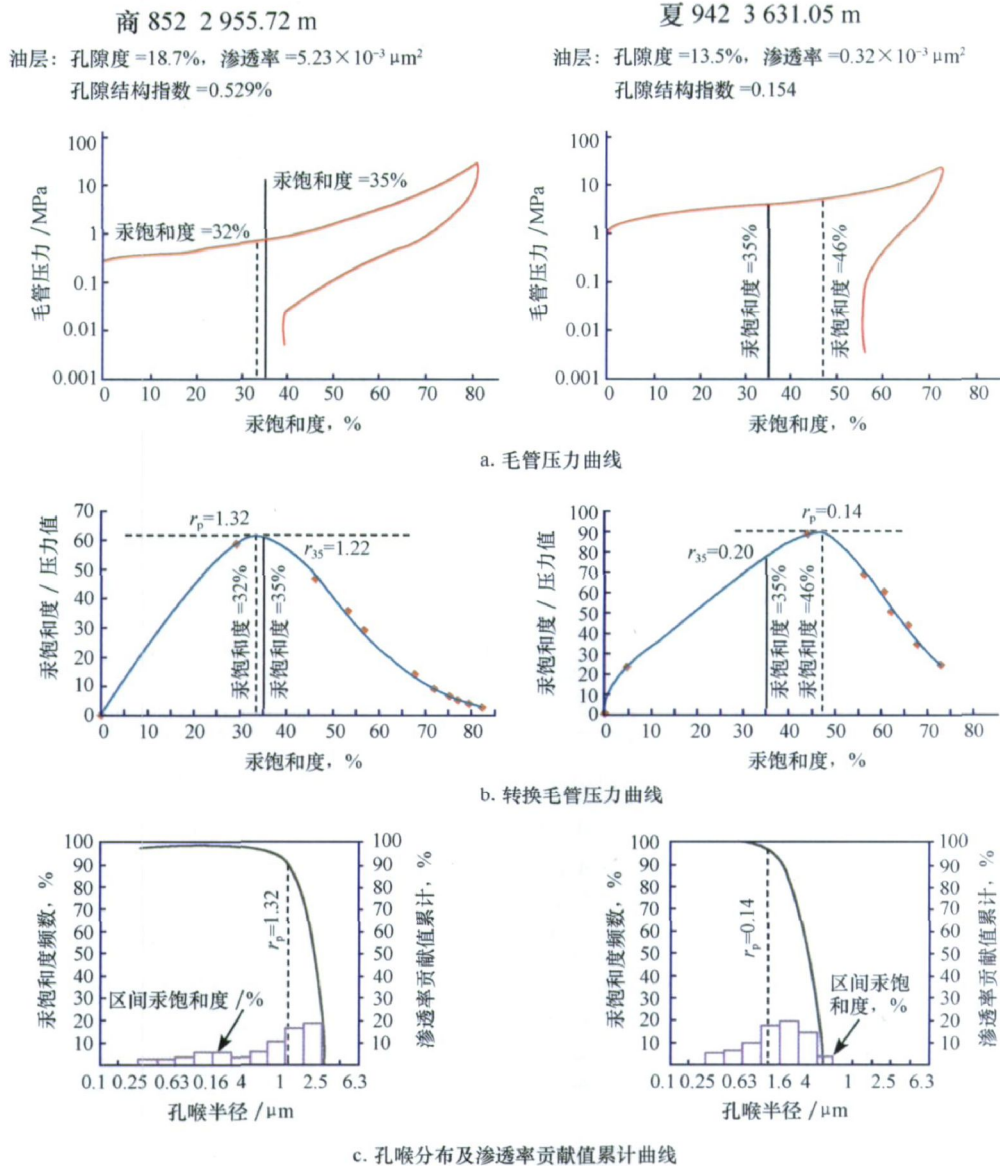


图 1 毛管压力曲线、孔喉半径分布与峰点孔喉半径特征

Fig. 1 Capillary pressure curve pore throat distribution and apex versus pore aperture

式中: ρ_w 为地层水密度, 10^3 kg/m^3 ; ρ_o 为地层原油密度, 10^3 kg/m^3 ; H 为油柱高度, m; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; σ_{ow} 为地层条件下油和水的张力, N/m; θ_{ow} 为油和水对岩石的润湿角, °; r_1 为喉道半径, m; r_2 为孔隙半径, m。

浮力大小取决于地层条件下油水密度差和油柱高度; 而影响阻力 (即毛细管力) 大小的主要因素是孔喉半径和油水界面张力、润湿角。根据润湿性分析结果和油层原油油藏地层流体分析、地层水分析结果, 计算出基山砂体、临南洼陷以及夏口断裂带附近沙河街组三段油层浮力梯度为 2.696 kPa/m 。那么, 当地下水性质变化不大时, 油柱越高, 浮力越大, 油气就能克服更大的毛

管阻力, 进入更小的孔隙, 孔喉半径越小的储层就有可能成为油层。根据临南洼陷及其周围地区的压汞分析资料、原油分析结果, 合理选取参数后计算油柱高度与最小孔喉半径关系 (表 1)。

在不考虑其他动力的情况下, 油柱高度 250 m 时, 含油储层喉道半径可达 $0.109 \mu\text{m}$ 。中央隆起带、临南洼陷以及夏口断裂带中, 构造圈闭幅度一般 $20 \sim 130 \text{ m}$, 个别构造圈闭幅度 $200 \sim 300 \text{ m}$, 构造-岩性圈闭幅度一般 $20 \sim 100 \text{ m}$, 岩性油藏圈闭幅度一般几米至几十米。根据上述特征推测, 常压或负压条件下, 若构造圈闭幅度为 100 m , 油源充足可以充满圈闭, 含油储层最小喉道半径约 $0.273 \mu\text{m}$ 。同理, 常压或负压条件下的岩性油藏

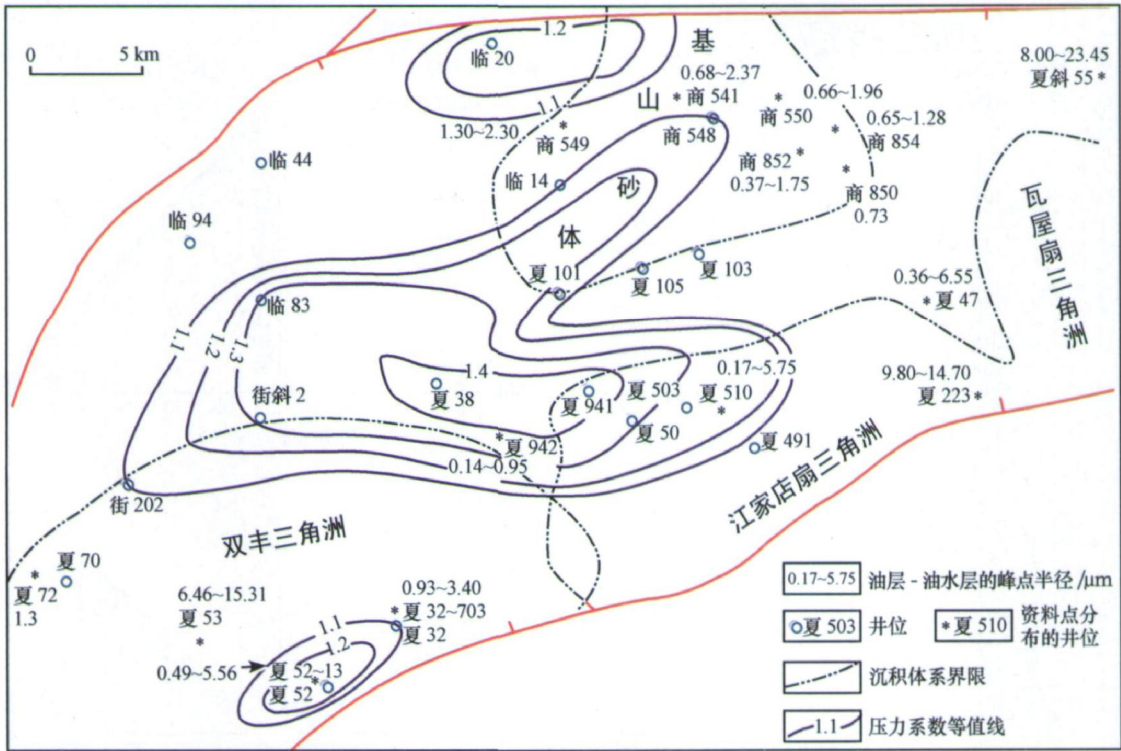


图 2 临南洼陷沙三段压力系数等值线及油层与油水同层的峰点孔喉半径特征

Fig. 2 Contour of pressure coefficient and characteristics of apex versus pore apertures of oil layers and oilwater layers in the third member of Shahejie Formation in Linnan sag

表 1 最小含油喉道半径与油柱高度关系

Table 1 Relationship between minimum oil-bearing throat radius and oil column height

油柱高度 /m	孔喉半径 / μm	油柱高度 /m	孔喉半径 / μm
0.46	59.877	91.20	0.299
0.50	54.608	100.00	0.273
2.00	13.652	125.00	0.218
4.56	5.988	136.80	0.200
5.00	5.461	150.00	0.182
10.00	2.730	175.00	0.156
15.00	1.820	182.40	0.150
20.00	1.365	200.00	0.137
22.80	1.198	225.00	0.121
25.00	1.092	250.00	0.109
50.00	0.546	275.00	0.099
75.00	0.364	300.00	0.091

中, 由于其圈闭幅度小于 100 m, 含油储层最小喉道半径应大于 0.273 μm 。

临南洼陷夏 942 井沙河街组三段 3 631.0~3 634.0 m 压裂后试油, 结果为油层。3 631.05 m 处压汞分析资料表明, 峰点孔喉半径 0.14 μm 。夏 942 井油层峰点孔喉半径较小这一特征反映, 除其与油柱高度有关外, 还与压力有关。压裂段储层被成熟烃源岩包裹, 且该区处于相对高压区 (图

2)。夏 942 井邻井夏 941 井 3 808.6~3 878.98 m 油页岩段测试折算日产油 6.67 t 静压 62.92 MPa 压力系数 1.69, 反映该区具有较强的动力条件。夏 942 井油层的峰点孔喉半径特征反映, 较强成藏动力条件下, 喉道半径较小的砂岩中同样可以聚集油气。

临南洼陷街斜 2、夏 942、夏 941、夏 50、夏 103、夏 105、夏 101 井区, 位于临南洼陷沙河街组三段深凹陷区, 该区沙河街组三段主要为三角洲前缘末端砂、滑塌浊积岩、深水浊积扇沉积砂体^[10]。砂体整体岩性细且较致密, 但由于大多呈透镜状或上倾尖灭状, 被烃源岩包裹或邻近烃源岩, 又处于相对高压区域, 虽然其储集性能相对差, 但是由于具有充足的油源和足够的成藏动力条件, 在较小喉道半径的砂岩储层中, 可以聚集油气形成岩性油藏。因此, 系统分析储层特征及其成藏动力条件之间的匹配关系, 有利于油气富集区域的分析评价。

3 储层孔喉分布及其含油性

惠民凹陷与岩性油藏有关的产层统计结果表

明,大部分油层的峰点孔喉半径分布优势区域为 $0.65 \sim 6.00 \mu\text{m}$; 油水同层的峰点孔喉半径分布优势区域为 $0.30 \sim 5.0 \mu\text{m}$; 含油水层的峰点孔喉半径分布优势区域为 $0.20 \sim 0.90 \mu\text{m}$; 水层的峰点孔喉半径分布存在 $0.10 \sim 0.30 \mu\text{m}$, $0.65 \sim 1.00 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \sim 6.00 \mu\text{m}$ 3个优势区域; 干层与油干层的峰点孔喉半径分布区域为 $0.30 \sim 0.5 \mu\text{m}$ (图3)。油层、油水同层所对应的储层峰点孔喉半径相对大,但夏942、夏510井油层的资料已经揭示,较小峰点孔喉半径的砂岩中,也富集油气,也就是说,油气富集除与储层条件有关外,还要考虑油气成藏动力条件。岩性油藏中的储层常常具有较小峰点孔喉半径。

因此,对于油气运移和聚集来说,烃源岩生成的油气从源岩排出之后,以非润湿相通过输导层驱替储层中水,最后到达毛细管压力大于油柱的浮力位置时,油气即被圈闭。为了评估油气运移和聚集能力,必须弄清导致油气聚集的孔喉大小。

惠民凹陷具有多物源、近物源特征^[11],基山砂体、江家店地区、临南洼陷内致密储层相对发育。在不同成藏动力条件下,随着成藏动力条件增强,含油层的最小峰点孔喉半径值相应减小,一些致密储层可以储存油气;反之,如果成藏动力条件较弱,最小峰点孔喉半径值相应就大。同时,砂岩孔隙结构的差异性,往往导致其含油性的差异,在一定成藏动力条件下,只有储层峰点孔喉半径大于某一临界值,储层才能聚集成藏,峰点孔喉半径大小决定了储层内是否有油气聚集。对于透镜状砂

体和上倾尖灭砂体,由于一般被烃源岩包裹,且大多位于有效烃源岩发育区,油源供给充足,并且具有一定的成藏动力条件,因此,储层孔隙结构特征成为控制其成藏的主要控制因素。

4 结 论

1) 沙河街组三段储层孔隙结构复杂,在具备油源和岩性圈闭的情况下,岩性油藏中含油砂岩峰点孔喉半径分布于 $0.10 \sim 6.60 \mu\text{m}$,常压背景下, $0.65 \sim 6.6 \mu\text{m}$ 为油层和油水同层的峰点孔喉半径分布优势区域。油层与油水同层的峰点孔喉半径变化范围较大,反映了油气富集除与储层储集性能有关外,还与圈闭幅度及其他成藏动力条件有关。

2) 在一定成藏动力条件下,峰点孔喉半径决定了储层内是否有油气运移与聚集;在不同成藏动力条件下,成藏动力条件强,含油层的最小峰点孔喉半径值相应小,反之,如果成藏动力条件弱,最小峰点孔喉半径值大。峰点处在优势孔径分布区间,峰点孔喉半径是决定储层成藏的至关重要的孔喉位置。

3) 岩性油藏中砂体的峰点孔喉半径与含油饱和度间的密切相关,客观地反映了该区油藏的成藏动力。因此,研究峰点孔喉半径及其分布,同时结合地层压力分析、圈闭幅度分析等的综合评价,有利于寻找油气成藏规律及评价油气层。

4) 临南洼陷深凹陷区,砂体成因主要为滑塌

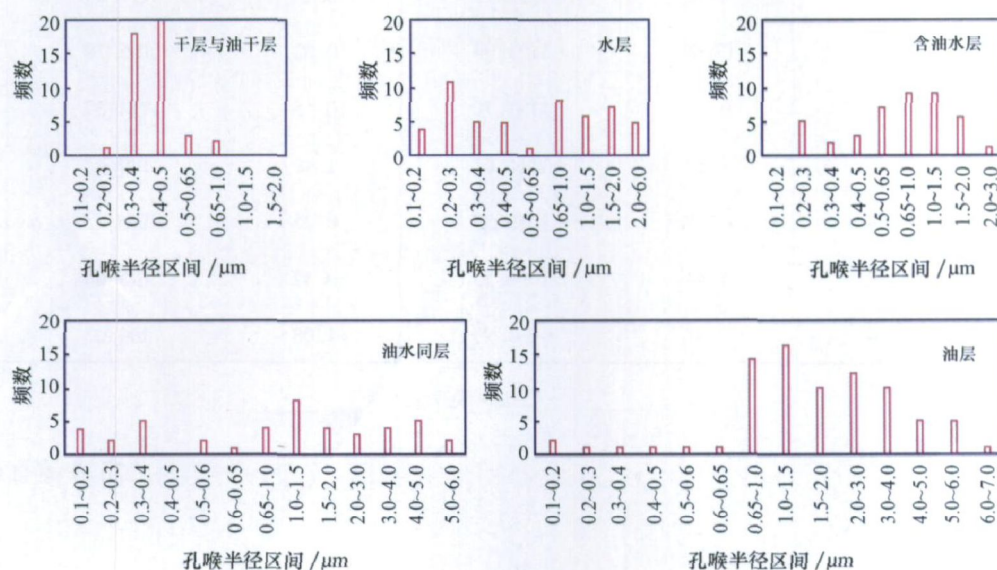


图3 峰点孔喉半径与含油性关系

Fig. 3 Relationship between apex versus pore apertures and hydrocarbon enrichment

浊积岩、深水浊积扇, 部分为三角洲前缘末端砂体, 储集物性整体中等—偏差, 但该区紧邻烃源岩, 又位于超压区, 具有较强的成藏动力条件, 因而在峰点孔喉半径较小的砂岩中富集油气而形成岩性油藏, 是寻找岩性油藏的有利区域。

参 考 文 献

- 1 Edward D P. Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection capillary pressure curves for sandstone [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76 (2): 191–198
- 2 Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment [J]. AAPG Bulletin, 1979, 63 (1): 723–760
- 3 Katz A J Thompson A H. Quantitative prediction of permeability in porous rock [J]. Physical Review Bulletin, 1986, 34 (3): 8 179–8 181
- 4 刘震, 赵阳, 金博, 等. 沉积盆地岩性地层圈闭成藏主控因素分析 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2006, 21 (4): 1~ 5
- 5 邱楠生, 万晓龙, 金之钧, 等. 渗透率级差对透镜状砂体成藏的控制模式 [J]. 石油勘探与开发, 2003, 30 (3): 48~ 51
- 6 高永进, 邱桂强, 陈冬霞, 等. 牛庄洼陷岩性油藏含油气性及主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25 (3): 284~ 287, 299
- 7 罗明高, 黄健全等. 油气在储层孔喉中的微观运移机理探讨 [J]. 沉积学报, 1999, 17 (2): 269~ 272
- 8 张宇, 邱桂强, 李趁义, 等. 惠民凹陷沙河街组三段岩性油藏勘探方向 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23 (2): 162~ 165
- 9 赵阳, 刘震, 戴立昌. 惠民凹陷临南洼陷异常低压与油气聚集的关系 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2004, 34 (6): 713~ 716
- 10 张小莉, 查明. 惠民凹陷临邑洼陷岩性油藏控制因素分析 [J]. 沉积学报, 2006, 24 (2): 289~ 293
- 11 张勇, 柳永清. 惠民凹陷西部老第三系沙河街组三段三角洲体系及砂岩体沉积特征和演化规律 [J]. 地质论评, 2001, 47 (3): 322~ 328

(编辑 高 岩)

表 1 近十年全球油气储量变化

1月 1日	世界原油 /10 ⁸ t	同比增长, %	欧佩克原油 /10 ⁸ t	同比增长, %	世界天然气 /10 ¹² m ³	同比增长, %
2007	1804. 72	1. 93	1236. 09	0. 08	175. 08	1. 15
2006	1770. 62	1. 16	1235. 15	1. 86	173. 08	1. 19
2005	1750. 34	0. 94	1212. 59	1. 80	171. 04	- 0. 46
2004	1733. 99	4. 36	1191. 12	6. 17	171. 84	10. 30
2003	1661. 48	17. 63	1121. 93	0. 02	155. 78	0. 92
2002	1412. 47	0. 26	1121. 70	0. 55	154. 37	3. 27
2001	1408. 85	1. 22	1115. 61	1. 49	149. 47	2. 57
2000	1391. 84	- 1. 76	1099. 29	0. 25	145. 73	0. 03
1999	1416. 80	1. 44	1096. 55	0. 42	145. 68	1. 15
1998	1396. 64	0. 07	1091. 97	1. 08	144. 03	2. 85

(高岩摘自《石油商报》)