

油气由断裂向砂体侧向分流能力定量评价方法 ——以渤海湾盆地饶阳凹陷留楚构造为例

王伟¹,孙同文¹,曹兰柱²,吕延防¹,付广¹,鲁秀芹²,邓玮¹,张桓¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院,黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油 华北油田分公司 勘探开发研究院,河北 任丘 062552)

摘要:在油田勘探中,判断油气由断裂垂向运移后侧向分流的优势层位十分重要,但目前缺少有效的评价方法。以渤海湾盆地饶阳凹陷留楚地区为例,在综合分析盖层厚度和断-砂接触面积等影响油气侧向分流能力因素的基础上,利用储层地震反演等地球物理技术建立了主要影响因素的求取方法,并系统分析圈闭充满度与各因素之间的相关性,优选出有效影响因素,然后综合有效因素建立断-砂侧向分流能力定量评价公式。结果表明:当断-砂侧向分流系数 R 大于0.3时开始发生油气侧向分流,并且 R 越大圈闭充满度越高,当 R 大于0.9时油藏为纯油层。利用断-砂侧向分流系数对F038和F008两条断层的侧向分流情况进行验证,结果与实际钻井情况吻合较好。

关键词:断-砂侧向分流;定量评价;油气运移;留楚构造;饶阳凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

An quantitative evaluation method of probability for diversion flow oil and gas laterally from faults to sand bodies: A case study from Leave Chu Structure in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

Wang Wei¹, Sun Tongwen¹, Cao Lanzhu², Lyu Yanfan¹, Fu Guang¹, Lu Xiuqin², Deng Wei¹, Zhang Huan¹

(1. College of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China)

Abstract: In hydrocarbon exploration, it is very important to identify the dominant strata for oil and gas lateral charge after vertical migration, but there is few effective evaluation method. This paper took Leave Chu area of the Raoyang Sag in the Bohai Bay Basin as an example. On the basis of comprehensive analysis on factors influencing oil and gas lateral diversion probability, such as caprock thickness and contact area between faults and sand bodies, evaluation methods of influence factors were established by using reservoir seismic inversion. Correlation between percentage of trap-filling and various selected factors was systematically analyzed to build quantitative evaluation equation for fault-sand lateral diversion probability. The results show that when fault-sand lateral diversion factor $R > 0.3$, oil and gas lateral diversion initiates. A positive correlation between the R and percentage of trap-filling is observed. Moreover, when $R > 0.9$, reservoirs are fully charged net pay zone. The factor R is applied to the faults F038 and F008, and the results are in good agreement with drilling data.

Key words: fault-sand lateral diversion, quantitative evaluation, oil and gas migration, Leave Chu Structure, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin

在断陷盆地下生上储构造区,油气往往围绕断裂在其两侧呈“多层楼”式分布,然而不同断裂或断裂两侧不同砂层之间油气富集的差异性很大,如何有效利用可操作的地质和物探资料研究油气侧向分流的层位,对解释油气垂向上差异分布及指导油气钻探目的层的选择具有重要意义。

前人对断-砂侧向分流油气的研究主要集中在物理实验模拟方面^[1-5],很少应用于油气勘探实践中,之

后一些学者在油气勘探中逐渐总结出“断-砂接触长度”等定性或半定量研究方法^[6],但过于简化断-砂之间的接触关系。付广(2014)定量评价了南堡凹陷中、浅层的断裂侧向分流油气能力,但评价公式中只考虑了断砂对接的储层条件的影响^[7]。在前人研究的基础上,本文综合考虑盖层条件、断裂条件以及砂岩输导层条件对影响油气侧向分流能力地质因素进行系统总结,阐述了各因素的求取方法。其中借鉴断层侧向封

收稿日期:2016-09-27;修订日期:2016-10-12。

第一作者简介:王伟(1985—),男,博士研究生,油气运移与保存条件。E-mail: yujian-zachj@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41602164);黑龙江省自然基金项目(QC2016048);东北石油大学研究生创新科研项目(YJSCX2015-003NEPU)。

闭性定量评价方法对上覆盖层段断裂带泥质含量进行计算,并在断面形态刻画的基础上,首次应用储层地震反演确定了三维断裂-砂体接触面积。通过对各因素与分流油气的充满度间的相关性分析,优选出相关性较高的参数并建立了定量评价公式,后期验证吻合度较高。此结果一方面可以合理地解释留楚地区油气富集规律,另一方面可为其他相似地区的勘探评价提供思路。

1 油气由断裂向砂体侧向分流能力的影响因素

在常压盆地中,油气沿油源断裂运移的主要动力为浮力,而当垂向运移受到的阻力大于向储层侧向运移的阻力时,油气发生侧向分流。综合前人实验室物理模拟及油田勘探实践结果,可知油气沿断裂向砂体侧向分流主要受以下6个方面因素影响(图1):①储层砂体厚度;②断层及储层倾角;③储层砂体物性;④储层砂地比;⑤储层上覆泥岩厚度;⑥储层上覆泥岩泥质含量。

1) 储层砂岩厚度

储层砂岩厚度越大,与断裂面的接触面积就越大^[4,7],那么油气进入储层通道空间就越大,油气侧向分流能力也越强(图1a)。

2) 断层及储层倾角

断层倾角越小,储层倾角越大,使浮力为主要驱动力的油气向储层运移的分力就越大^[8],油气越容易向储层充注(图1b)。

3) 储层砂体物性

在研究单砂体油气侧向分流能力时,砂体的孔隙度和渗透率表征了砂体物性的好坏,断砂接触的砂岩物性越好,其排替压力也越小,油气侧向分流能力就越强,如果研究某段储层的侧向分流能力,往往利用砂地比来代替孔、渗来表征储层条件^[8](图1c)。

4) 储层砂地比

储层砂地比越高,储层中砂岩所占的比例越高,油气侧向分流能力越强^[9](图1d)。

5) 储层上覆泥岩厚度

储层上覆泥岩厚度的大小是影响油气能否继续沿断裂向上运移的关键因素^[4],断裂两盘储层上覆泥岩厚度越大,断裂在形成时,落入断裂带内的泥岩也就越多,断裂带内泥质含量越大,致使断裂带上覆的排替压力也越大,使油气继续向上运移的阻力变大(图1e)。

6) 上覆泥岩泥质含量

上覆泥岩泥质含量越高,断裂形成时落入断裂带内泥岩的泥质含量也越高,导致储层之上断裂带内排替压力也越大^[10](图1f)。

通过对前人研究成果的分析,有一些参数可以进行优化,例如储层砂岩厚度可以通过增加断层面与储层砂体的对接面积来提高油气的侧向分流能力,可以利用地球物理相关技术手段直接求取断砂接触面积来表征油气的侧向分流能力。因此在总结分析上述影响因素的基础上,本文又提出了两个可能更好地表征油气侧向分流能力的参数(图2):储层上覆断裂带内泥质含量和断砂对接面积。

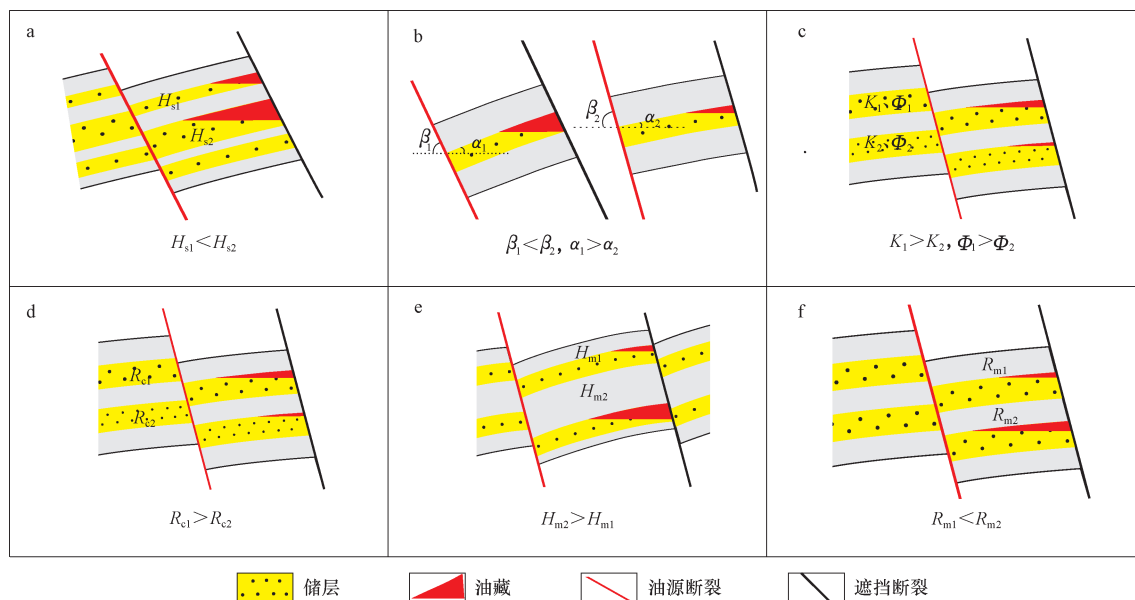
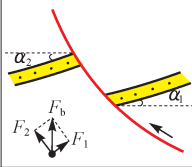
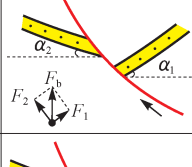
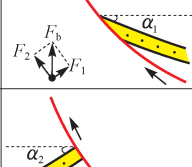
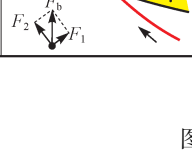


图1 影响断-砂侧向分流油气能力的各种地质因素模式

Fig. 1 Various geological factors influencing fault-sand lateral diversion probability of oil and gas

a. 储层砂岩厚度; b. 断层及储层倾角; c. 储层物性; d. 砂地比; e. 上覆泥岩厚度; f. 上覆泥岩泥质含量

类型	剖面形态	断裂-砂体配置类型	充注特征	留楚构造典型实例 (按油源断裂)
I		反“正”断层	在 F_1 作用下上盘砂体可发生顺层充注,而下盘砂体与 F_2 近垂直,油气充注作用很弱,形成上盘强充注、下盘弱充注	f009 f037 f097 f074 f008-1 f014 f010 f008 f075 f003 f002 f001 f015 f007 f022 f005 f004 f012 f076 f006 f160 f038 f054 f095 f016 f047
II		反“屋脊式”正断层	在 F_1 和 F_2 作用下,上盘和下盘砂体均可发生顺层充注,形成上、下盘强充注	f10-6e
III		顺向正断层	F_1 与上盘砂体近于垂直,油气充注作用很弱,而在 F_2 作用下,下盘砂体可发生顺层充注形成上盘弱充注、下盘强充注	f10-7 f062
IV		“屋脊式”正断层	F_1 和 F_2 与上、下盘砂体近垂直,油气充注作用均很弱,形成上、下盘弱充注	不发育

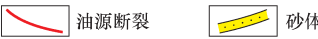


图 5 留楚地区断裂-砂体配置类型分类

Fig. 5 Classification of fault-sand configuration type in Leave Chu area

α_1 : 断层上盘储层倾角; α_2 : 断层下盘储层倾角; F_b : 浮力; F_1 : 浮力向储层运移分力; F_2 : 浮力沿断裂运移分力

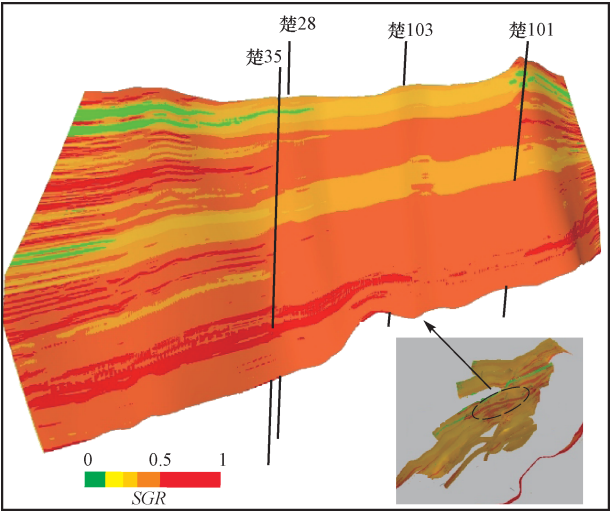


图 6 留楚地区 f037 断层断面泥质含量

Fig. 6 Shale content of f037 fault surface in Leave Chu area

式中: S_c 为断砂接触面积, m^2 ; P_c 为砂体网格数,个; P_d 为所有网格数,个; S_d 为断储接触积, m^2 。

2.2.3 其他因素求取

储层砂岩厚度和储层上覆泥岩厚度可以利用反演结果结合井资料进行求取,储层上覆泥岩含量可利用自然伽马测井资料由文献[22]中泥质含量求取方法获得。储层砂岩的物性资料由于井资料和地震解释精度的限制,无法进行物性反演,所以只能从井上获取。

断层及储层倾角可以在地震解释结果中读取(表 1)。

3 参数有效性分析及评价公式的建立

3.1 参数有效性分析

通过前人的大量研究可以看出,不同地区影响油气侧向分流能力的因素不尽相同,这与不同地区的地质条件有关,因此必须综合考虑地质研究中可操作的所有可能影响侧向分流能力的地质因素,分析各个地质参数对分流能力的贡献大小,才能够清晰、准确地建立数学公式,提高定量评价的准确性和可操作性。

充满度是指油藏油柱高度与圈闭闭合高度的比值^[4]。通过建立东营组二段和三段 6 个含油储层 64 个圈闭的充满度与主要影响因素之间的统计关系(表 1),利用最佳的拟合相关系数,可以反映这些影响因素表征油气侧向分流能力的有效性。由于各层段部分圈闭为水层或干层,其圈闭充满度为 0,但是在单因素分析时,该圈闭无油气充注的原因可能是由于某一地质因素造成的。在单因素分析时,充满度为 0 的数据不参与统计分析,以避免某一个不利因素对其它因素相关性分析的干扰。

上覆断裂带泥质含量(图 9a):该参数与充满度为正相关关系,与预想的结果一致,二者的相关系数为 0.613,对油气侧向分流有重要的贡献。

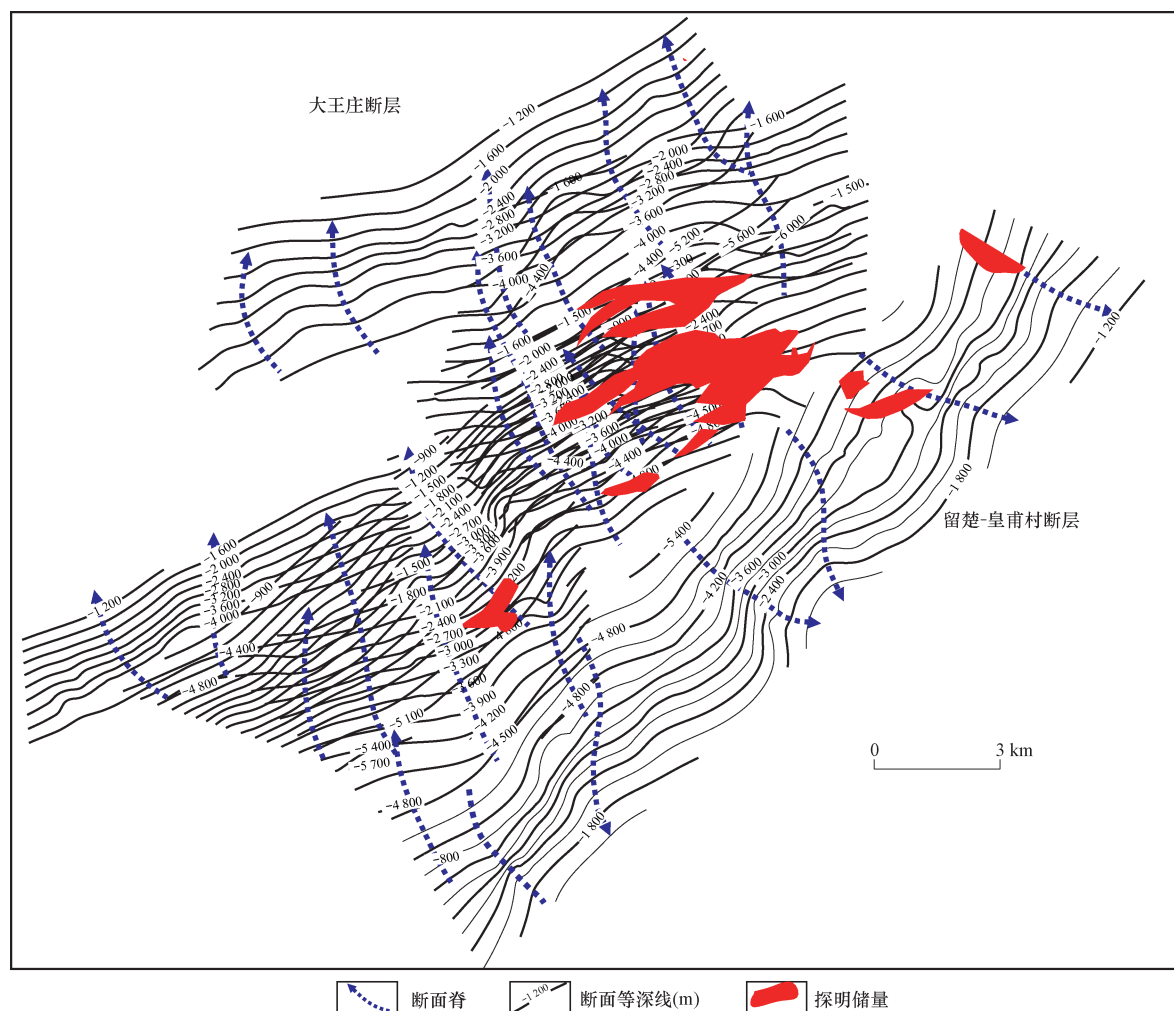


图7 留楚地区主要油源断裂古断面埋深及垂向优势运移路径分布

Fig.7 Buried depth of ancient fault surface of major oil-migrating faults and dominant vertical migration path in Leave Chu area

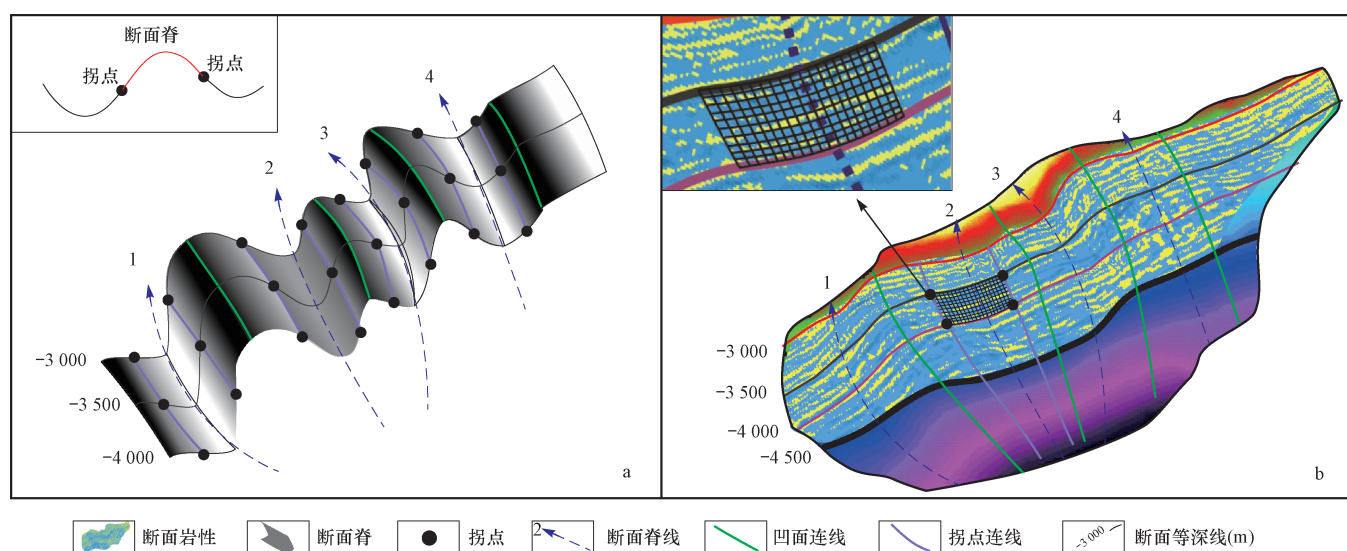


图8 储层地震反演方法求取断-砂接触面积

Fig.8 Fault-sand contact area calculation by using reservoir seismic inversion

a. 断-砂接触范围确定; b. 网格设置求取断-砂接触面积

表 1 留楚构造影响油气侧向分流能力因素

Table 1 Influence factors on oil and gas lateral flow diversion probability in Leave Chu Structure

井名	层位	油源断裂	储层上覆 断裂带砂 质含量(R_m)	砂地比 (R_c)	断-砂接触 面积(S_c)/ (10^4m^2)	储层砂岩 厚度 (H_s)/m	上覆泥岩 厚度 (H_m)/m	储层上覆 泥岩泥质 含量(R_n)	断层倾角 正弦值 ($\sin\beta$)	储层倾角 正弦值 ($\sin\alpha$)	侧向输导 系数(R)	充满度
楚 101	$Ed^{2(1)}$	f007	0.50	0.17	8.0	8.00	141.1	0.26	0.79	0.53	0.47	0.40
楚 101	$Ed^{2(2)}$	f007	0.52	0.31	8.8	6.97	117.0	0.76	0.79	0.60	1.08	0.50
楚 101	$Ed^{2(3)}$	f007	0.40	0.25	7.0	5.28	49.5	0.57	0.80	0.59	0.52	0.13
楚 101	$Ed^{3(1)}$	f037	0.47	0.19	6.0	5.06	80.0	0.54	0.93	0.62	0.35	0.34
楚 101	$Ed^{3(2)}$	f037	0.48	0.22	9.3	9.88	105.0	0.41	0.94	0.59	0.61	0.60
楚 101	$Ed^{3(3)}$	f037	0.58	0.29	9.6	12.28	130.6	0.56	0.94	0.60	1.02	0.68
楚 45	$Ed^{2(1)}$	f008_1	0.59	0.39	8.9	9.44	184.0	0.76	0.98	0.48	1.02	0.79
楚 45	$Ed^{2(2)}$	f008_1	0.49	0.22	7.0	4.91	77.0	0.48	0.98	0.52	0.40	0.20
楚 103	$Ed^{2(1)}$	f037	0.35	0.20	6.1	1.79	60.0	0.17	0.97	0.67	0.30	0.02
楚 103	$Ed^{2(2)}$	f037	0.51	0.29	4.9	2.70	77.0	0.32	0.97	0.64	0.47	0.32
楚 103	$Ed^{3(1)}$	f037	0.56	0.34	9.7	11.00	128.0	0.64	0.97	0.64	1.22	0.67
楚 105	$Ed^{2(3)}$	f077	0.49	0.24	8.2	13.10	119.0	0.40	0.98	0.57	0.57	0.40
楚 105	$Ed^{3(1)}$	f077	0.48	0.21	7.2	2.16	105.0	0.42	0.99	0.59	0.44	0.22
楚 105	$Ed^{3(2)}$	f077	0.49	0.35	9.6	6.55	128.6	0.53	0.99	0.57	0.97	0.60
楚 107	$Ed^{2(1)}$	f005	0.41	0.17	7.5	4.17	79.5	0.50	0.97	0.60	0.32	0.15
楚 107	$Ed^{3(1)}$	f005	0.50	0.18	6.7	2.54	137.5	0.55	0.97	0.60	0.38	0.26
楚 107	$Ed^{3(3)}$	f005	0.47	0.29	6.2	8.37	77.5	0.39	0.97	0.60	0.53	0.30
楚 17	$Ed^{2(1)}$	f095	0.54	0.17	8.0	15.22	123.6	0.41	0.95	0.57	0.45	0.40
楚 18X	$Ed^{3(1)}$	f010	0.53	0.33	10.7	7.30	121.3	0.64	0.91	0.56	1.15	0.68
楚 18X	$Ed^{3(2)}$	f010	0.46	0.23	7.5	6.00	136.0	0.55	0.91	0.54	0.48	0.43
楚 18X	$Ed^{3(3)}$	f010	0.55	0.35	12.0	10.07	200.0	0.73	0.91	0.54	1.39	0.77
楚 28	$Ed^{2(1)}$	f005	0.51	0.20	4.9	7.41	64.5	0.15	0.97	0.62	0.32	0.28
楚 28	$Ed^{3(1)}$	f006	0.60	0.34	11.0	18.00	150.0	0.55	0.97	0.53	1.22	0.86
楚 28	$Ed^{3(2)}$	f006	0.33	0.21	7.0	3.30	97.5	0.44	0.98	0.64	0.32	0.15
楚 28	$Ed^{3(3)}$	f006	0.42	0.19	6.8	2.47	153.7	0.27	0.98	0.63	0.35	0.24
楚 29	$Ed^{2(1)}$	f007	0.45	0.30	7.0	4.63	63.0	0.37	0.78	0.52	0.63	0.25
楚 29	$Ed^{2(2)}$	f007	0.51	0.28	6.5	13.97	103.8	0.41	0.82	0.54	0.62	0.43
楚 29	$Ed^{3(2)}$	f037	0.50	0.35	11.3	15.14	160.0	0.57	0.93	0.53	1.12	0.63
楚 29	$Ed^{3(3)}$	f037	0.47	0.34	9.3	15.47	154.8	0.41	0.92	0.52	0.83	0.44
楚 30	$Ed^{2(3)}$	f016	0.58	0.19	6.2	2.25	80.0	0.51	0.97	0.53	0.38	0.30
楚 30	$Ed^{3(2)}$	f016	0.50	0.24	6.8	3.08	92.8	0.43	0.97	0.53	0.46	0.31
楚 32	$Ed^{2(3)}$	f015	0.54	0.18	5.3	6.70	50.0	0.35	0.98	0.59	0.31	0.24
楚 32	$Ed^{3(1)}$	f015	0.48	0.32	8.3	12.23	126.7	0.55	0.97	0.57	0.75	0.60
楚 34	$Ed^{2(3)}$	f077	0.33	0.21	8.1	1.87	37.0	0.16	0.98	0.52	0.30	0.03
楚 34	$Ed^{3(1)}$	f015	0.54	0.23	6.2	4.49	70.0	0.55	0.98	0.53	0.41	0.20
楚 34	$Ed^{3(2)}$	f015	0.65	0.35	11.0	7.78	112.2	0.65	0.98	0.48	1.24	0.81
楚 35	$Ed^{2(3)}$	f007	0.51	0.30	10.2	15.95	142.0	0.61	0.77	0.57	1.18	0.71
楚 35	$Ed^{3(1)}$	f007	0.55	0.28	8.0	17.68	114.6	0.70	0.81	0.59	0.90	0.67
楚 35	$Ed^{3(2)}$	f037	0.41	0.23	6.6	3.14	85.0	0.46	0.87	0.56	0.40	0.37
楚 39	$Ed^{2(1)}$	f047	0.55	0.23	4.7	7.54	81.5	0.35	0.66	0.50	0.45	0.40
楚 39	$Ed^{2(2)}$	f047	0.51	0.31	8.2	13.84	73.9	0.46	0.66	0.52	1.02	0.42
楚 39	$Ed^{2(3)}$	f047	0.40	0.22	5.3	2.53	40.0	0.43	0.71	0.52	0.34	0.02
楚 40	$Ed^{2(3)}$	f007	0.52	0.16	5.0	3.99	138.8	0.40	0.78	0.71	0.38	0.38
楚 40	$Ed^{3(1)}$	f007	0.53	0.31	9.9	10.54	121.3	0.57	0.81	0.72	1.45	0.70
楚 40	$Ed^{3(2)}$	f007	0.49	0.33	8.8	10.56	99.1	0.55	0.84	0.69	1.19	0.59
楚 41	$Ed^{3(1)}$	f006	0.43	0.29	6.1	8.93	154.3	0.44	0.97	0.64	0.50	0.27
楚 41	$Ed^{3(3)}$	f002	0.38	0.18	6.9	5.38	82.9	0.50	0.94	0.63	0.32	0.18
楚 43	$Ed^{2(1)}$	f095	0.51	0.25	6.0	4.58	119.5	0.46	0.94	0.81	0.66	0.46
楚 43	$Ed^{3(3)}$	f095	0.37	0.15	6.5	2.58	80.0	0.23	0.97	0.82	0.30	0.06

续表 1 留楚构造影响油气侧向分流能力因素

Table 1 Influence factors on oil and gas lateral flow diversion probability in Leave Chu Structure

井名	层位	油源断裂	储层上覆 断裂带砂 质含量(R_m)	砂地比 (R_c)	断-砂接触 面积(S_c)/ (10^4m^2)	储层砂岩 厚度 (H_s)/m	上覆泥岩 厚度 (H_m)/m	储层上覆 泥岩泥质 含量(R_n)	断层倾角 正弦值 ($\sin\beta$)	储层倾角 正弦值 ($\sin\alpha$)	侧向输导 系数(R)	充满度
楚 46	Ed ³⁽¹⁾	f016	0.51	0.26	9.2	8.74	60.3	0.53	0.96	0.69	0.89	0.40
楚 46	Ed ³⁽²⁾	f007	0.50	0.29	8.5	4.37	64.3	0.74	0.83	0.59	0.86	0.39
楚 46	Ed ³⁽³⁾	f007	0.60	0.38	10.5	11.77	116.5	0.62	0.91	0.56	1.47	0.79
楚 49	Ed ²⁽¹⁾	f016	0.51	0.24	5.2	6.94	88.5	0.54	0.96	0.54	0.36	0.30
楚 49	Ed ²⁽²⁾	f016	0.47	0.21	7.5	5.99	48.3	0.48	0.96	0.59	0.45	0.24
楚 49	Ed ³⁽¹⁾	f007	0.53	0.32	7.2	12.13	103.9	0.74	0.77	0.53	0.84	0.57
楚 49	Ed ³⁽²⁾	f007	0.45	0.24	4.6	8.65	85.4	0.26	0.77	0.56	0.36	0.13
楚 49	Ed ³⁽³⁾	f047	0.45	0.27	8.3	7.31	49.6	0.50	0.67	0.56	0.84	0.49
楚 53X	Ed ³⁽¹⁾	f054	0.63	0.36	10.4	21.76	160.6	0.76	0.87	0.50	1.36	0.82
楚 68X	Ed ³⁽¹⁾	f002	0.50	0.27	8.5	15.99	100.0	0.52	0.97	0.52	0.61	0.46
楚 68X	Ed ³⁽²⁾	f002	0.41	0.29	6.5	4.62	40.0	0.29	0.97	0.50	0.40	0.20
楚 68X	Ed ³⁽³⁾	f002	0.40	0.25	6.0	5.28	70.0	0.56	0.97	0.56	0.35	0.28
楚深 1	Ed ²⁽²⁾	f007	0.30	0.22	6.0	6.71	40.0	0.51	0.74	0.57	0.30	0.15
楚深 1	Ed ³⁽²⁾	f007	0.61	0.38	10.1	7.44	95.7	0.81	0.84	0.54	1.50	0.80
楚深 1	Ed ³⁽³⁾	f005	0.37	0.29	7.1	11.00	129.0	0.65	0.96	0.64	0.51	0.30

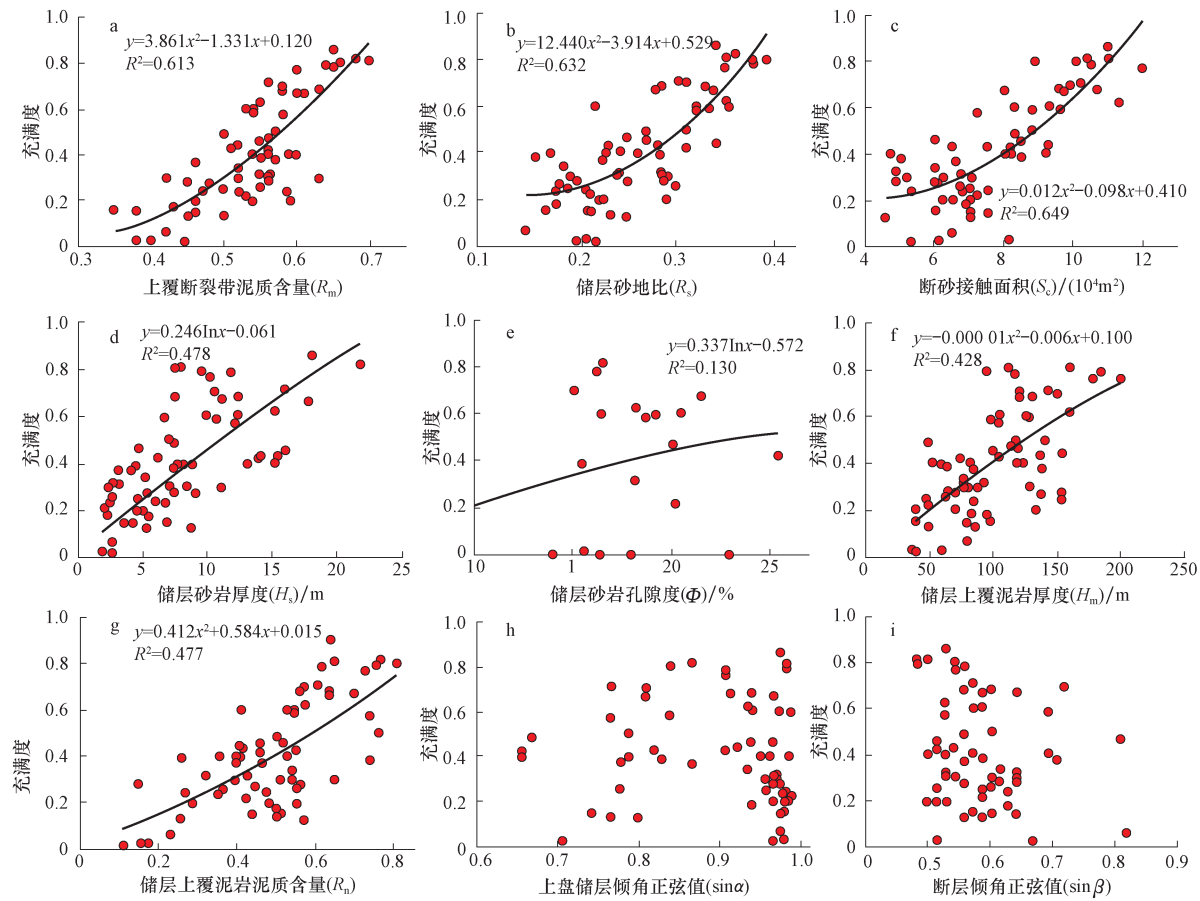


图 9 单一影响因素与圈闭充满度相关性

Fig. 9 Correlation between single influence factors and percentage of trap-filling

储层砂地比(图 9b):总体上砂地比越大,圈闭充满度越大,二者相关系数为 0.632,说明该参数能够较好的表征油气侧向分流的能力。

断砂接触面积(图 9c):该参数与充满度的相关性

最高,达到 0.649,总体表现为储层砂地比越大,充满度越高,说明该参数对油气侧向分流有重要的贡献。

储层砂岩厚度(图 9d):储层砂岩厚度与充满度统计关系表明,总体上充满度随着储层砂岩厚度越大,充

满度越大,但二者的相关性较差,拟合程度最高的对数关系系数仅为 0.478,说明储层砂岩厚度不足以反映油气侧向分流的能力。

储层砂岩孔隙度(图 9e):该参数数据点较少,充满度随着孔隙度的变化几乎不变,二者拟合程度最高的二次多项式相关性仅为 0.13,说明在研究某一段储层时,单砂体的孔隙度并不能代表整个储层的物性。

储层上覆泥岩厚度(图 9f):整体上表现储层上覆泥岩厚度越大,圈闭的充满度越高,但二者的相关性仅为 0.428,说明该参数不能很好的表征油气侧向分流的能力。

储层上覆泥岩泥质含量(图 9g):该参数与圈闭充满度总体上成正比,但相关系数较低,为 0.477,表明储层上覆泥岩泥质含量不能有效的表征油气侧向分流的能力。

断层上盘储层倾角及断层倾角的正弦值(图 9h,图 9i):理论上,油气沿断裂向反向断层的上盘储层冲注,断层倾角越小,储层倾角越大,其侧向分流能力就应该越强,但是通过相关性分析发现,两个参数与充满度基本上没有相关性。其它因素都是通过影响油气垂向或者侧向运移的阻力来对油气侧向分流能力产生影响,而断层和储层倾角直接影响着以浮力为主要运移动力的油气侧向分流的动力分量大小,因此有必要将这两个参数加入之后侧向分流能力评价公式的建立中。

3.2 评价公式建立

通过上述分析,确定了影响研究区油气侧向分流能力的因素为断砂接触面积、上覆断裂带排替压力及储层砂地比,据此定义了适合留楚地区的油气侧向分流系数 R ,如式 3 所示。

$$R = \frac{S_c R_m R_s \sin \alpha}{\sin \beta} \quad (3)$$

式中: S_c 为断砂接触面积, 10^4 m^2 ; R_m 为断裂带内泥质含量,小数; R_s 为储层砂地比,小数; α 为储层倾角, ($^\circ$); β 为断层倾角, ($^\circ$)。

对东营组 6 个含油储层 64 个油藏的断砂侧向分流能力系数进行计算并与充满度进行交汇分析(图 10)。结果显示:64 个层段的侧向分流系数介于 0.3 ~ 1.5,将侧向输导系数与充满度做交汇分析可以看出两者的相关度达到 0.811,说明侧向分流系数 R 较各单因素能够更好地反映油气侧向分流的能力,而且侧向分流系数越大,储层的含油性越好;当侧向分流系数 R 大于 0.3 时,油气开始向储层充注, R 介于 0.3 ~ 0.9 时,储层中油水同层、含油水层及油层均有分布,当 R 大于 0.9 时,储层为纯油层。

笔者将断层倾角和断层上盘储层倾角两个参数去除

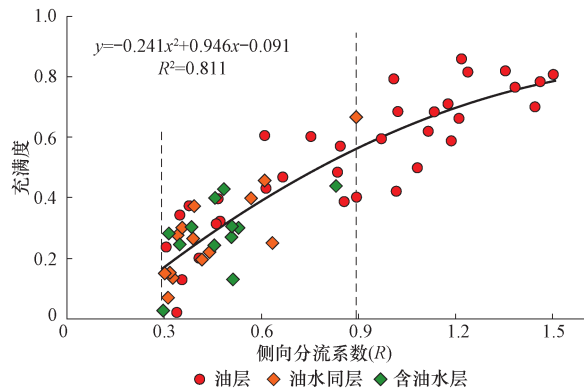


图 10 侧向分流系数与圈闭充满度关系

Fig. 10 Relationship between lateral diversion factor and percentage of trap-filling

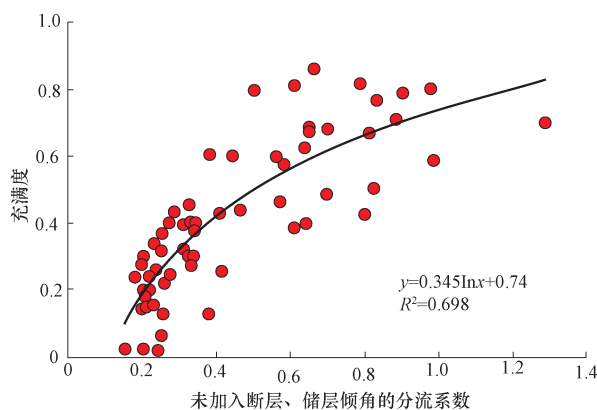


图 11 未加入断层倾角和储层倾角的侧向分流系数与圈闭充满度关系

Fig. 11 Relationship between lateral diversion factor (without inclination angle of faults and reservoirs) and percentage of trap-filling

后的侧向分流系数再次与充满度进行交汇分析(图 11),二者的相关系数降到 0.698,这也说明了虽然断层和储层倾角与充满度的相关性较低,但是当二者与其它影响因素配合时对油气侧向分流能力具有较大的影响,因此有必要将这两个参数加入侧向分流系数公式中。

4 评价公式验证

以未参与相关性分析的 f038 和 f008 两条断层进行验证,分别计算两断层供给油气的 9 个储层的侧向分流系数(图 12),与两条断层上盘对接的 $Ed^{3(1)}$ 段侧向输导系数分别为 0.81 和 1.01,钻井揭示两段储层均为油层,与 f038 断层上盘对接的 $Ed^{2(1)}$ 、 $Ed^{2(2)}$ 和 f008 断层对接的 $Ed^{2(2)}$ 的侧向分流系数分别为 0.12、0.22 和 0.11,低于油气侧向分流下限 0.3,均为水层或干层,其他层段的分流系数介于 0.48 ~ 0.71,钻井揭示储层为油水同层。两条断层侧向分流能力评价结果与油气勘探实际情况相吻合,证实该评价公式能够有效地评价留楚地区油气侧向分流能力。

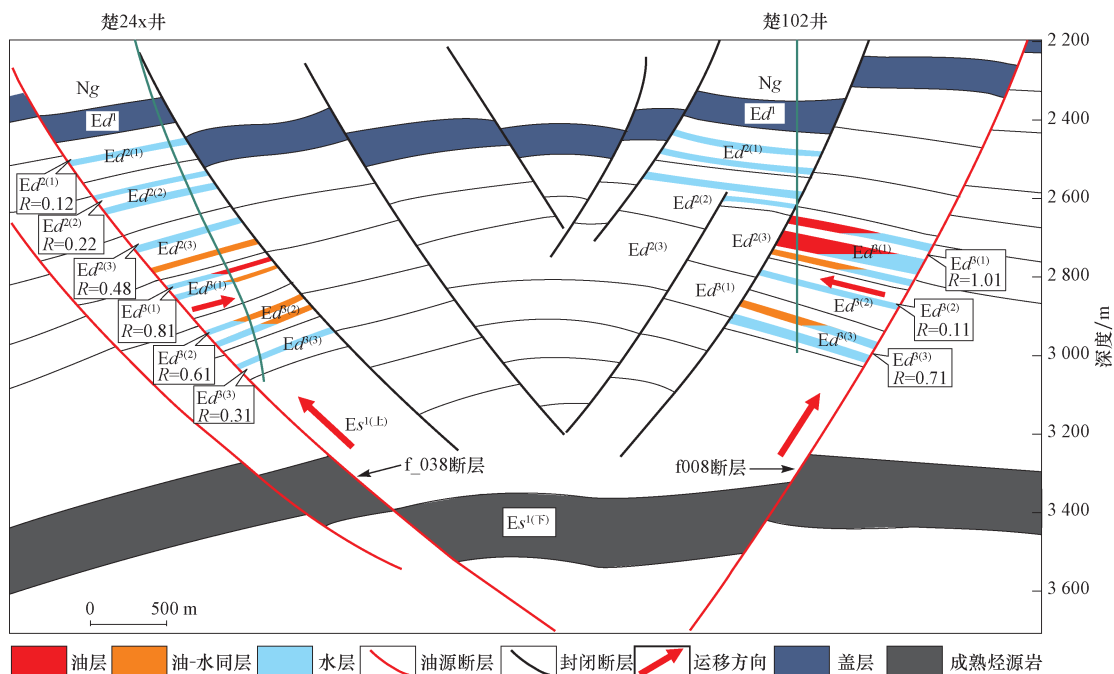


图12 油气侧向分流能力评价结果验证剖面

Fig. 12 Profile for verifying the evaluation method of oil and gas lateral diversion probability

Ng. 馆陶组; Ed^1 . 东营组一段; $Ed^{2(1)}$. 东营组二段一亚段; $Ed^{2(2)}$. 东营组二段二亚段; $Ed^{2(3)}$. 东营组二段三亚段; $Ed^{3(1)}$. 东营组三段一亚段; $Ed^{3(2)}$. 东营组三段二亚段; $Ed^{3(3)}$. 东营组三段三亚段; $Es^{1(上)}$. 沙河街组一段上亚段; $Es^{1(下)}$. 沙河街组一段下亚段

5 讨论及结论

本次研究的饶阳凹陷留楚构造属于常压型盆地,沙河街组一段下亚段源岩层不发育超压^[23],油气运移动力以浮力为主,因此利用该方法评价油气侧向分流能力时总体应用效果较好,但对于发育超压,油气主要是在压力作用下沿断裂幕式运移时,本论文所建立的评价公式不适用。

1) 在不同的含油气构造中,影响油气侧向分流能力的地质因素不尽相同,每种参数都可能涉及了某个特定地质因素的贡献,因而可以或多或少的表征油气侧向分流能力。然而,这些单因素往往不能够很好的表征油气侧向分流的能力,通过分析参数的有效性,然后利用最佳参数建立的评价公式,能够最大程度地表征油气侧向分流的能力。

2) 饶阳凹陷留楚构造勘探资料可获得的各种量化参数与充满度之间的统计表明,储层上覆断裂带泥质含量、断-砂接触面积以及储层砂地比是影响留楚构造油气侧向分流能力的主要地质因素。

3) 饶阳凹陷留楚构造侧向分流系数越大,储层的含油性越好;当侧向分流系数 R 大于 0.3 时,油气开始向储层充注,当 R 介于 0.3 ~ 0.9 时,储层中油层、油-水同层及含水层均有分布,当 R 大于 0.9 时,储层为纯油层。利用该评价公式对两条后验断层供给油气的

9 段储层进行验证,断-砂侧向分流能力评价结果与油气勘探实际情况相吻合,证实该评价公式能够准确地评价留楚地区油气侧向分流能力。

参 考 文 献

- [1] 曾溅辉,王洪玉. 反韵律砂层石油运移模拟实验研究[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 592-597.
Zeng Jianhui, Wang Hongyu. Experimental study of oil migration in coarsening upwards sands[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 592-597.
- [2] 曾溅辉. 正韵律砂层中渗透率级差对石油运移和聚集影响的模拟实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 102-105.
Zeng Jianhui. The study of simulated experiment of permeability ratio influencing hydrocarbon migration and accumulation in fining upwards sands[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 102-105.
- [3] 姜振学,庞雄奇,曾溅辉,等. 油气优势运移通道的类型及其物理模拟实验研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 507-516.
Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, Zeng Jianhui, et al. The research of oil and gas advantage migration pathway types and the physical simulation experiment[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 507-516.
- [4] 姜大朋,代一丁,刘丽华,等. 断裂输导油气的机制及侧向分流控制因素探讨[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 1023-1031.
Jiang Dapeng, Dai Yiding, Liu Lihua, et al. A discussion on fault conduit mechanism and control of petroleum lateral diversion[J]. Geoscience, 2014, 28(5): 1023-1031.
- [5] 李云伟. 油气沿断裂带运移过程中的侧向分流机理[J]. 内江科技, 2009, 30(6): 89-90.

- Li Yunwei. Lateral diversion mechanism of oil and gas migrating the fault zone[J]. *Neijiang Science & Technology*, 2009, 30(6): 89 – 90.
- [6] 张新涛,牛成民,黄江波,等. 黄河口凹陷渤中34区明化镇组下段油气输导体系[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(5): 27 – 30.
- Zhang Xintao, Niu Chengmin, Huang Jiangbo et al. Hydrocarbon migration of Bozhong34 in Lower Minghuazhen Formation, Huanghekou sag, offshore Bohai sea [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(5): 27 – 30.
- [7] 付广,孙同文,吕延防. 南堡凹陷断—砂配置侧向输导油气能力评价方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(1): 79 – 87.
- Fu Guang, Sun Tongwen, Lv Yanfang. An evaluation method of oil-gas lateral transporting ability of fault-sandstone configuration in Nanpu depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(1): 79 – 87.
- [8] 马中良,曾澌辉,郑伦举. 稳态充注下输导层交汇处油气运移路径的选择性[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(1): 89 – 93.
- Ma Zhongliang, Zeng Jianhui, Zheng Lunju. Hydrocarbon migration pathway in carrier layer junction based on steady filling[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(1): 89 – 93.
- [9] 孙永河,赵博,董月霞,等. 南堡凹陷断裂对油气运聚成藏的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(4): 540 – 549.
- Sun Yonghe, Zhao Bo, Dong Yuexia, et al. Control of faults on hydrocarbon migration and accumulation in the Nanpu Sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(4): 540 – 549.
- [10] 张文旗,王志章,侯秀林,等. 盖层封盖能力对天然气聚集的影响——以鄂尔多斯盆地大牛地气田大12井区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(6): 882 – 889.
- Zhang wenqi, Wang Zhizhang, Hou Xiulin, et al. Influences of caprock sealing capacity on natural gas accumulation: an example from D-12 wellblock of Daniudi gas field in Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6): 882 – 889.
- [11] 付晓飞,方德庆,吕延防,等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法[J]. *地球科学*, 2005, 30(3): 328 – 336.
- Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lv Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(3): 328 – 336.
- [12] 吴智平,陈伟,薛雁,等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性[J]. *地质学报*, 2010, 84(4): 570 – 578.
- Wu Zhiping, Chen Wei, Xue Yan, et al. Structural Characteristics of Faulting Zone and Its Ability in Transporting and Sealing Oil and Gas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 570 – 578.
- [13] 吴孔友,李思远,裴仰文,等. 准噶尔盆地夏红北断裂带结构及其封闭差异性评价[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 906 – 912.
- Wu Kongyou, Li Siyuan, Pei Yangwen, et al. Fault zone architecture of Xiaohong North Fault zone in Junggar Basin and its sealing properties[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 906 – 912.
- [14] 吕延防,王有功,付广,等. 珠江口盆地珠—坳陷断层圈闭钻探风险性评价[J]. *石油学报*, 2011, 32(1): 95 – 100.
- Lv Yanfang, Wang Yougong, Fu Guang, et al. Evaluation of the drilling risk of fault traps in the Zhu I Depression in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 95 – 100.
- [15] Atle Rotevatn, Haakon Fossen. Simulating the effect of subseismic fault tails and process zones in a siliciclastic reservoir analogue: Implications for aquifer support and trap definition[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(9): 1648 – 1662.
- [16] Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(8): 1451 – 1481.
- [17] Sibson R H, Moore J M, Rankin A H. Seismic pumping: a hydrothermal fluid transport mechanism [J]. *Journal of Geological Society*, 1975, 131(4): 653 – 659.
- [18] 易士威,蒋有录,范炳达,等. 渤海湾盆地饶阳凹陷古近系源岩特征与新近系油气来源[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(5): 475 – 479.
- Yi Shiwei, Jiang Youlu, Fan Bingda, et al. Neogene Petroleum Source and Characteristic of Paleogene Hydrocarbon Source Rock in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(5): 475 – 479.
- [19] 蒋有录,卢浩,刘华,等. 渤海湾盆地饶阳凹陷新近系油气富集特点与主控因素[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 791 – 796.
- Jiang Youlu, Lu Hao, Liu Hua, et al. Enrichment characteristics and major controlling factors of hydrocarbons in the Neogene of Raoyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(5): 791 – 796.
- [20] Yielding G, Freeman B, Needham D T. Quantitative Fault Seal Prediction[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(6): 897 – 917.
- [21] Knipe R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoir [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(2): 187 – 195.
- [22] 吴国平,苏江玉,成实,等. 基于自然伽马测井信号的维纳滤波法求取泥质含量[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2008, 33(4): 572 – 576.
- Wu Guoping, Su Jiangyu, Cheng Shi, et al. A method for obtaining shaliness using Wiener filtering based on logging data natural Gamma ray [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(4): 572 – 576.
- [23] 吕延防,付广. 冀中富油凹陷油气输导体系及其成藏贡献与有利勘探方向研究[R]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- Lv Yanfang, Fu Guang. Reach on hydrocarbon transport system and its contribution to hydrocarbon accumulation and favorable exploration direction in oil-rich sags of the Jizhong Depression [R]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.

(编辑 张玉银)