

文章编号: 1001-6112(2009)03-0262-08

# 东营凹陷岩性油气藏混源相对贡献及石油地质意义

李素梅<sup>1</sup>, 庞雄奇<sup>1</sup>, 姜振学<sup>1</sup>, 邱桂强<sup>2</sup>, 高永进<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司, 山东 东营 257015)

**摘要:** 采用地球化学方法, 对渤海湾盆地东营凹陷沙三中( $E_{s_3}^M$ )岩性型隐蔽油气藏进行了混源相对贡献定量研究。结果表明, 牛庄洼陷  $E_{s_3}^M$  油气藏中沙四段成因原油的贡献约为 28%~85% (均值 58.5%~67.7%); 中央隆起带  $E_{s_3}^M$  油气藏沙四段成因原油的贡献约为 9%~81% (均值 32.4%~53.6%)。观察到牛庄洼陷靠近深切断层的原油中沙四段成因原油的贡献量高于远离断层的原油。东营凹陷沙三段砂岩透镜体岩性油气藏中高丰度沙四段“异地源”原油的混源定量结果表明, 透镜体岩性油气藏不完全受围岩油源条件控制, 隐蔽输导体系与常规运移通道可能联合控制油气运移; 透镜体油气藏“自生自储”成藏模式的传统观点有待修正, 暗示东营凹陷等断陷盆地生油中心广泛分布的岩性油气藏潜伏着巨大的深部油气勘探潜能。定量结果还表明, 牛庄洼陷具备为南斜坡提供足够的沙四段成因成熟油气的条件。东营凹陷沙四段源岩的油气潜能可能需要重新评价。

**关键词:** 混源油; 混源定量; 岩性油气藏; 沙河街组; 东营凹陷; 渤海湾盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

## QUANTITATIVE PREDICATION AND SIGNIFICANCE OF MIXED OILS FOR LITHOLOGIC OIL POOL IN THE DONGYING DEPRESSION OF THE BOHAI BAY BASIN

Li Sumei<sup>1</sup>, Pang Xiongqi<sup>1</sup>, Jiang Zhenxue<sup>1</sup>, Qiu Guiqiang<sup>2</sup>, Gao Yongjing<sup>2</sup>

(1. State key laboratory of petroleum resource and prospecting, China university of petroleum, Beijing 102249, China; 2. Shengli Oilfield Company Limited, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

**Abstract:** Normal geochemical approaches were utilized in quantitative predication of the proportion of the mixed oils derived from Third ( $E_{s_3}$ ) and Fourth ( $E_{s_4}$ ) Member of Paleogene Shahejie Formation and accumulated in middle interval of the  $E_{s_3}$  ( $E_{s_3}^M$ ) in the Dongying Depression of Bohai Bay Basin, where subtle traps are primarily of lenticular basin-floor turbidite sands encompassed in mudstones mostly developed in the depression. The result shows that about 28%~85% of the mixed oils were derived from the  $E_{s_4}$  interval with averaged level up to 58.5%~67.7% in the Niuzhuang Sag, and about 9%~81% were  $E_{s_4}$  derived oils in the Central Uplift of the depression (the average is up to 32.4%~53.6%). It was observed that there are much more  $E_{s_4}$  derived oils located nearby where deep faults developed. The fact that high concentration of the  $E_{s_4}$  derived oils with long migration distances discovered in the  $E_{s_3}^M$  subtle lithological traps in the Niuzhuang Sag suggests that surrounding source rocks might be not necessary having a full controlling on hydrocarbons supply of a subtle trap, and subtle migration pathway should play an important role in oil migration. The traditional opinion that hydrocarbons in situ accumulation in lenticular traps with short migration distance from surrounding source rocks should be revised. It is suggested that there is great petroleum potential in the depo-center of rifted basins in Eastern China, and the Niuzhuang Sag is capable to supply normal  $E_{s_4}$  derived oils for the pools in the South Slope, which has been proved by the high proportion of the  $E_{s_4}$  derived oils mixed in the oils of the Wangjiagan Oilfield. The petroleum potential of the  $E_{s_4}$  member in the Dongying Depression should be reevaluated.

**Key words:** mixed-source oil; quantitative predication; lithological oil pool; Shahejie Formation; the Dongying Depression; the Bohai Bay Basin

收稿日期: 2008-03-19; 修订日期: 2009-04-02。

作者简介: 李素梅(1968-), 女, 副教授, 主要从事石油地质地球化学研究。E-mail: sml18888@yahoo.com.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目( # 40772077/D0206)。

东营凹陷牛庄洼陷已发现的透镜体岩性油气藏主要分布于沙三中亚段( $Es_3^M$ )<sup>[1-3]</sup>, 具有低密度、低粘度、低硫特征, 为常规稀油, 与南斜坡八面河等油田原油的相对高硫、高密度、高粘度形成鲜明对比<sup>[4-6]</sup>。早期研究指出, 牛庄洼陷原油主要是沙三段成因, 南斜坡王家岗、八面河等油田主要为沙四段成因<sup>[6,7]</sup>。其中, 八面河原油主要为位于牛庄洼陷南斜坡的沙四段未熟—低熟富藻烃源岩所生<sup>[6]</sup>。近年有人提出异议<sup>[4,8,9]</sup>, 指出八面河原油仍主要为牛庄洼陷沙四段成熟烃源岩所生, 混合了少量未熟—低熟油, 但该项研究当时未给出牛庄洼陷内存在沙四段成因成熟油的直接证据。最近对牛庄洼陷、中央隆起带沙三中隐蔽油气藏的调查表明, 沙三中油气混有沙四段成因油气<sup>[5,10]</sup>。按照传

统的砂岩透镜体岩性油气藏自生自储的观点, 牛庄洼陷岩性油气藏所在的沙三中并非主力烃源岩, 难以提供足够的油源<sup>[4-6,11]</sup>, 而沙三中隐蔽油气藏中丰富油气的出现已出乎意料, 混有位于主力烃源岩沙三下的相隔数百米的另一主力烃源岩——沙四上亚段成因油气更令人费解。本研究旨在探讨东营凹陷牛庄洼陷、中央隆起带等以沙三中岩性油气藏为主的混源油气的相对贡献, 为揭示东营凹陷透镜体岩性油气藏成藏机理及该区油气资源评价提供依据<sup>[6,9]</sup>。

### 1 样品与实验

分析牛庄洼陷原油、油砂 22 个<sup>[5]</sup>、王家岗油田原油 10 个<sup>[12]</sup>、中央隆起带原油 11 个<sup>[10]</sup> (图 1)。其

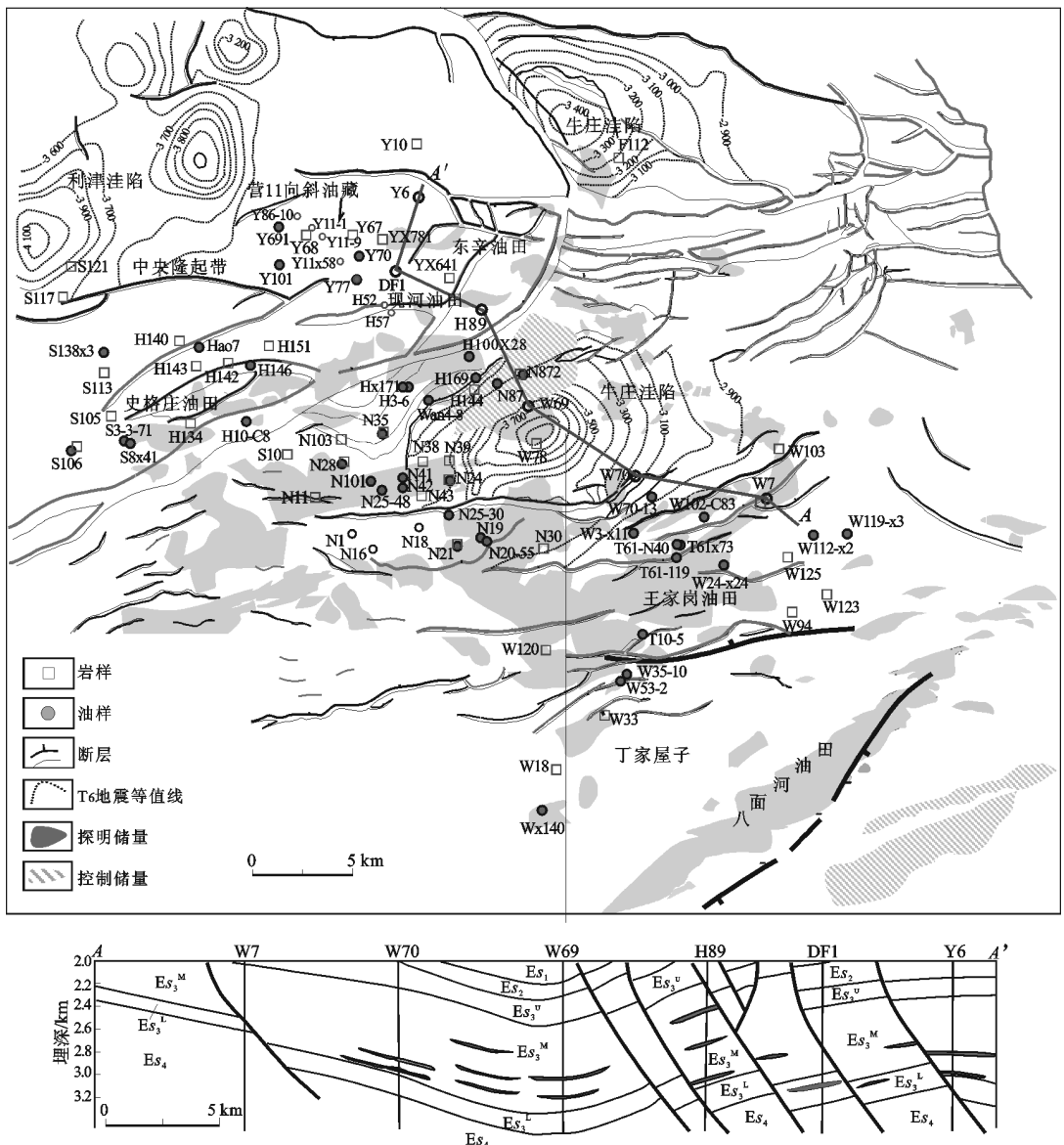


图 1 渤海湾盆地东营凹陷研究区区域构造图与样品分布

Fig. 1 Location map of the study area and the sites of selected oil and core samples for this study

中,牛庄洼陷牛 28(C 砂体)、牛 41(A 砂体)、牛 21(属牛 18-D 砂体)、王 70-13 井,中央隆起带 S106, S3-3-71, S138x3 和 Y691 等井为沙三中透镜体、地层型岩性油气藏;Y101, Y11x58 和 Y77 井原油为取自迄今发现的东部断陷盆地最大的向斜油气藏中的油气(图 1),其它相当部分原油为岩性一断层油气藏原油。共分析牛庄洼陷及其斜坡带、中央隆起带沙三中、上亚段及沙四上亚段岩样 44 块(图 1)。

原油、岩样的氯仿抽提物用常规柱色谱分离。在岛津 GC-9A 型色谱仪和 Finnigan-MAT TSQ-45 型 GC/MS 系统上进行饱和烃色谱及饱和烃、芳烃色谱—质谱分析。分析前加入 D4-C<sub>29</sub> 甾烷、D8-二苯并噻吩标样。色谱条件:SE-54 弹性熔硅毛细管柱(25 m×0.25 mm),以 4 °C/min 自 100 °C 升至 300 °C,载气为 He 气。色谱—质谱条件:采用 SE-54 弹性熔硅毛细管柱(25 m×0.25 mm),载气为氦气,升温程序:以 4 °C/min 的速率由 100 °C 升至 220 °C;再从 220 °C 以 2 °C/min 升温到 300 °C。

质谱电离能量 70 eV。

## 2 混源油特征与油源

无论是叠合盆地抑或断陷盆地,一般都具备混源油气藏形成的物质基础——至少有 2 套烃源岩。尽管牛庄洼陷及其斜坡目前发现的原油类型较多<sup>[12~17]</sup>,但迄今钻遇的有效烃源岩主要有两套,为沙三段和沙四段,分别形成于淡水、咸化强还原性原始沉积环境,烃源岩地球化学特征差异明显<sup>[8,12,13,18]</sup>。沙三段地层可进一步划分为 3 个亚段(沙三上、中、下),牛庄洼陷、中央隆起带沙三上源岩热演化程度低、有机质丰度低,非有效烃源岩;沙三中仅靠近沙三下的部分为有效源岩;沙三下、沙四上亚段为主力烃源岩<sup>[8,13,18]</sup>(图 2)。牛庄洼陷可能还存在第 3 套源岩,其与牛庄洼陷南斜坡丁家屋子的孔店组原油可能密切相关,但在牛庄洼陷仅有一口井钻遇孔二段疑似源岩,源岩性质与原油并不完全相像<sup>[14,15]</sup>。

混源油气的特征主要取决于油源性质及其相

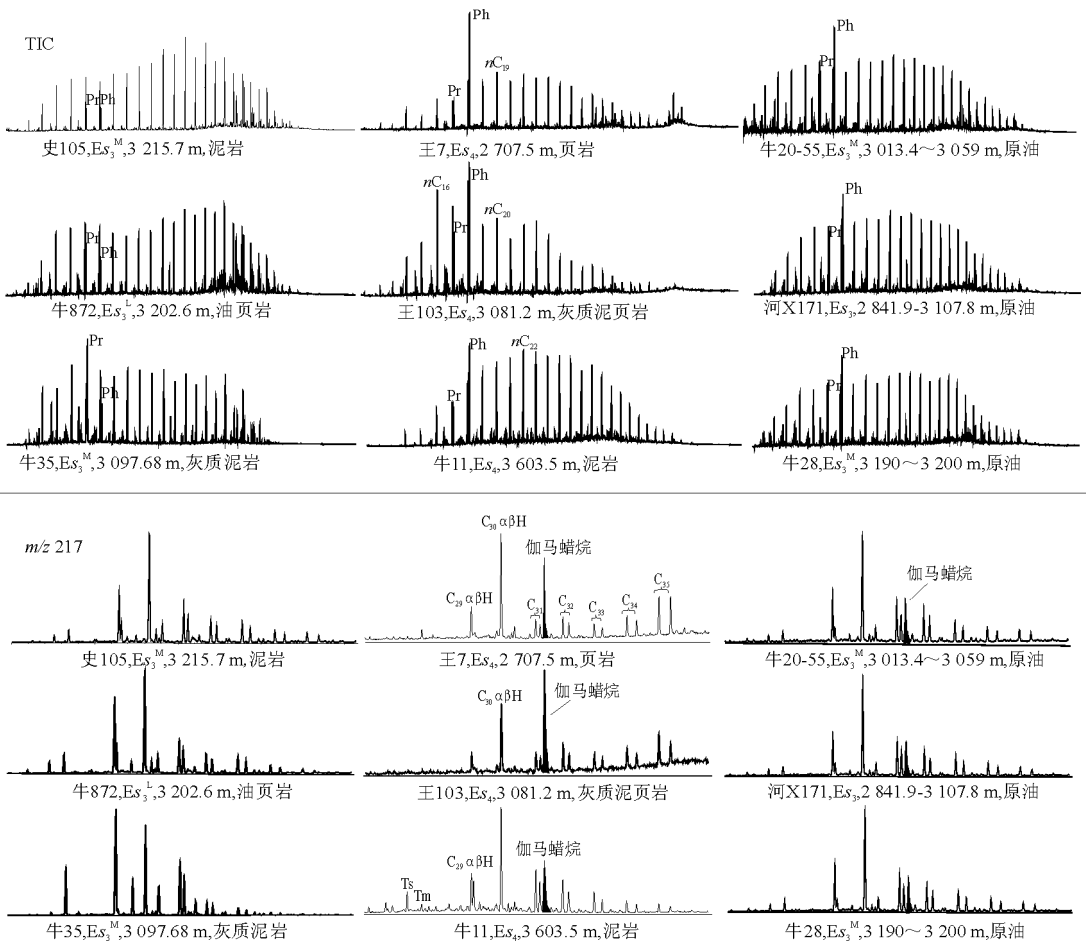


图 2 渤海湾盆地东营凹陷部分烃源岩抽提物、原油 TIC 与  $m/z$  217 质量色谱

Fig. 2 TIC and  $m/z$  217 mass chromatogram of saturate fractions from the Es<sub>3</sub> and Es<sub>4</sub> source rocks and oils in the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin

对贡献。沙三、沙四上亚段源岩地球化学特征的基本差别是<sup>[12,13]</sup>：沙三段源岩具有姥鲛烷对植烷的优势,Pr/Ph 值一般大于 1,反映烃源岩偏氧化—弱还原性原始沉积环境;沙四上亚段源岩具有强植烷对姥鲛烷的优势(图 2),Pr/Ph 值一般远小于 1,指示母源岩强还原性原始沉积环境。牛庄洼陷沙三中、沙三下、沙四上源岩的 Pr/Ph 均值一般分别为 1.62,1.51,0.36(表 1),反映前两者成因相近、与后者有别。东营凹陷沙三段源岩不含或仅含微量的伽马蜡烷,具低伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷特征,指示淡水湖相成因<sup>[8,13]</sup>;沙四上亚段通常具有较高伽马蜡烷含量,指示咸化—盐湖相成因(图 2)<sup>[8,13]</sup>。牛庄洼陷沙三中、沙三下、沙四上源岩的伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷

均值分别为 0.045,0.08,1.26(表 1),差异显著。此外,沙四上亚段源岩富含藻类微生物,具高甾烷/藿烷值特征,沙三段源岩一般不具备该特征,反映母源岩显著的生源输入差异(表 1)。沙三中、下亚段也有细微的差异<sup>[5]</sup>。中央隆起带目前钻遇的沙三中、下亚段烃源岩特征与牛庄洼陷相似<sup>[5,10]</sup>。

牛庄洼陷、中央隆起带均有混源特征<sup>[5,10]</sup>。牛庄洼陷原油的 Pr/Ph 值分布范围为 0.34~0.63,均值 0.44,远低于沙三中、下亚段(均值 1.62,1.51),稍高于沙四上源岩(0.36),显示与沙四上亚段源岩较好的相关性(表 1,2;图 2);原油伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷分布范围为 0.12~0.53(表 2),均值 0.30,高于沙三中、下亚段(0.045~0.080)、低于沙四上亚段(1.26)

表 1 渤海湾盆地东营凹陷沙三、沙四段部分源岩、原油生物标志物浓度和指标

Table 1 Absolute concentration of biomarkers and related parameters of partial Es<sub>3</sub> and Es<sub>4</sub> rock extracts as well as some oils in the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin

井号	层系	埋深/m	样品类型	伽马蜡烷/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	C <sub>30</sub> 藿烷/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	甾烷/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	藿烷/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	姥鲛烷/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	植烷/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	伽马蜡烷/ C <sub>30</sub> 藿烷	甾烷/ 藿烷	Pr/Ph	
N30	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	2 906.00	深灰色灰质泥岩	194	5 750	4 754	19 685	36 360	37 165	0.03	0.24	1.29	
N35	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	2 932.66	深灰色灰质泥岩	244	6 558	5 313	21 763	131 926	107 657	0.04	0.24	1.56	
N872	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	2 989.10	深灰色灰质泥岩	924	7 250	5 571	18 504	36 579	22 533	0.13	0.30	1.62	
N38	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 003.41	深灰色泥岩	292	7 559	6 209	23 067	44 648	33 089	0.04	0.27	1.50	
N21	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 060.00	深灰色泥岩	230	12 200	6 624	34 984	93 229	87 332	0.02	0.19	1.17	
N872	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 074.00	深灰色灰质泥岩	125	2 792	1 926	10 492	27 266	13 591	0.05	0.18	1.61	
N24	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 084.11	灰色灰质泥岩	167	3 799	4 574	13 106	28 070	21 063	0.04	0.35	1.91	
N24	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 128.10	深灰色泥岩	86	2 269	1 736	8 166	22 423	11 228	0.04	0.21	2.68	
N103	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 142.97	黑色页岩	239	9 513	3 410	30 097	55 202	39 720	0.03	0.11	1.55	
N28	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 324.57	深灰色泥岩	392	8 089	4 868	28 646	209 468	193 437	0.05	0.17	1.44	
N38	Es <sub>3</sub> <sup>M</sup>	3 254.84	深灰色泥岩	540	15 152	4 915	45 359	66 201	50 744	0.04	0.11	1.47	
平均值				312	7 357	4 536	23 079	68 307	56 142	0.045	0.22	1.62	
N872	Es <sub>3</sub> <sup>L</sup>	3 202.60	黑色页岩	183	4 036	4 498	15 453	42 812	35 955	0.05	0.29	1.47	
N39	Es <sub>3</sub> <sup>L</sup>	3 283.60	黑色—深灰色泥岩	616	8 618	4 936	27 018	83 797	56 687	0.07	0.18	1.61	
N38	Es <sub>3</sub> <sup>L</sup>	3 367.90	页岩	223	6 200	4 943	22 848	44 240	25 698	0.04	0.21	1.86	
N43	Es <sub>3</sub> <sup>L</sup>	3 374.50	深灰色泥岩	310	2 219	2 505	8 940	32 600	24 261	0.14	0.28	1.49	
W78	Es <sub>3</sub> <sup>L</sup>	3 735.07	黑色页岩	370	3 098	2 103	10 960	50 190	56 720	0.12	0.19	1.11	
平均值				340	4 834	3 797	17 044	50 728	39 864	0.08	0.23	1.51	
W103	Es <sub>4</sub>	3 081.29	灰质泥页岩	999	532	7 796	2 636	67 821	165 269	1.88	2.96	0.40	
N11	Es <sub>4</sub>	3 603.50	深灰色泥岩	329	690	3 691	2 745	51 127	161 035	0.48	1.35	0.32	
N11	Es <sub>4</sub>	3 602.30	黑色页岩	713	505	6 371	2 374	114 778	311 499	1.41	2.63	0.37	
平均值				680	576	5 953	2 585	77 909	212 601	1.26	2.31	0.36	
				端元油 A	312	5 574	4 014	18 813	55 882	44 637	0.056	0.21	1.25
				端元油 B	680	576	5 953	2 585	77 909	212 601	1.181	2.30	0.37
H10—C8	Es <sub>2</sub> <sup>1</sup>	2 321.1~2 350.9	原油	296	4 022	3 565	14 017	63 493	69 758	0.074	0.25	1.05	
S8X41	Es <sub>1</sub> <sup>5</sup>	2 453.4~2 455.6	原油	267	3 498	3 111	12 260	83 326	93 065	0.076	0.25	1.06	
平均值				282	3 760	3 338	13 139	73 410	81 412	0.075	0.25	1.06	
T10—5	Es <sub>3</sub> <sup>L</sup>	2 133.4~2 140.0	原油	897	1 095	8 176	4 166	58 001	135 969	0.82	1.96	0.43	
W35—10	Es <sub>5</sub>	1 511.6~1 519.3	原油	926	1 019	10 029	3 68	73 323	201 710	0.91	2.72	0.36	
W122—X2	Es <sub>4</sub>	2 794.3~2 806.1	原油	501	836	6 167	2 790	55 963	132 386	0.60	2.21	0.42	
W119—X3	Es <sub>4</sub>	2 592.5~2 624.0	原油	561	867	6 842	2 888	60 206	152 785	0.65	2.37	0.39	
平均值				721	954	7 804	3 381	61 873	155 713	0.75	2.32	0.40	
				端元油 A'	282	3 760	3 338	13 139	73 410	81 412	0.07	0.25	0.90
				端元油 B'	721	954	7 804	3 381	61 873	155 713	0.76	2.31	0.40

注:数据来自 GC/MS 统计表。表中端元 A、B 表示用沙三、沙四段烃源岩抽提物分别作为沙三、沙四段成因原油;端元 A'、B' 分别代表沙三、沙四段成因原油(用原油本身作端元油),下同。

表 2 渤海湾盆地东营凹陷原油混源相对贡献计算结果

Table 2 Predicated proportions of  $E_{S_3}$  and  $E_{S_4}$  derived oils mixed in the oils from the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin

构造单元	样号	井号	地层	埋深/m	样品性质	甾烷/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	藿烷/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	$\gamma$ 蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷	甾烷/ 藿烷	Pr/Ph	端元油 A, B $E_{S_3} : E_{S_4}$			端元油 A', B' $E_{S_3} : E_{S_4}$		
											$\gamma$ 蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷	甾烷/ 藿烷	Pr/Ph	$\gamma$ 蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷	甾烷/ 藿烷	Pr/Ph
中央隆起带	3	H146	$E_{S_3}^M$	3 089.2~3 132.3	原油	8 345	9 987	0.38	0.83	0.42	26 : 74	31 : 69	25 : 75	26 : 74	43 : 57	10 : 90
	4	Ha07	$E_{S_3}^M$	2 927.5~2 979.5	原油	4 803	5 819	0.26	0.82	0.39	40 : 60	32 : 68	19 : 81	43 : 57	43 : 57	1 : 99
	5	S106	$E_{S_3}^M$	3 377~3 415.9	原油	3 432	6 521	0.15	0.51	0.55	58 : 42	52 : 48	46 : 54	66 : 34	65 : 35	43 : 57
	6	Y11X58	$E_{S_3}^M$	3 242~3 254	原油	5 549	15 914	0.10	0.35	0.61	73 : 27	69 : 31	56 : 44	85 : 15	83 : 17	57 : 43
	7	Y77	$E_{S_3}^M$	3 096.7~3 107.6	原油	2 833	8 054	0.10	0.35	0.58	73 : 27	69 : 31	51 : 49	85 : 15	83 : 17	50 : 50
	8	Y101	$E_{S_3}^M$	2 888	油砂	1 936	6 075	0.09	0.32	0.46	78 : 22	73 : 27	32 : 68	92 : 8	87 : 13	21 : 79
	9	SI38X3	$E_{S_3}^M$	2 942.8~3 142.4	原油	3 728	14 253	0.08	0.26	0.66	83 : 17	82 : 18	61 : 39	98 : 2	97 : 3	65 : 35
	10	Y691	$E_{S_3}^M$	2 859.5	油砂	1 773	5 738	0.07	0.31	0.50	86 : 14	74 : 26	38 : 62	103 : -3	88 : 12	31 : 69
	11	S3-3-71	$E_{S_3}^M$	3 296.5~3 318	原油	1 088	4 016	0.06	0.27	0.93	91 : 9	80 : 20	89 : 11	108 : -8	96 : 4	107 : -7
	12	N20-55	$E_{S_3}^M$	3 013.4~3 059	原油	8 743	8 185	0.53	1.06	0.45	15 : 85	21 : 79	30 : 70	11 : 89	31 : 69	18 : 82
	13	N19	$E_{S_2}\sim E_{S_3}$	2 171.0~3 110.1	原油	8 262	7 988	0.51	1.02	0.40	16 : 84	22 : 78	22 : 78	13 : 87	33 : 67	6 : 94
14	N28	$E_{S_3}^M$	3 190~3 200	原油	5 316	6 307	0.42	0.83	0.48	23 : 77	31 : 69	36 : 64	22 : 78	42 : 58	27 : 73	
15	N21	$E_{S_3}^M$	3 193~3 206.9	原油	3 707	3 692	0.41	0.99	0.47	24 : 76	24 : 76	35 : 65	23 : 77	34 : 66	25 : 75	
16	HX171	$E_{S_3}^M$	2 841.9~3 107.8	原油	4 413	4 936	0.40	0.89	0.42	25 : 75	29 : 71	24 : 76	24 : 76	40 : 60	10 : 90	
17	W4-8	$E_{S_3}^M$		原油	2 499	2 899	0.36	0.85	0.46	28 : 72	30 : 70	32 : 68	28 : 72	41 : 59	21 : 79	
18	H3-6	$E_{S_2}$	2 034.5~2 060.7	原油	9 951	10 734	0.36	0.92	0.38	28 : 72	27 : 73	17 : 83	28 : 72	38 : 62	-2 : 102	
19	N25-30	$E_{S_3}^M$	3 254~3 283.1	原油	6 793	7 836	0.36	0.86	0.47	29 : 71	30 : 70	33 : 67	29 : 71	41 : 59	23 : 77	
20	N25-48	$E_{S_3}^M$	3 284~3 296.5	原油	3 845	4 817	0.33	0.79	0.49	31 : 69	33 : 67	37 : 63	32 : 68	45 : 55	28 : 72	
21	H169	$E_{S_3}^M$	3 021.8~3 030.7	原油	2 361	3 120	0.32	0.75	0.39	32 : 68	36 : 64	19 : 81	33 : 67	47 : 53	2 : 98	
22	H100X28	$E_{S_2}$	2 153.9~2 156.6	原油	6 711	9 495	0.27	0.70	0.46	38 : 62	39 : 61	32 : 68	41 : 59	50 : 50	21 : 79	
23	W3-X11	$E_{S_3}^M$	2 608.3~2 633.3	原油	4 493	8 039	0.26	0.55	0.59	39 : 61	49 : 51	52 : 48	43 : 57	62 : 38	51 : 49	
24	N35	$E_{S_3}^M$	2 985.4~3 001.4	原油	2 888	4 717	0.23	0.61	0.48	44 : 56	45 : 55	35 : 65	49 : 51	57 : 43	26 : 74	
25	N24	$E_{S_3}^M$	3 055~3 073	原油	2 095	4 304	0.23	0.48	0.50	44 : 56	55 : 45	39 : 61	48 : 52	68 : 32	32 : 68	
26	N872	$E_{S_3}^M$	3 040.8~3 049.1	原油	5 964	14 064	0.23	0.42	0.52	44 : 56	61 : 39	43 : 57	49 : 51	74 : 26	37 : 63	
27	W70-13	$E_{S_3}^M$	2 771.6~2 773.5	原油	6 426	10 591	0.23	0.60	0.55	44 : 56	45 : 55	47 : 53	48 : 52	58 : 42	43 : 57	
28	N101	$E_{S_3}^M$	3 279.3~3 294.3	原油	1 477	2 701	0.17	0.54	0.46	55 : 45	50 : 50	33 : 67	63 : 37	62 : 38	22 : 78	
29	N87	$E_{S_3}^M$	2 928.37	油砂	5 636	8 986	0.22	0.62	0.35	45 : 55	44 : 56	10 : 90	50 : 50	56 : 44	-11 : 111	
30	N24	$E_{S_3}^M$	3 174.21~3 182	油砂	3 240	6 542	0.20	0.49	0.44	49 : 51	54 : 46	29 : 71	55 : 45	67 : 33	16 : 84	
31	N42	$E_{S_3}^M$	3 265.3	油砂	3 466	7 665	0.19	0.45	0.39	52 : 48	58 : 42	18 : 82	58 : 42	71 : 29	0 : 100	
32	N872	$E_{S_3}^M$	2 922.7	油砂	4 464	10 000	0.17	0.44	0.43	56 : 44	58 : 42	27 : 73	63 : 37	72 : 28	13 : 87	
33	N41	$E_{S_3}^M$	3 103.5~3 255.6	原油	2 053	6 337	0.12	0.32	0.65	66 : 34	72 : 28	60 : 40	77 : 23	87 : 13	64 : 36	
34	W53-2	$E_{S_3}^L$	3 311.9~3 346.7	原油	3 361	10 128	0.13	0.32	0.78	64 : 36	72 : 28	75 : 25	74 : 26	86 : 14	86 : 14	
35	W102-C83	$E_{S_2}$	2 161.98~2 202.47	原油	5 414	9 808	0.23	0.54	0.53	44 : 56	50 : 50	44 : 56	49 : 51	62 : 38	39 : 61	
36	T61-N40	$E_{S_2}$	1 950~1 953	原油	5 591	7 894	0.39	0.70	0.50	26 : 74	39 : 61	39 : 61	25 : 75	51 : 49	31 : 69	
37	W24-X24	$E_{S_1}^2$	1 703.8~1 712	原油	7 237	9 101	0.35	0.78	0.50	29 : 71	34 : 66	40 : 60	29 : 71	45 : 55	33 : 67	
38	T61X73	$E_d$	1 599.5~1 625.4	原油	15 233	18 427	0.32	0.82		32 : 68	32 : 68		33 : 67	43 : 57		
39	T61-119	$E_{S_2}$	1 903.1~1 969.5	原油	3 941	5 671	0.30	0.70	0.50	35 : 65	39 : 61	38 : 62	37 : 63	51 : 49	31 : 69	

注:数据来自 GC/MS 统计表;表中端元油 A、B 和 A'、B' 的  $E_{S_3} : E_{S_4}$  表示变量分别为伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷、甾烷/藿烷和 Pr/Ph 时沙三和沙四成因原油的相对贡献比例。

(表 1, 2), 明显携带沙四上亚段源岩的特征(图 2); 原油的甾烷/藿烷值(0.32~1.06, 均值 0.69)介于沙三中、下(均值 0.22, 0.23)和沙四上亚段(2.31)源岩之间(表 1, 2), 显示与两者都具有一定的相关。显然, 牛庄洼陷沙三中原油为含有沙三、沙四成因的混源油(图 2)<sup>[5]</sup>。由于①牛庄洼陷沙河街组原油不具有位于低斜坡的丁家屋子构造带孔店组原油的反“L”型  $C_{27}, C_{28}, C_{29}$  一规则甾烷分布特征, 单体烃同位素分析也显示两者不太具备亲缘关系<sup>[14~17]</sup>; ②牛庄洼陷沙三中原油的成熟度远低于孔店组原油<sup>[5, 14]</sup>; ③沙三中等岩性油气藏与位于沙

四段下方的孔店组源岩间相距更远, 更缺少油气运移的条件, 因此本研究判断, 牛庄洼陷沙三中混源油的油源应为近源的沙三中、下亚段和沙四段。油源对比表明<sup>[5]</sup>, 由于沙三中源岩的成熟度相对较低, 其油气潜能也低于沙三下和沙四上亚段, 故主力烃源岩应为后两层系。中央隆起带原油性质与牛庄洼陷较接近, 具有类似的油源<sup>[5, 10]</sup>。

### 3 混源定量计算

#### 3.1 定量方法

利用特征性生物标志物很容易识别牛庄洼陷



沙河街组的混源油及其油源的差异,共选定地化意义显著的 4 个单体化合物及甾、萜类两大化合物系列及相关参数作为混源定量指标,分别是单体化合物姥烷与植烷、伽马蜡烷与 C<sub>30</sub>藿烷以及甾烷系列、藿烷系列的绝对丰度及相关参数 Pr/Ph、伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷与甾烷/藿烷。牛庄洼陷原油成熟度较为接近<sup>[5]</sup>、均不同程度地具有混源油特征,难以在洼陷范围内找到与成熟度相当的纯沙三、沙四成因原油作为端元油,故采用牛庄洼陷沙三、沙四段成熟度适中的烃源岩抽提物作为端元油(A,B)(表 1)。同时,选用中央隆起带沙三成因较为明显的 H10-C8,S8x41 及王家岗沙四段成因特征较为明显的原油分别作为端元油进行对比研究(A',B')(表 1)。

由于烃源岩的非均质性,本研究取分析烃源岩样品选定化合物的均值作端元油的相应值。沙三中仅靠近沙三下的约 80 m 的源岩具有一定生烃潜力,两者成因相近,但可溶物仍有微小的差异(表 1)<sup>[5]</sup>。本研究将沙三中、沙三下源岩作为同一套烃源岩处理,端元油指标大小的确定按其成烃贡献量大小进行处理<sup>[19]</sup>(如按沙三下源岩均一化值为端元油,结果相似)。由此可计算出不同端元油(沙三、沙四成因原油)不同混源配比后的混合油中上述选定生物标志物浓度及参数的大小(表 2),相关计算式如下:

$$S_{mi} = S_{ai}m + S_{bi}(1 - m) \quad (1)$$

式中,S<sub>mi</sub>为混合油中 i 化合物浓度;S<sub>ai</sub>为端元油 A 中 i 化合物浓度;S<sub>bi</sub>为端元油 B 中 i 化合物浓度;m 为端元油 A 的相对贡献量。并可进一步拟合出端元油 A 的相对贡献量(y<sub>i</sub>)与选定变量伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷(x<sub>1</sub>)、甾烷/藿烷(x<sub>2</sub>)、Pr/Ph(x<sub>3</sub>)值间的对数关系式(图 3):

$$y_1 = -36.296 \ln(x_1) - 8.1948 \quad (2)$$

$$y_2 = -45.699 \ln(x_2) + 24.681 \quad (3)$$

$$y_3 = 93.122 \ln(x_3) + 105.05 \quad (4)$$

相关系数分别为 0.972 1,0.986 1,0.975 7。图 3 显示,混源油的相对含量与有关烃类指标并非为直接关系。其它研究有类似的认识<sup>[20,21]</sup>。类似地,对于端元油 A',B',可进一步拟合出端元油 A'的相对贡献量与选定参数伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷(x<sub>1</sub>)、甾烷/藿烷(x<sub>2</sub>)、Pr/Ph(x<sub>3</sub>)值间的对数关系式:

$$y_1 = -44.577 \ln(x_1) - 17.161 \quad (5)$$

$$y_2 = -46.548 \ln(x_2) + 33.833 \quad (6)$$

$$y_3 = 122.47 \ln(x_3) + 116.42 \quad (7)$$

相关系数分别为 0.997 8,0.997 2,0.997 8。

### 3.2 定量结果

依据公式(2)~(7),可计算出牛庄洼陷等不同油井中沙三、沙四成因原油的混源比例(表 2,图 4)。当选用端元油 A,B 时,依据测定的实际原油的伽马蜡烷/C<sub>30</sub>藿烷值大小,可计算出牛庄洼陷沙三、沙四段成因原油的相对贡献比例为 15 : 85 ~ 66 : 34(平均 38 : 62)(表 2)。类似地,依据甾烷/藿烷值,计算出沙三、沙四段成因原油的相对贡献比例为 21 : 79 ~ 72 : 28(平均 42.5 : 58.5)(表 2);依据 Pr/Ph 值,计算出沙三、沙四段成因原油的相对贡献比例为 10 : 90 ~ 60 : 40(平均 32.3 : 67.7)(表 2)。可见,牛庄洼陷多数分析原油中沙三段的贡献实际上小于 50%,仍以沙四段成因油为主,并非早期研究认为的主要为沙三段成因<sup>[6]</sup>。

采用同样的方法对王家岗油田低部位部分原

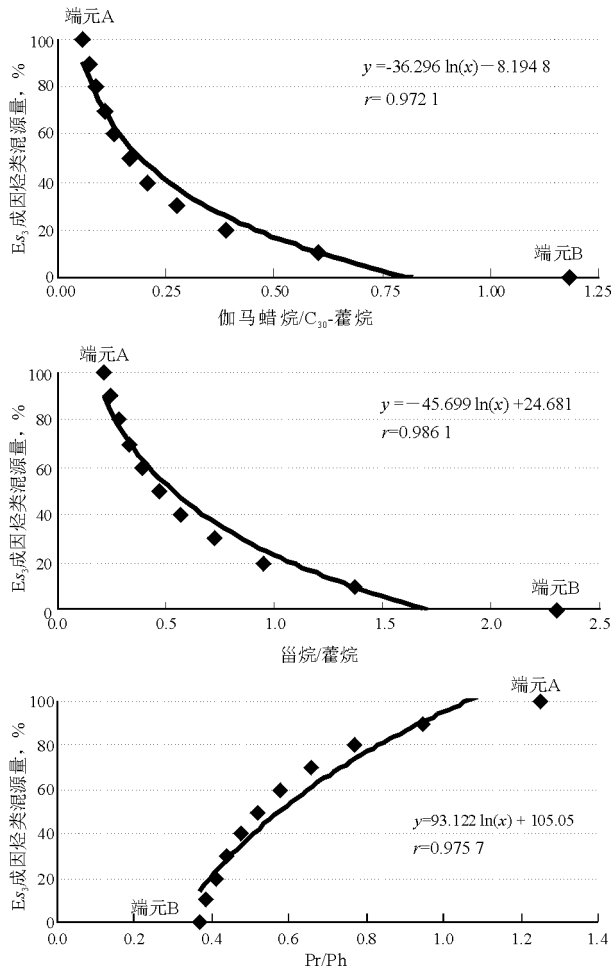


图 3 渤海湾盆地东营凹陷混源油参数与二元混源配比间的变化关系

Fig. 3 Geochemical parameters verse mixing proportion of end-member oils in the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin

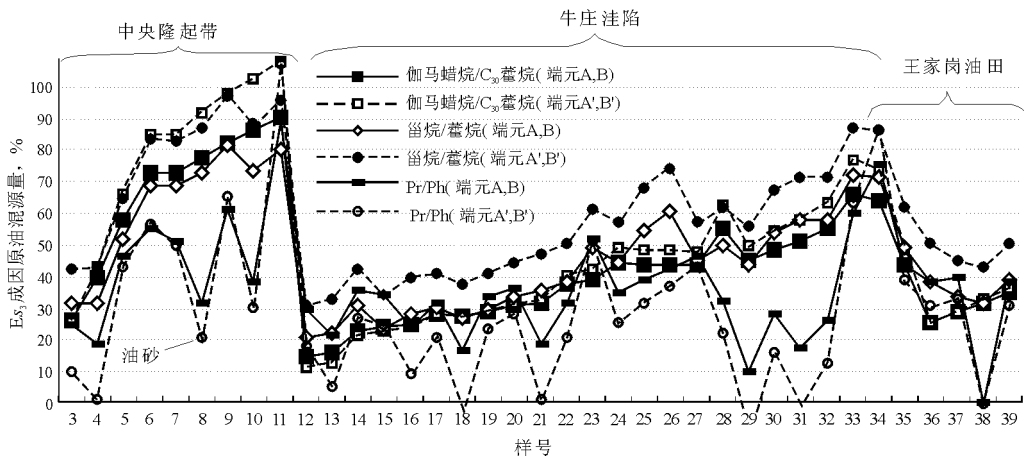


图 4 渤海湾盆地东营凹陷不同构造单元混源油相对贡献  
横坐标样号同表 2。

Fig. 4 Quantitative prediction of the mixed oils from different tectonic zones in the Dongying Depression of the Bohai Bay Basin

油进行了混源定量计算,这部分原油成熟度、烃类组成与分布和牛庄洼陷原油较为接近<sup>[5,12]</sup>,计算结果表明,王家岗油田低部位原油也以混源油为主,计算所得的沙四成因原油的相对贡献是 25%~74%(表 2,图 4)。同样,包括取自营 11 向斜油气藏在内的中央隆起带原油也都不同程度地混有沙四段成因油气,以伽马蜡烷/C<sub>30</sub> 藿烷为变量时,沙四混源量约为 9%~74%(表 2)。

为了对比,选用端元油 A',B'拟合的关系式类似进行了混源计算。用伽马蜡烷/C<sub>30</sub> 藿烷作变量时,用原油作端元油的预测结果与用源岩抽提物基本一致,多数原油混源量相差仅 0%~3%左右(表 2,图 4);用甾烷/藿烷值作变量时,用原油的预测结果比用源岩计算的(E<sub>s3</sub> 成因油)高 9%~10%左右;用 Pr/Ph 作变量时,用原油的预测结果比用源岩计算的(E<sub>s3</sub> 成因油)低 1%~19%,平均低 11%左右。可见,用伽马蜡烷/C<sub>30</sub> 藿烷作计算参数时,用原油或源岩作端元油的预测结果较为一致,说明该参数较适用于该区不同油源的混源定量计算。其余两变量出现一定偏差。

当选用 A,B 为端元油时,本次研究选用的具有油源指示意义的 3 个重要参数(伽马蜡烷/C<sub>30</sub> 藿烷、甾烷/藿烷、Pr/Ph)所得出的牛庄洼陷混源定量结果总体具有较好的一致性,特别是前 2 个指标。图 4 中依据前 2 个指标计算的原油混源量曲线叠合/平行分布,表明该定量方法可行。依据 Pr/Ph 的定量结果,少数样品出现偏移,主要是油砂样品(图 4,表 2),这可能与油砂及原油样品的保存条件不同有关,即次生变化的影响。18,21 号样

品也发生了小幅度向沙三段含量小的方向偏移。分析发现,这些样品的 Pr/Ph 值相对偏低(表 2),表明 Pr/Ph 值的变化对混源结果有较大的影响。当选用 A',B'为端元油时,参数间的吻合度降低(图 4),个别结果出现负值(表 2),推测与端元油的代表性有关。王家岗油田高部位的沙四段成因原油成熟度可能低于供给牛庄洼陷的沙四段成因油气。事实上,其成熟度低于牛庄原油<sup>[5,12]</sup>。

分析表明,靠近深切断层的油井沙四段的贡献相对较高,如 N19(沙四段贡献量为 78%~84%),N20-55(70%~85%),HX171(71%~76%),H3-6(72%~83%)井,远离深切断层的井沙四段的贡献相对较低,如 N41(28%~40%)等井(表 2,图 1),表明深切油源断层对于深部油气的垂向输送发挥了重要作用。令人深思的是,沙三中油气藏的围岩不是该区的主力烃源岩,牛庄洼陷所有油气藏中的烃类绝大部分都不是原地生成近距离聚集,微裂隙、薄层砂等隐蔽输导体系对于牛庄洼陷岩性油气藏的成藏可能起关键作用。与此同时,规模有限的常规运移通道(如断层)可能发挥了协同作用。

#### 4 石油地质意义

东营凹陷透镜体及其相关油气藏中一致混有相对高丰度的沙四段成因原油(均值 55%~65%),表明以往确认的岩性油气藏“自生自储”的成藏模式并非是唯一的,岩性油气藏的成藏机理有待深入。牛庄洼陷岩性油气藏的这种油源相对不受围岩条件控制、宏观与隐蔽运移通道可能协同作用的特性,可极大限度地增加东部广泛存在的相对

深层岩性油气藏的油气勘探潜能。

混源定量结果表明,牛庄洼陷本身含有沙四段优质成熟烃源岩,具备向牛庄洼陷南斜坡各油田(王家岗、八面河等)供烃的条件;牛庄洼陷生成的沙四成因油气,部分与沙三成因油气混合聚集在浅层沙三中所谓的透镜体岩性油气藏中;部分与沙四段早期形成的未熟—低熟烃混合,聚集在相对远离油源的南斜坡各大油田中,如王家岗油田,并可能表现出了未熟—低熟油的特征<sup>[8]</sup>。沙四成因成熟油气的“远源异地”聚集特征、混源油气地化特征表现出的油源假象等,共同导致沙四段成因成熟油的真正价值被忽视。东营凹陷沙四段优质烃源岩对于整个凹陷的真正贡献可能需要重新认证。

#### 参考文献:

- 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
- 曾灏辉,张善文,邱楠生等. 济阳拗陷砂岩透镜体油气藏充满足度大小及其主控因素[J]. 地球科学, 2002, 27(6): 729~732
- 张俊,庞雄奇,陈冬霞等. 牛庄洼陷砂岩透镜体成藏特征及主控因素剖析[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 233~237
- Pang Xiongqi, Li Maowen, Li Sumei, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang South Slope of Bohai Bay Basin; Part 2: evidence for significant contribution of mature source rocks to “immature oils” in the Bamianhe field[J]. Organic geochemistry, 2003, 34(7): 931~950
- 李素梅,邱桂强,高永进等. 牛庄洼陷“岩性油气藏”油气成因分析[J]. 地球科学, 2007, 2(2): 213~218
- 张春荣. 东营凹陷南部斜坡油气的生成及运移[T]. 石油技术, 1989, 11(4): 27~34
- 郑亚斌,黄海平,周树青等. 牛庄洼陷—八面河油田油气运移规律[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(6): 43~46
- 庞雄奇,李素梅,黎茂稳等. 八面河地区“未熟—低熟油”成因探讨[J]. 沉积学报, 2001, 19(4): 586~591
- 陈安定. “未熟油”与“未熟生烃”异议[J]. 地质论评, 1998, 44(5): 470~477
- Li Sumei, Qiu Guiqiang, Gao Yongjing, et al. Formation and accumulation of the oils in the Central Uplift, Dongying Depression[J]. Petroleum Science, 2006, 3(3): 12~22
- 朱光有,金强. 东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 506~511
- 李素梅,庞雄奇,邱桂强等. 东营凹陷南斜坡王家岗地区第三系原油特征及其意义[J]. 地球化学, 2005, 34(5): 515~524
- Li Sumei, Li Maowen, Pang Xiongqi, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang South Slope of Bohai Bay Basin; part 1: source rock characterization[J]. Organic geochemistry, 2003, 34(3): 389~412
- 李素梅,庞雄奇,邱桂强等. 东营凹陷王家岗孔店组油气成因解析[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 726~733
- Li Sumei, Pang Xiongqi, Li Maowen, et al. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang South Slope of Bohai Bay Basin: Part 4. Evidence for new exploration horizons in a maturely explored petroleum province[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(8): 1135~1150
- Li Sumei, Pang Xiongqi, Liu Keyu, et al. Origin of the high waxy oils in Bohai Bay Basin, east China: insight from geochemical and fluid inclusion analyses[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89: 218~221
- 李素梅,庞雄奇,邱桂强等. 王古1井奥陶系古潜山原油成因及其意义[J]. 地球科学, 2005, 30(4): 451~458
- 张林晔,张春荣. 低熟油生成机理及成油体系[M]. 北京:地质出版社, 1999. 8~98
- 李素梅. 中国东部断块盆地原油成因、运聚机理与定量研究: 以八面河、金湖凹陷为例[D]. [学位论文]. 北京:中国石油大学, 2002
- 常象春,林玉祥,郭海花等. 混源原油的地球化学特征与成藏贡献率[J]. 地质科技情报, 2007, 26(2): 75~80
- 陈建平,邓春萍,梁狄刚. 叠合盆地多烃源层混源油定量判别: 以准噶尔盆地东部彩南油田为例[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 279~288

(编辑 徐文明)