

图3 文安斜坡史各庄鼻状构造带断层分布图

断层对于油气的侧向运移起到至关重要的作用。在反向断层 F5 和顺向断层 F9 上、下盘分别选取文 103 井和文 20 井、文 102 和苏 71 井，利用断层上、下盘地层砂-砂并置识别方法及断层上、下盘并置模式，确定

反向断层 F5 和顺向断层 F9 在沙一段和沙二段砂-砂并置部位(见图 4)，并厘定其余断层(F1—F4、F6—F8)在沙一段和沙二段断层上、下盘砂-砂并置部位。

2.2 断层侧向启闭性确定

基于已厘定的史各庄鼻状构造带内断层上、下盘地层砂-砂并置部位，应用断层侧向启闭性判定方法，定量分析断层两侧地层内砂-砂并置处断层侧向启闭性。

2.2.1 断层侧向封闭油气下限确定

首先计算文安斜坡内断面 SGR 值。在研究区内选取 33 口试油井，提取控制试油井的断层断面 SGR 属性，根据试油资料确定 33 口试油井在沙一段和沙二段试油深度点共计 69 个。根据开发资料得到井的供油半径均为 50 m，确定每口井在沙一段和沙二段断面上的试油区域，并进一步筛选出沙一段和沙二段断面最小 SGR 值(见表 1)。依据统计学方法，厘定研究区内沙一段和沙二段断层侧向封闭油气的 SGR 下限值分别是 26% 和 29% (见表 1)。

2.2.2 油气跨断层侧向运移部位确定

在确定断层上、下盘地层砂-砂并置部位的基础上，以沙一段和沙二段内断层侧向封闭油气的 SGR 下限作为判定标准，定量分析砂-砂并置处断层侧向启闭

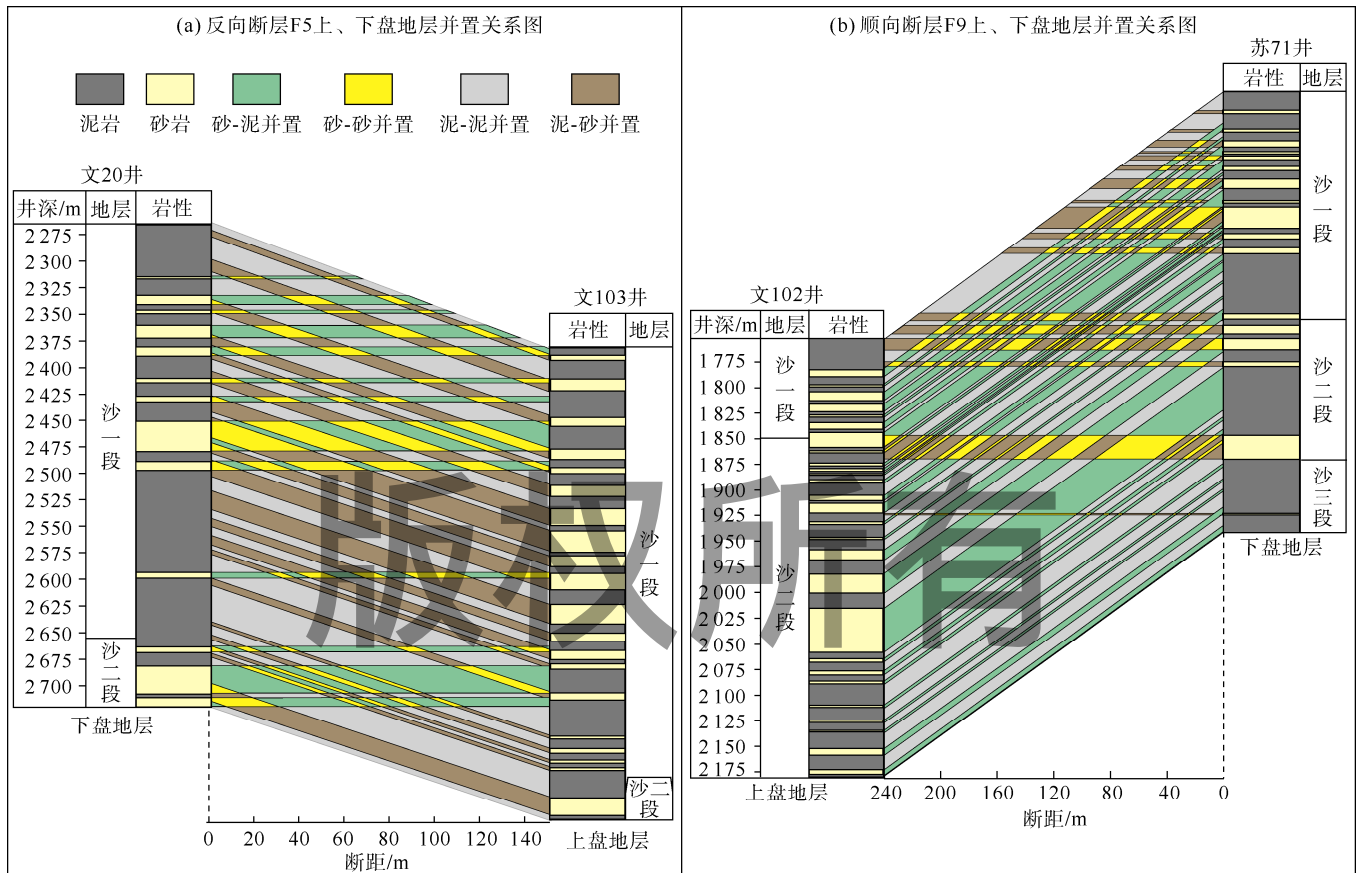


图4 文安斜坡史各庄鼻状构造带 F5 和 F9 断层上、下盘地层并置图

表 1 文安斜坡 33 口井断面上试油区域 SGR 值统计表

层位	井名	深度/m	含油气性	断距/m	累计滑过 泥岩厚度/m	SGR/%	层位	井名	深度/m	含油气性	断距/m	累计滑过 泥岩厚度/m	SGR/%
沙一段	文 45	2 446.0	油水同层	24	10.5	43.7	沙一段	苏 82x	2 578.4	含油水层	58	23.4	40.4
		2 522.6	油层	17	8.0	47.3			2 601.2	油水同层	51	22.6	44.4
	文 25	2 660.6	油水同层	49	8.7	17.7			2 707.0	油水同层	40	16.6	41.5
		1 419.0	油水同层	41	12.0	29.2			2 715.6	含油水层	39	15.4	39.4
	文 96	1 517.4	油水同层	36	10.2	28.6			2 752.0	油水同层	36	14.4	40.1
		1 532.6	水层	36	9.8	27.0			2 847.8	水层	28	10.0	35.7
	文 108	1 421.0	含水油层	40	11.7	29.2		文 13	1 899.8	水层	76	22.3	29.4
		1 453.6	油水同层	38	11.4	30.1			1 937.8	水层	65	18.1	27.8
	苏 88	1 482.0	含油水层	36	10.2	28.2		文 48	2 960.5	油层	63	24.4	38.8
		1 619.2	气层	19	5.6	30.3			3 064.6	含油水层	58	18.0	31.1
	苏 39	2 714.0	水层	41	13.0	31.7		文 64	3 207.1	含油水层	44	14.9	33.8
		3 082.5	含油水层	42	13.7	32.7			2 817.5	油层	51	17.9	35.1
	苏 42	2 389.2	油层	30	9.8	33.0		文 103	2 931.6	水层	48	13.9	28.9
		2 389.2	油层	30	10.8	35.8			2 959.8	油水同层	17	5.8	34.4
	苏 69x	2 399.8	油层	32	11.1	35.3		文 51	3 013.3	油水同层	43	13.9	32.4
		2 462.0	油层	31	10.7	34.6			2 272.8	水层	70	27.3	39.3
	苏 21	3 340.5	油水同层	96	18.8	19.6		文 103	2 402.0	水层	49	19.1	38.9
		3 403.0	水层	84	14.9	17.7			2 590.2	油水同层	43	16.9	39.2
文 16	2 550.0	油层	174	65.4	37.6	文 51	2 661.4	油层	35	13.6	38.9		
	2 699.4	含油水层	180	57.1	31.7		2 002.3	水层	89	28.9	32.5		
文 112	2 751.4	含油水层	190	57.2	30.1	苏 36	2 766.0	含油水层	151	46.1	30.5		
	1 969.0	含油水层	25	7.3	29.2		文 117	1 811.0	油层	85	30.8	36.2	
文 6	1 672.8	含油水层	35	12.8	36.6	文 119x	1 883.0	油水同层	87	28.8	33.1		
	1 932.2	含水油层	65	17.6	27.1	文 120x	2 057.0	含油水层	115	34.3	29.8		
文 96	1 697.0	水层	44	10.0	22.8	文 122x	2 137.0	油水同层	35	11.0	31.4		
	1 108	干层	36	6.4	17.6	文 31	2 383.0	油层	87	33.6	38.6		
苏 88	1 733.4	含油水层	31	8.8	28.4	文 40	2 341.0	含油水层	53	16.1	30.4		
	3 125.0	油水同层	23	8.8	38.4		文 72	2 126.0	含油水层	63	15.0	23.8	
苏 39	3 187.1	水层	26	8.5	32.7	文 90	2 176.0	含油水层	66	14.4	21.8		
	2 871.0	水层	203	62.3	30.7		2 889.0	含油水层	42	13.1	31.1		
文 110	2 949.0	油水同层	38	11.5	30.3	文 121	2 904.0	含油水层	34	10.2	29.9		
	3 085.0	含油水层	43	4.4	10.3		1 912.0	油层	59	21.5	36.4		
文 71	3 007.0	油层	33	14.6	44.1	文 86	1 922.0	油水同层	55	19.4	35.3		
	文 35	2 462.0	含油水层	80	33.8		42.3						
霸深 2	3 562.0	水层	72	13.4	18.6								

性。当沙一段、沙二段砂-砂井置部位断层的 SGR 值分别大于 26%、29% 时，断层侧向封闭，是油气聚集的有利部位；反之，断层侧向开启，有利于油气跨断层侧向运移（见图 5）。由此得到 F1—F9 断层在沙一段和沙二段侧向启闭的平面分布部位。断层侧向开启部位的平面分布仅是砂-砂井置部位在平面上的投影，还要同时考虑在剖面上油气跨断层侧向运移可能发生的部位。因此，过沙一段和沙二段断层侧向开启的平面部位截取剖面，利用断层侧向封闭油气下限，厘定油气跨断层侧向运移可能发生的部位。结果表明，F1—F9 断层在沙二段中下部皆存在断层侧向开启部位，而在沙一段仅 F2、F5、F6、F8 断层存在侧向开启段（见图 6），这些断层侧向开启处是油气侧向运移的有利部位。综上所述，

将平面和剖面上油气跨断层侧向运移部位结合起来，便可确定油气侧向运移大致路径（见图 5、图 6）。

3 应用效果适应性分析与验证

3.1 应用效果及适应性分析

文安斜坡史各庄鼻状构造带油气成藏期为明化镇组沉积期—现今。由沙二段油气跨断层侧向运移定量评价结果可知，F1—F9 断层在沙二段中下部砂-砂井置部位处皆是侧向开启的，不能侧向遮挡油气聚集成藏，但可作为油气跨断层侧向运移的有利通道。由沙二段试油资料可知，除了文 105 井和文 102 井未钻至沙二段，其余井均有油气显示，这与沙二段断层侧向启闭性评价结果相吻合。

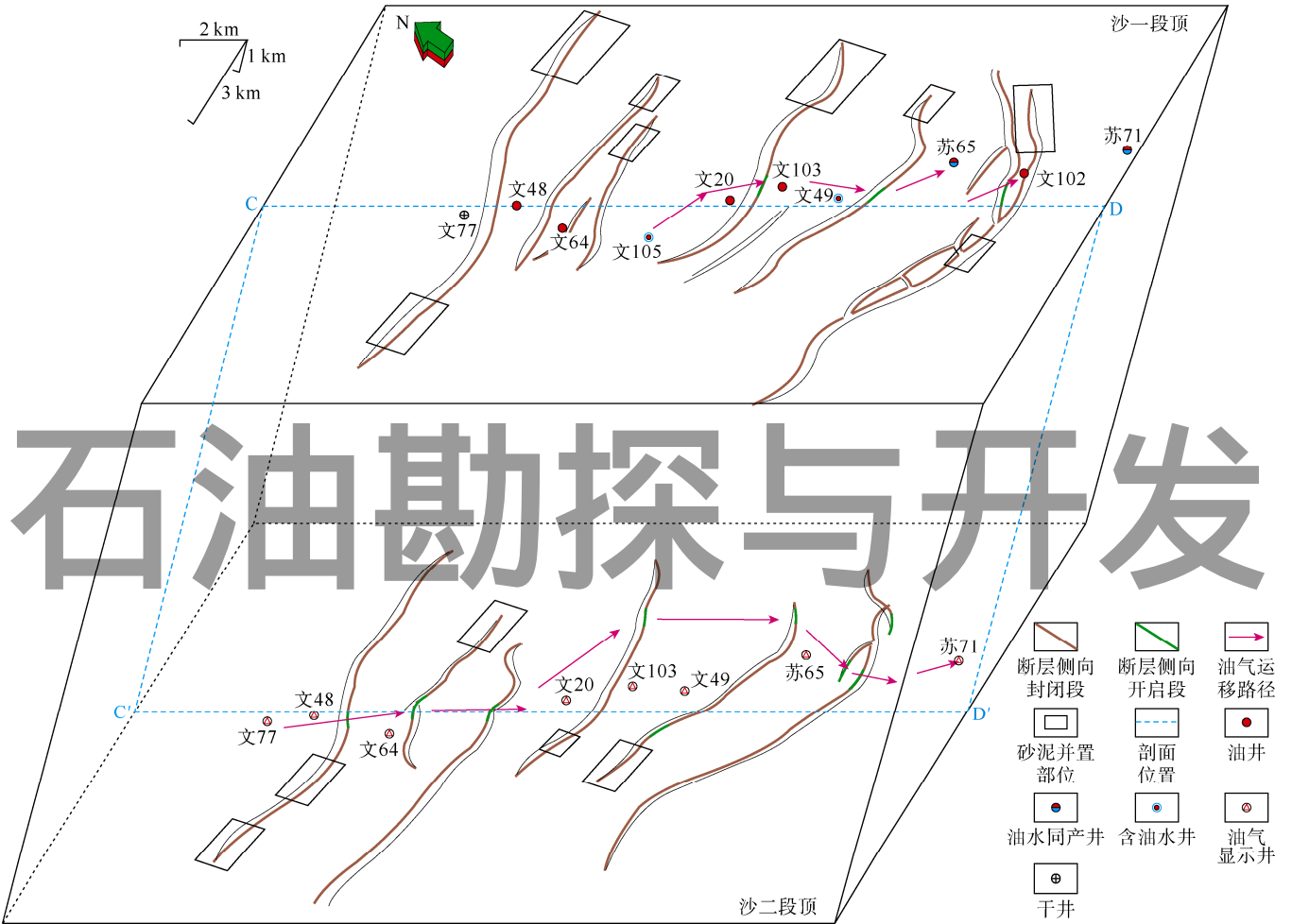


图5 油气跨断层侧向运移图

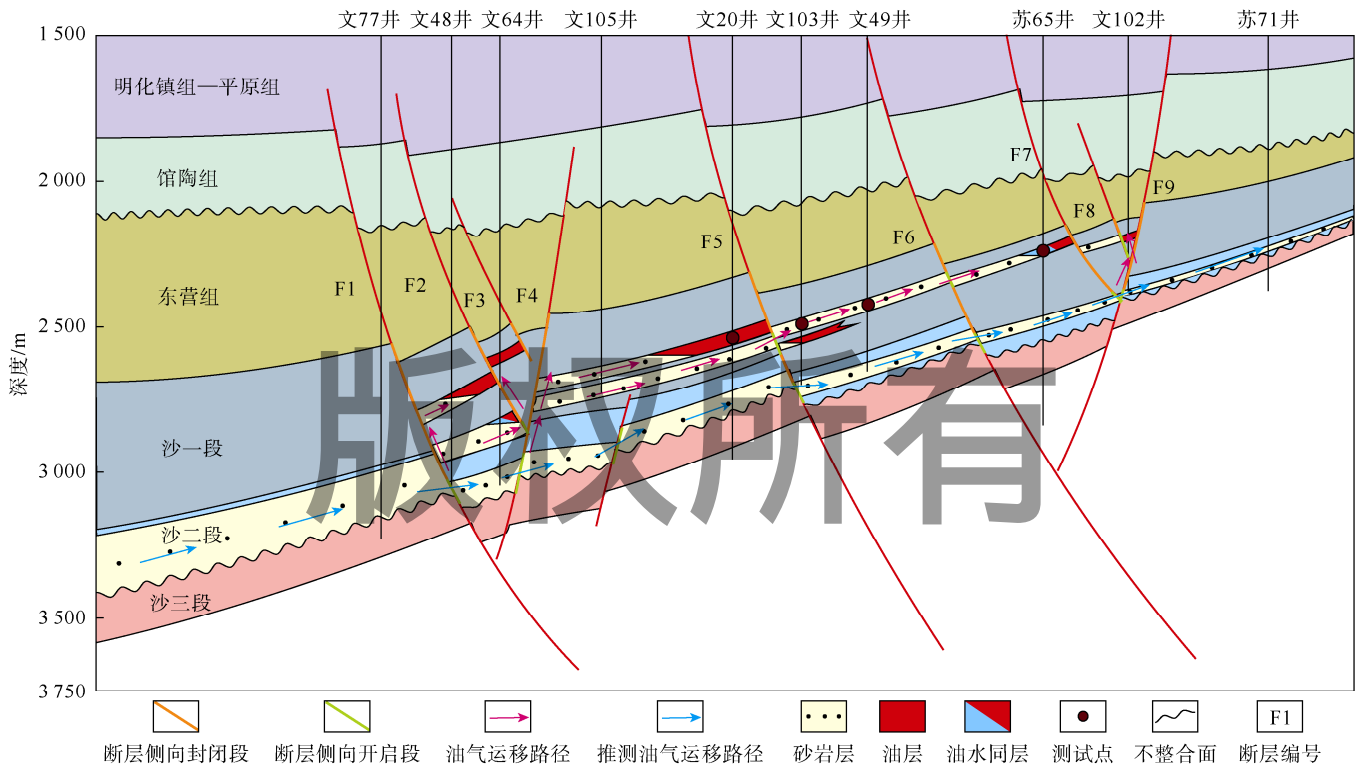


图6 油气跨断层侧向运移剖面图(剖面位置见图5)

由文献调研可知^[20],文安斜坡史各庄鼻状构造带沙一段油气整体上是侧向运移为主,局部是沙二段油气沿着断裂向上调整至沙一段。断层输导油气需要满足 2 个条件:①存在油气成藏期活动的断层;②断层的断接厚度小于断接厚度下限值。根据断裂系统的划分,确定除 F3 和 F8 断层之外,其余断层皆可为油气垂向输导提供有利通道。在沙一段发育 2 套泥岩盖层,分别位于顶部和底部,由西向东盖层的厚度逐渐减薄。与隆起区具有统一的断接厚度下限不同,斜坡区并不具有统一的断接厚度下限。因此,根据文安斜坡沙二段顶部断距和沙一段底部泥岩盖层厚度之间的量化关系,结合油气垂向分布,确定中段斜坡内带和中段斜坡中带断接厚度下限分别为 135 m 和 65 m(见图 7)。通过分析史各庄鼻状构造断层在沙二段顶部断接厚度大小,确定除 F3 和 F8 断层之外,其余断层皆具备垂向输导和侧向阻挡油气的性能。由沙一段油气跨断层侧向运移定量评价结果可知,在沙一段仅 F2、F5、F6、F8 断层存在部分侧向开启段,为沙一段油气

跨断层侧向运移的有利部位。将断层垂向调整和侧向运移部位与史各庄鼻状构造带油气分布特征相结合,认为文 48 井和文 64 井沙一段油气是由 F1 断层将沙二段油气调整上来的,但是由于 F2 断层在沙一段底部存在侧向开启段,造成在沙一段底部文 48 井为油气显示、文 64 井为油水同层,并且 F2 断层继续将运移至开启部位的油气垂向调整至沙一段顶部文 64 井处聚集成藏。文 20 井沙一段的油气则是通过 F4 断层将沙二段油气调整上来,并且由于 F5 和 F6 断层在沙一段存在侧向开启段,使油气跨断层侧向运移至文 103 井和苏 65 井处聚集成藏。

3.2 地球化学参数验证

含氮化合物的绝对浓度与烷基咪唑类化合物的比值的变化具有规律性^[21-28],可用来研究油气运移方向。选择油气最可能运移的路径(见图 5、图 6),以 1,8/1,4-二甲基咪唑、1,8/1,5-二甲基咪唑、1,8/2,6-二甲基咪唑 3 个参数为标准,对文安斜坡史各庄鼻状构造带沙一段可能发生油气跨断层侧向运移的 4 口井(文 20、文 103、文 49、文 65)含氮化合物进行分析。根据咪唑类含氮

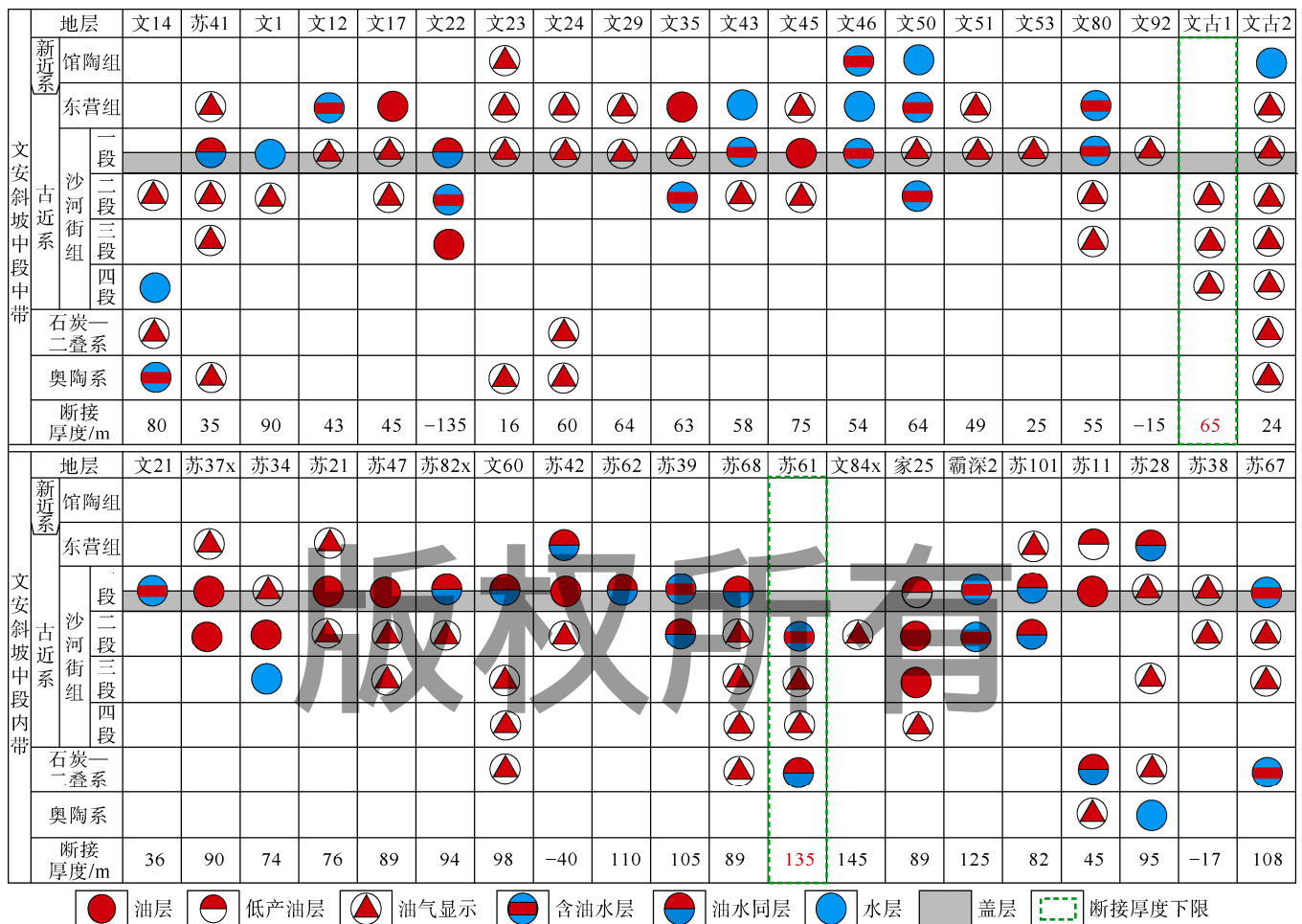


图 7 文安斜坡中段内带及中带断接厚度与含油气情况

化合物的特点，随着油气运移距离的增大，3个含氮化合物参数皆增大。分析测试结果显示（见表2），构造低部位至构造高部位3个含氮化合物指标整体上皆呈现出逐渐增大趋势，表明文安斜坡史各庄鼻状构造带沙一段油气可以跨断层侧向运移，与定量评价结果相吻合，间接证明本文方法的可行性。

表2 沙一段含氮化合物分析测试表

井名	测试段中部深度/m	试油结果	1,8/1,4-二甲基吡唑	1,8/1,5-二甲基吡唑	1,8/2,6-二甲基吡唑
文20	2 609.20	油层	0.96	1.00	0.78
文103	2 593.20	油气显示	0.99	1.35	0.93
文49	2 278.55	油气显示	0.97	1.32	0.95
苏65	2 095.15	油水同层	1.10	1.20	1.20

4 结论

在利用双井 Knipe 图解法厘定断层上、下盘地层砂-砂并置部位的基础上，结合断层侧向封闭油气的 SGR 下限法，建立1套油气跨断层侧向运移部位评价方法，即当断层上下盘地层砂-砂并置部位 SGR 值大于断层侧向封闭油气下限时，油气不能侧向跨断层运移，反之则可运移。用此方法定量分析判断文安斜坡史各庄鼻状构造带内油气跨断层侧向运移可能性以及发生的具体部位，确定沙一段和沙二段的 SGR 下限值分别为 26% 和 29%。通过分析文安斜坡史各庄鼻状构造带沙一段和沙二段油气分布特征，结合文 20、文 103、文 49、文 65 等 4 口井沙一段含氮化合物的变化趋势，与油气跨断层侧向运移可能发生部位的定量评价结果相吻合，证明本文方法的可行性。

参考文献：

[1] PERKINS H. Fault closure type fields, southeast Louisiana[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1961, 11: 177-196.

[2] SMITH D A. Theoretical considerations of sealing and non-sealing faults[J]. AAPG Bulletin, 1966, 50(2): 363-374.

[3] SMITH D A. Sealing and non-sealing faults in Louisiana Gulf Coast Salt Basin[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64(2): 145-172.

[4] WEBER K J, DAUKORU E M. Petroleum geology of the Niger Delta[C]//9th World Petroleum Congress Proceedings. Tokyo: World Petroleum Congress, 1975: 209-221.

[5] WATTS N L. Theoretical aspects of cap-rock and fault seals for single and two-phase hydrocarbon columns[J]. Marine & Petroleum Geology, 1987, 4(4): 274-307.

[6] DOWNEY M W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(11): 1752-1763.

[7] 付晓飞, 贾茹, 王海学, 等. 断层-盖层封闭性定量评价: 以塔里木盆地库车坳陷大北—克拉苏构造带为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 300-309.

FU Xiaofei, JIA Ru, WANG Haixue, et al. Quantitative evaluation of fault-caprock sealing capacity: A case from Dabei-Kelasu structural belt in Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 300-309.

[8] 吕延防, 王伟, 胡欣蕾, 等. 断层侧向封闭性定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 310-316.

LYU Yanfang, WANG Wei, HU Xinlei, et al. Quantitative evaluation method of fault lateral sealing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 310-316.

[9] ALLAN U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment: Abstract[J]. AAPG Bulletin, 1986, 70(7): 803-811.

[10] KNIPE R J. Juxtaposition and seal diagrams to help analyze fault seals in hydrocarbon reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(2): 187-195.

[11] LARSEN R M, BREKKE H, LARSEN B T, et al. Structural and tectonic modeling and its application to petroleum geology[M]. Stavanger, Norway: NPS Special Publication, 1992: 325-342.

[12] HORNBURY A D, ROBINSON A G. Diagenesis and basin development[M]. Tulsa, Oklahoma, USA: Association of Petroleum Geologists, 1993: 135-154.

[13] BOUVIER J D, KAARS-SIJPESTEIJN C H, KLUESNER D F, et al. Three-dimensional seismic interpretation and fault sealing investigations, Nun River Field, Nigeria[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(11): 1397-1414.

[14] LINDSAY N G, MURPHY F C, WALSH J J, et al. Outcrop studies of shale smears on fault surfaces[M]. Alger: International Association of Sedimentologists Special Publication, 1993: 113-123.

[15] YIELDING G, FREEMAN B, NEEDHAM D T. Quantitative fault seal prediction[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(6): 897-917.

[16] YIELDING G. Shale gouge ratio: Calibration by geohistory[J]. Norwegian Petroleum Society Special Publications, 2002, 11(2): 1-15.

[17] 王晓红, 郭秋麟, 米石云, 等. 预测断层封堵性的 FSPS 软件系统[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(5): 37-38.

WANG Xiaohong, GUO Qiulin, MI Shiyun, et al. The fault-sealing prediction software system-FSPS[J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 37-38.

[18] 李爱芬, 刘艳霞, 张化强, 等. 用逐步稳态替换法确定低渗透油藏合理井距[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(1): 89-92.

LI Aifen, LIU Yanxia, ZHANG Huaqiang, et al. Determination of reasonable spacing in low permeability reservoirs by means of series of steady state analysis[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(1): 89-92.

[19] 万文胜, 杜军社, 秦旭升, 等. 低渗透注水开发砂岩油藏合理井网井距的确定方法[J]. 新疆石油天然气, 2007, 13(1): 56-59.

WAN Wensheng, DU Junshe, QIN Xusheng, et al. Determination methods of reasonable well pattern and spacing for injection sandstone reservoirs of low permeability[J]. Xinjiang Oil & Gas,

2007, 13(1): 56-59.

[20] 刘华, 蒋有录, 徐昊清, 等. 冀中拗陷新近系油气成藏机理与成藏模式[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 928-936.
LIU Hua, JIANG Youlu, XU Haoqing, et al. Accumulation mechanisms and modes of Neogene hydrocarbon in Jizhong Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 928-936.

[21] 刘洛夫, 徐新德. 含氮化合物与石油运移研究[J]. 中国石油勘探, 1996, 1(2): 33-37.
LIU Luofu, XU Xinde. Studies on nitrogen compounds and petroleum migration[J]. China Petroleum Exploration, 1996, 1(2): 33-37.

[22] 李素梅, 王铁冠, 张爱云, 等. 原油中的吡咯类化合物的地球化学特征及其意义[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 312-317.
LI Sumei, WANG Tieguan, ZHANG Aiyun, et al. Geochemistry characteristics and significance of the pyrrolic compounds in petroleum[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 312-317.

[23] 向廷生, 朱扬明, 梅博文, 等. 塔里木盆地原油中氮化物的分离及鉴定[J]. 石油天然气学报, 1996, 18(4): 31-35.
XIANG Tingsheng, ZHU Yangming, MEI Bowen, et al. Separation and identification of nitrogen compounds in crude oil in Tarim Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 1996, 18(4): 31-35.

[24] 向才富, 夏斌, 解习农, 等. 松辽盆地西部斜坡带油气运移示踪分析[J]. 地质科技情报, 2004, 23(4): 64-70.
XIANG Caifu, XIA Bin, XIE Xinong, et al. Tracing hydrocarbon migration by integrated analysis of different kinds of tracers in western slope zone of Songliao Basin, Northeast China[J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23(4): 64-70.

[25] LI M, LARTER S R, STODDART D, et al. Fractionation of pyrrolic nitrogen compounds in petroleum during migration: Derivation of migration-related geochemical parameters[J]. Geological Society London Special Publications, 1995, 86(1): 103-123.

[26] LARTER S R, BOWLER B F, LI M, et al. Molecular indicators of secondary oil migration distances[J]. Nature, 1996, 383(6601): 593-597.

[27] 黎茂稳. 油气二次运移研究的基本思路和几个应用实例[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 11-19.
LI Maowen. Quantification of petroleum secondary migration distances: Fundamentals and case histories[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 11-19.

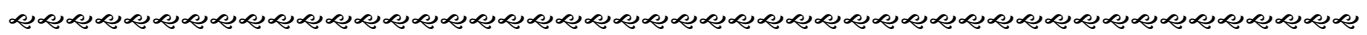
[28] 王传刚, 王铁冠. 应用吡咯类氮化合物探讨彩南油田油气运移: 以彩南油田东块侏罗系西山窑组油藏为例[J]. 石油实验地质, 2003, 25(6): 740-745.
WANG Chuangang, WANG Tieguan. Investigation of oil secondary migration in Cainan oil field using pyrrolic nitrogen compounds[J]. Experimental Petroleum Geology, 2003, 25(6): 740-745.

第一作者简介: 王超 (1986-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 主要从事断层面侧向封闭性研究工作。地址: 广东省茂名市, 广东石油化工学院石油工程学院, 邮政编码: 525000。E-mail: 13704897168@163.com

联系作者简介: 吕延防 (1957-), 男, 吉林德惠人, 博士, 东北石油大学教授, 主要从事石油与天然气地质研究工作。地址: 黑龙江省大庆市开发区, 东北石油大学地球科学学院, 邮政编码: 163318。E-mail: 571128lyf@nepu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-07 修回日期: 2017-10-12

(编辑 王晖)



《石油勘探与开发》2018年第1期部分文章预告

中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位	赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等
四川盆地元坝气田发现与理论技术	郭旭升, 胡东风, 李宇平, 等
鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组长9段多源成藏模式与富集规律	姚泾利, 赵彦德, 罗安湘, 等
尼日尔三角洲东部深水区斜向背斜形成演化特征	孙永河, 李雪松, 刘志达, 等
四川盆地中部侏罗系大安寨段储集层微观结构及油气意义	庞正炼, 陶士振, 张琴, 等
源外斜坡区顺向和反向断裂控藏差异性——以渤海湾盆地冀中拗陷文安斜坡中南部为例	刘峻桥, 王海学, 吕延防, 等
中国超深层构造型大气田高效开发策略	李熙喆, 郭振华, 胡勇, 等
页岩高压等温吸附曲线及气井生产动态特征实验	端祥刚, 胡志明, 高树生, 等
塔里木海相砂岩油藏水平井水淹规律及其模式	刘广为, 周代余, 姜汉桥, 等
利用盐水调节油藏岩石表面润湿性	林梅钦, 华朝, 李明远
井眼轨迹模式识别机理及方法	刘修善