

doi:10.3799/dqkx.2011.112

南堡凹陷混源油分布与主力烃源岩识别

李素梅^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 万中华^{1,2}

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京昌平 102249

2. 中国石油大学地球科学院盆地与油藏研究中心, 北京昌平 102249

摘要: 南堡凹陷油气源尚不清晰, 首次采用单体烃碳同位素、结合生物标志物对全凹陷范围的原油和烃源岩进行了精细地球化学研究。分析表明, 拾场次洼沙三段烃源岩(I类)发育高丰度的4-甲基甾烷与硫蒽系列、贫伽玛蜡烷, 单体烃碳同位素为“斜直线型”, 相关原油分布于高柳深层; 南堡凹陷南部沙二十三段源岩(II类)伽玛蜡烷较发育, 但4-甲基甾烷不太发育, 其他特征类似于I类源岩, 相关原油发现于潜山; 南堡凹陷沙一段—东三段烃源岩(III类)富含重排甾烷与孕甾烷系列, 单体烃碳同位素较轻且近“W”型, 相关原油主要分布于南堡4、5号构造带。发现南堡油田1、2号构造带、老爷庙、高柳中浅层原油具有介于II、III类源岩(及相关原油)间的同位素与生标特征, 系混源油, 定量预测出混源油中沙二十三段源岩的贡献最高达82%。本研究关于E_{s2+3}系南堡凹陷重要的油气源的认识不同于以往研究, 为该区进一步油气勘探提供了重要依据。

关键词: 南堡凹陷; 混源油; 生物标志物; 单体烃碳同位素; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2011)06-1064-09

收稿日期: 2011-04-29

Mixed Oil Distribution and Source Rock Discrimination of the Napu Depression, Bohai Bay Basin

LI Su-mei^{1,2}, PANG Xiong-qi^{1,2}, WAN Zhong-hua^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Research Center of Basin and Reservoir, College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

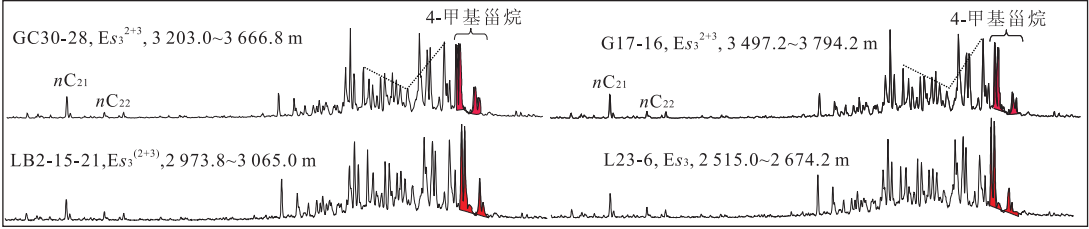
Abstract: The origin of the hydrocarbons in the Napu depression is still not clear. Compound specific carbon isotope of *n*-alkanes has been utilized, combined with biomarkers to carry out detail geochemical investigations for the oils and source rocks within the whole depression for the first time. The results show that the Tertiary E_{s3} rocks (type-I) in the Shichang sub-depression are characterized by abundant 4-methyl steranes and dibenzothiophenes but low concentration of gammacerane with a “tilted linear” shape of compound specific carbon isotope distribution. The type-I genetic related oil has been discovered in the Tertiary E_{s3} interval of Gaoshangpu and Liuzan oilfields. The Tertiary E_{s2+3} rock (type-II) in the south Nanpu depression is featured by a relatively high content of gammacerane while little 4-methyl sterane contained, and it has a similar carbon isotope curve and dibenzothiophene concentration to that of the type-I rock. The type-II genetic oil has been discovered in the Ordovician burial hills. The Tertiary E_{s1}-E_{d3} rock (III) in the Nanpu depression is distinguished from the others by obviously high content of diasteranes and pregnant series with a relatively lower $\delta^{13}\text{C}$ of *n*-alkane and nearly a “W” shape of carbon isotopic pattern. The type-III genetic related oils was discovered in the NP4, 5 tectonic belts. It is observed that the oils in the NP1, 2 tectonic belts, Laoyemiao oilfield and the Tertiary Nm-E_{s1} of Gaoshangpu and Liuzan oilfield have intermediate biomarker and isotope characteristics between the type-II and type-III source rocks and the related oils, indicating mixed sources of the oils derived from both the type-II and type-III rocks. It is found that the related contribution of the E_{s2+3} source rocks to the mixed oils is up to 82%. We suggest that the E_{s2+3} is an important set of source rock in the Nanpu depression, responsible for most of the oils. This result is different from the previous ones that most of the oils in the Nanpu depression were derived from the E_{s1}-E_{d3} source rocks rather than the E_{s2+3}, which provides essential information for further petroleum exploration of the depression.

Key words: Napu depression; mixed oil; biomarkers; compound specific isotope; petroleum geology.

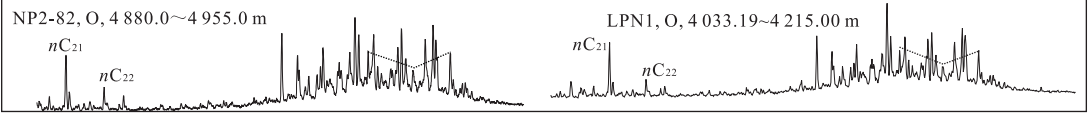
基金项目: 国家自然科学基金(No. 40973031); 中国石油大学资源与探测国家重点实验室基金(No. PRPJC2008-02).

作者简介: 李素梅(1968—), 女, 教授, 主要从事有机地球化学研究工作. E-mail: sml8888@yahoo.com.cn

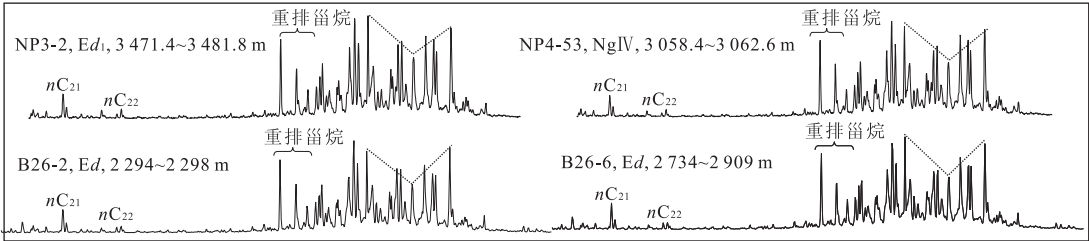
I类:高柳深层油(E_{S_3})



II类:南堡潜山原油



III类:南堡3、4号带、北堡油



IV类:南堡1、2号带、老爷庙、高柳中浅层

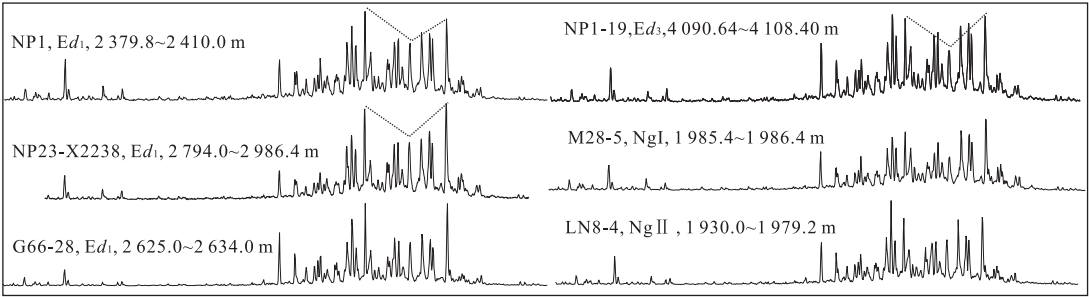


图 2 南堡凹陷不同类型原油 m/z 217 质量色谱

Fig. 2 The m/z 217 mass fragmentogram of saturate fractions from the representative oils in the Nanpu depression

基甾烷/规则甾烷值一般为 0.16~0.27(李素梅等, 2008),而其他原油一般 <0.1 。I类油还具有相对低丰度重排甾烷(图 2)、低丰度伽玛蜡烷特征。第 I 类原油单体烃碳同位素曲线也不同于其他原油,相对较重,呈从低碳至高碳逐渐变轻的斜“直线型”($<nC_{29}$ 部分)(参见下文),而海相原油一般呈近水平的直线型(Li *et al.*, 2010;李素梅等,2010)。南堡凹陷 LPN1、NP2-82 井奥陶系潜山原油划为第 2 类(II),典型特征是富集低分子量孕甾烷、三环萜烷系列(图 2,3e);饱和烃成熟度参数 C_{29} 甾烷 $aaa_{20}S/(S+R)$ 、 $Ts/(Ts+Tm)$ 、芳烃甲基菲指数与二苯并噻吩参数 4,6-/1,4-DMDBT(二甲基二苯并噻吩)显示其较高的成熟度特征,反映深源供烃。第 II 类原油碳同位素曲线与 I 类有些相似,但高碳数部分偏重(图 4a,4d)。老爷庙油田 M113-1 井(3 139.6~3 229.0 m, Ed_3)原油也划为 II 类,其碳同位素与潜

山原油相近,并且重排甾烷/规则甾烷、 C_{27-}/C_{29} -规则甾烷值相对较低,具有类似高柳深层沙三成因原油和南堡凹陷 E_{S_2+3} 烃源岩的特征,反映成因相关性(下文讨论)。

南堡凹陷北堡、3-5 号构造带原油划为第 3 类(III),典型特征是 4-甲基甾烷与伽玛蜡烷含量相对较低(图 2,图 3a,3c)、重排甾烷含量相对较高(图 2,图 3b)、 $2xC_{24}$ -四环/ C_{26} -三环萜烷值大大高于其他原油(图 3d)、三环萜/五环萜值(图 2,图 3e)、 $(C_{21}+C_{22})/C_{29}$ -甾烷值相对较低。此外,成熟度参数 4,6-/1,4-DMDBT 显示最低值(图 3f)。第 III 类原油的碳同位素曲线明显区别于其他原油,近似呈压扁的“W”型(图 4c,4f)。以上生物标志物参数与同位素反映第 III 类原油的成因/油源不同于其他原油。

第 4 类(IV)原油为最为普遍的一类,分布最广,包括南堡 1、2 号构造带、老爷庙油田及高柳中浅层

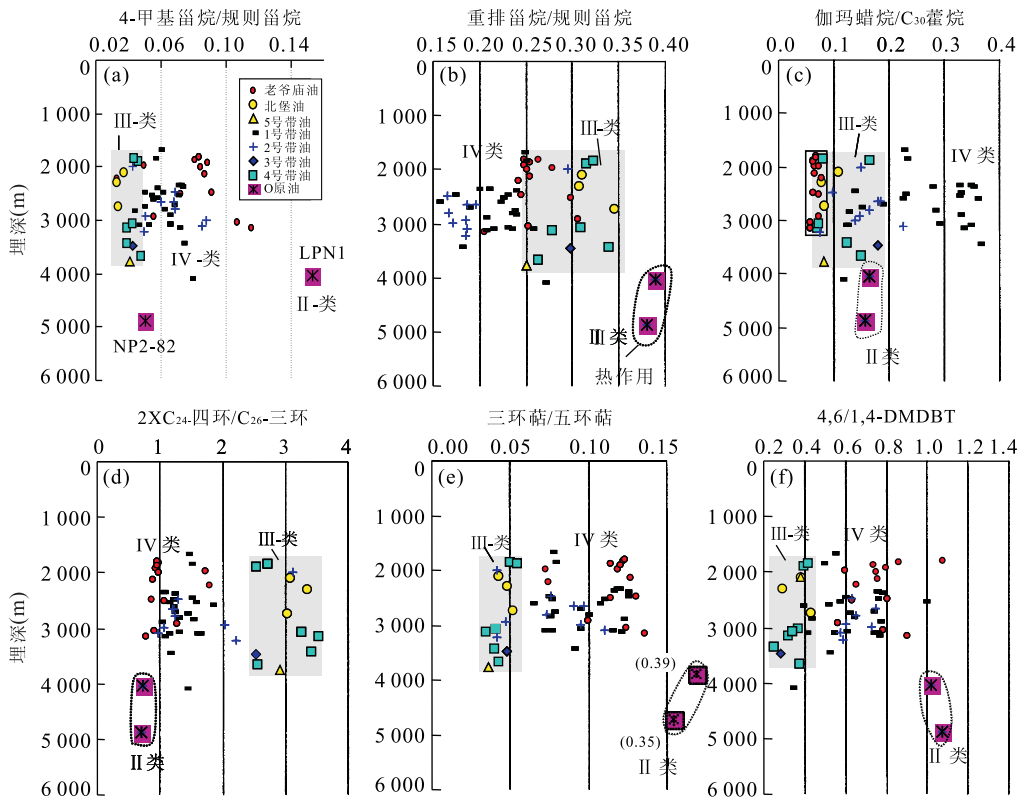


图 3 南堡凹陷原油族群划分

Fig. 3 Classification of oil-families for the oils in the Nanpu depression

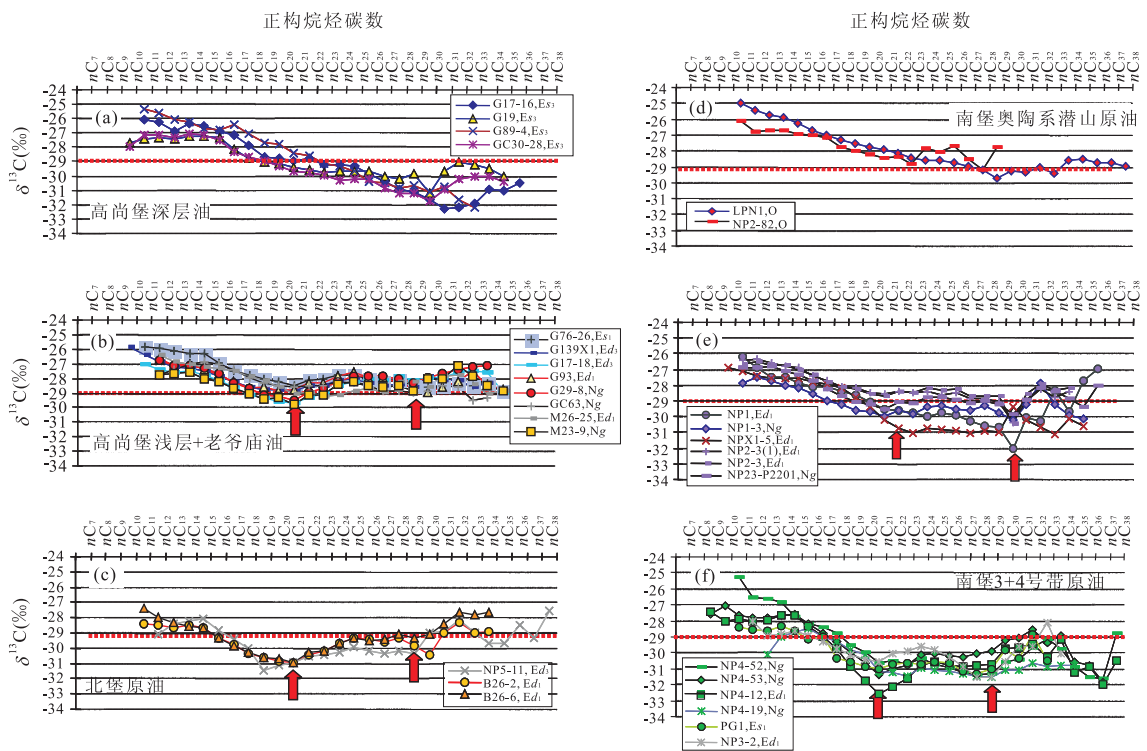


图 4 南堡凹陷不同类型原油单体烃碳同位素曲线分布型式

Fig. 4 Distribution pattern of compound specific carbon isotope of n -alkanes for the oils in the Nanpu depression

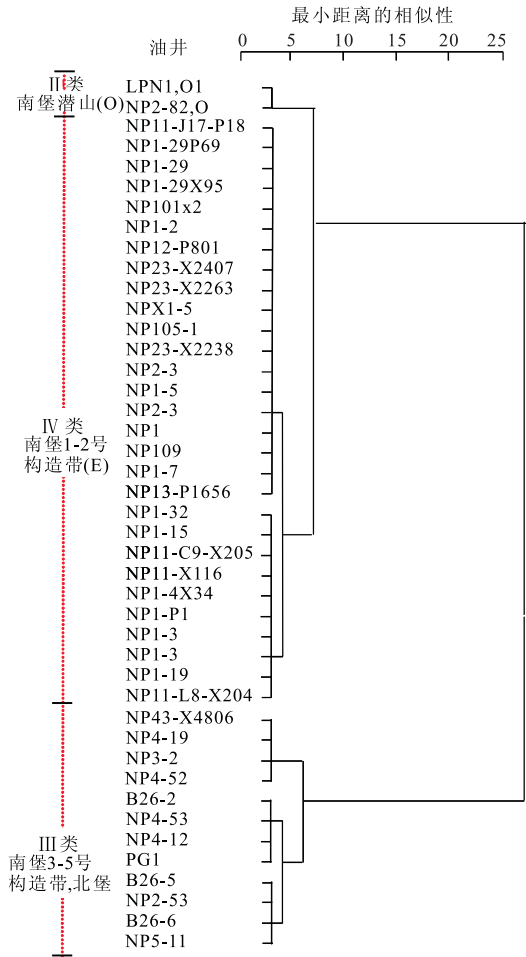


图 5 南堡油田原油聚类分析谱系

Fig. 5 Cluster analysis of the oils in the Nanpu oilfield

原油(图 1). 对比发现,第Ⅳ类原油通常具有介于Ⅱ、Ⅲ类原油之间的生标特征(图 2,3,4b,4e),单体烃碳同位素的中间值特征最为明显(图 4b,4e),认为其主要为Ⅱ、Ⅲ类成因原油的混源油(下文讨论).依据上述主要对比指标,用 SPSS 软件绘制的南堡油田原油聚类树枝图如图 5 所示.

4 南堡凹陷油源解析

4.1 烃源岩生烃潜力

烃源岩生烃潜力分析表明,南堡凹陷东三段、沙一、沙二十三段均发育达到较好生油潜力级别的烃源岩,如 NP288、NP2-82 井(近年钻遇深部暗色烃源岩的少数探井)沙二十三段有机碳含量分别高达 2.9%、2.4%;总烃高达 851、2 082 ppm. 这部分烃源岩当前埋藏相对较深,其中沙一与沙二十三段一般在 4 000 m 以下. 如果将这部分烃源岩的生烃潜力进行恢复,其生烃潜能应比当前的测定值高,因部分

烃类排出,目前仅为剩余生烃潜能.

4.2 油源识别

4.2.1 生物标志物对比 以往研究已确认高柳地区沙三段深层油(Ⅰ类油)主要来自拾场次洼沙三段烃源岩(Ⅰ类岩)(梅岭等,2008;李素梅等,2008). 本研究侧重高柳中浅层及南堡油田原油的油源分析. 甾萜类指纹对比揭示,南堡凹陷第Ⅱ、Ⅲ类原油分别与沙二十三、东三一沙一段烃源岩有较好的相关性,反映亲缘关系;第Ⅳ类显示介于第Ⅱ、Ⅲ类原油及相关烃源岩之间的特征,应为混源油. 生物标志物参数对比表明,南堡油田原油 Pr/Ph 值(1.15~1.67)与林雀次洼、部分北堡的沙二十三段烃源岩(0.94~1.78)具有较好的相似度,与沙一段一东三段多数烃源岩(Pr/Ph 多为 1.82~3.34)差异较大(图 6a). 各项生标参数一致显示,沙二十三段烃源岩各项参数相对稳定,指示性质相对稳定,而沙一—东三段烃源岩变化较明显,南堡油田原油与沙二十三段烃源岩聚类相关(图 6),指示其为南堡油田的主力烃源岩. Pr/Ph、4-甲基甾烷/规则甾烷、CPI、2x C_{24} -四环/ C_{26} -三环萜一致显示,东三段烃源岩与原油的相似度较低,埋深接近 3 800 m 的东三一沙一段烃源岩才显示与原油相近的特征(图 6e, 6f, 6g). 南堡油田沙二十三段烃源岩伽玛蜡烷/ C_{30} 藿烷值分布范围较大且具有随埋深增加而增加的趋势(图 6b),暗示深层烃源岩沉积时水体分层或咸度增加,这种环境更有利于形成优质烃源岩.

C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} -规则甾烷相对丰度三角图指示,高柳地区沙三段原油与沙二十三段烃源岩聚类相关;中浅层原油分布于同区东三一沙一段烃源岩及南侧林雀次洼沙二十三段烃源岩附近,显示混源成因. 类似地,南堡油田原油与同区沙二十三段烃源岩具有较好的相似度,与部分东三一沙一段烃源岩具有较好的相关性,指示前者为主力烃源岩,后者的贡献不能排除.

芴、氧芴、硫芴相对丰度反映母源岩的原始沉积环境(Lin and Wang, 1991),三芴系列分布图显示,陆地高尚堡油田、海上南堡油田原油均与沙二十三段烃源岩具有更高的相似度,显示较好的亲缘关系(图 7). 南堡凹陷多数东三段—沙一段烃源岩样品与原油相关性较差(图 7),暗示其成烃贡献可能相对较少.

4.2.2 单体烃碳同位素对比 南堡凹陷拾场次洼及其邻区沙三段烃源岩同位素近似呈“斜直线型”,且从低碳到高碳同位素值有逐渐降低的趋势

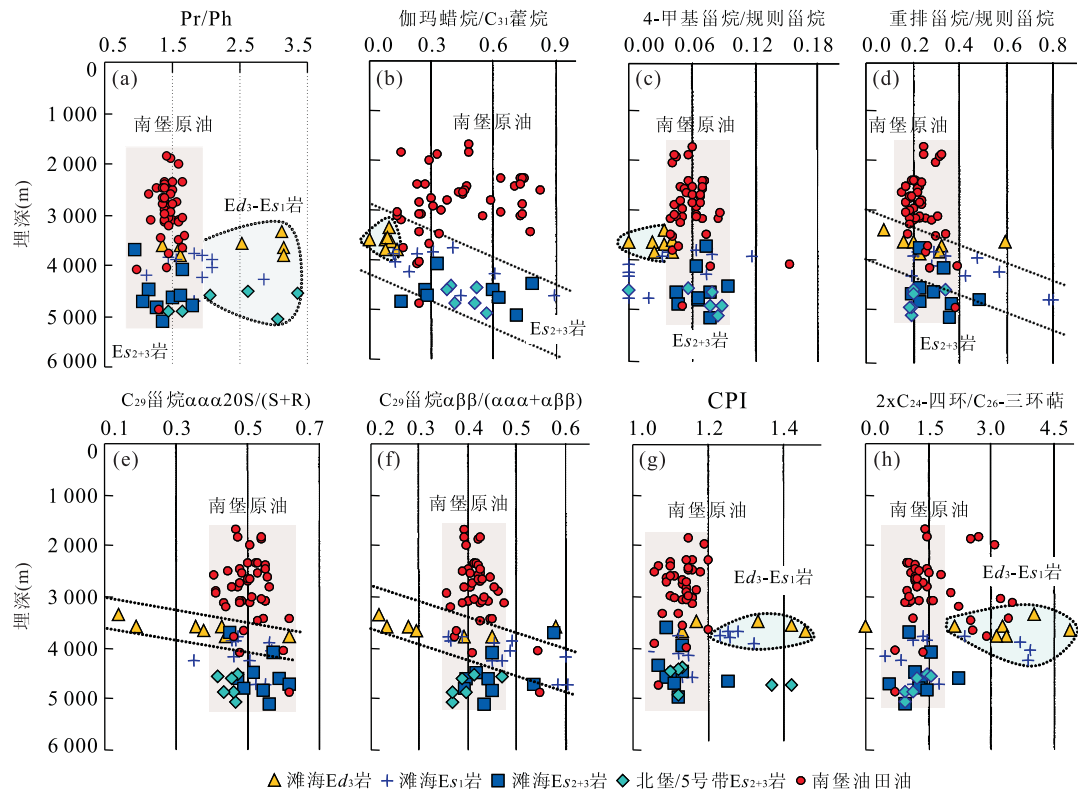


图 6 南堡油田油-岩多参数对比

Fig. 6 Oil-source correlation based on biomarker parameters

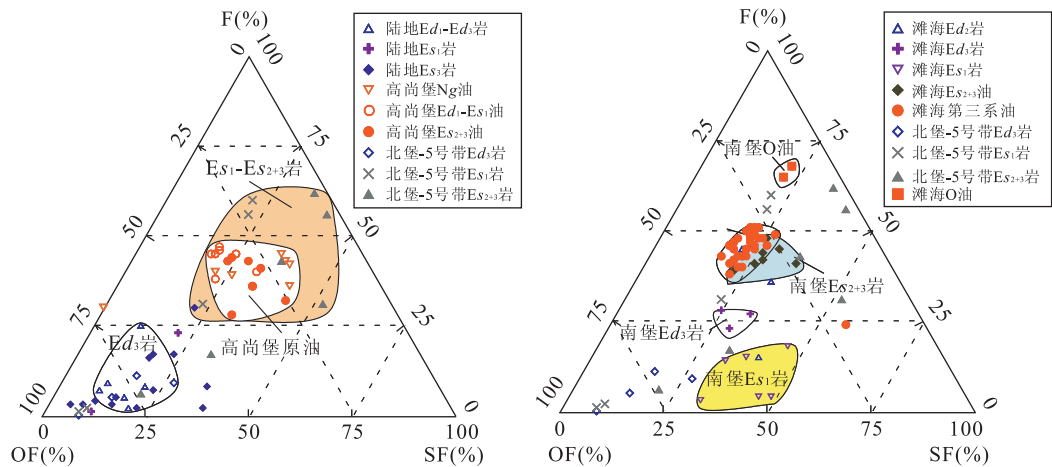


图 7 南堡凹陷原油、烃源岩苈、氧苈、硫苈聚类相关图

Fig. 7 Ternary plot showing the relative distribution of fluorene, dibenzofuran and dibenzothiophene in the oils and source rock extracts from the Nanpu depression indicating oil source

(图 8a),与高柳地区沙三段深层原油(I类油)同位素曲线位置基本重叠(图 4a,8a),显然二者为油源对应关系.南堡凹陷南部滩海沙二十三段烃源岩(II类)同位素曲线也曾近“斜直线型”,与南堡潜山原油(II类)相似并且位置相近(图 4d,8b),指示两者具有成因相关性.北堡、南堡 3—5 号构造带原油(III类)碳同位素曲线型式相似(图 4c,4f),并与沙一—

东三段烃源岩具有较好的相似度(图 8),表明两者具有亲缘关系.特别地,观察到南堡 1,2 号构造带原油、高柳中浅层、老爷庙油田原油(IV类)单体烃碳同位素值相似(图 4b,4e),如果叠加则显示界于沙二十三段、沙一—东三段烃源岩(图 8)及其相关原油(图 4b,4e)之间的特征,认为主系混源油,来自沙二十三段、沙一—东三段烃两套烃源岩.以上同位素

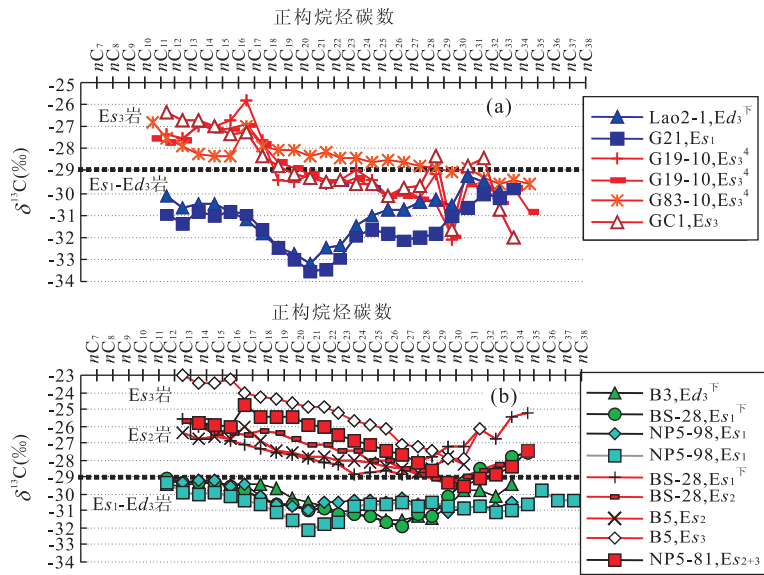


图 8 南堡凹陷烃源岩单体烃碳同位素曲线

Fig. 8 Distribution pattern of compound specific carbon isotope of *n*-alkanes for the source rocks in the Nanpu depression

表 1 南堡凹陷部分混源油中 Es₂₊₃成因原油相对贡献

Table 1 Percentage of the Es₂₊₃ genetic oils in the mixed oils

油田	井号	井深(m)	层位	贡献量(%)
高尚堡	GC63	2 156.4~2 224.0	Ng	63
高尚堡	G29-8	2 202.8~2 206.0	Ng	54
高尚堡	G93	2 435.5~2 444.0	Ed ₁	55
高尚堡	G66-28	2 625.0~2 634.0	Ed ₁	25
高尚堡	G59-10	2 656.0~2 705.2	Ed ₁	42
高尚堡	G17-18	2 313.0~2 419.2	Ed ₃	36
高尚堡	G97X5	2 816.0~2 856.0	Ed ₃	46
高尚堡	G139X1	3 296.6~3 303.2	Ed ₃	52
高尚堡	G76-26	2 760.0~3 001.6	Es ₁	82
老爷庙	M23-9	1 972.0~1 975.0	Ng I	33
老爷庙	M26-25	2 503.4~2 544.0	Ed ₁	75
南堡油田	NP1-3	3 084.4~3 154.4	NgIV	31
南堡油田	NPX1-5	2 797.4~2 895.0	Ed ₁	48
南堡油田	NP12-P801	3 084.0~3 272.0	Ed ₁	39
南堡油田	NP13-P1656	3 435.0~3 620.0	Ed ₁	29
南堡油田	NP1	2 379.8~2 410.0	Ed ₁	51
南堡油田	NP1-29	2 355.4	Ed ₃	40
南堡油田	NP2-3	2 649.4~2 480.4	Ed ₁	71
南堡油田	NP23-P2201	2 924.4~3 020.0	Ng II	54
南堡油田	NP2-82	4 880.0~4 955.0	O	75

的对比结果与生物标志物基本一致。

4.3 混源相对贡献预测

选用第Ⅱ类 LNP1 井潜山(O)原油作为 Es₂₊₃成因端元油(A);选用第Ⅲ类原油 B26-2、NP3-2 等井的均一化值作为 Es₁-Ed₃成因端元油(B);采用正构烷烃(<nC₂₁相对稳定部分)单体烃碳同位素途径对南堡油田等原油进行混源定量计算。公式如下:

$$m(\%) = (c_i \times \delta C_i - c_{Eb} \times \delta C_{Eb}) / (c_{Ea} \times \delta C_{Ea} -$$

$$c_{Eb} \times \delta C_{Eb}) \times 100\%, \quad (1)$$

其中,δC_i为原油*i*的正构烷烃碳同位素值;δC_{Ea}为端元油 A 的正构烷烃碳同位素值;δC_{Eb}为端元油 B 的正构烷烃碳同位素值;c_i,c_{Ea},c_{Eb}为原油*i*、端元油 A、B 的正构烷烃浓度;*m*为测试原油中端元油 A 的混入比例。计算结果表明,南堡凹陷原油中沙二十三段成因原油的贡献量不等,分布范围可为 25%~82%。南堡 2 号构造带中沙二十三段成因原油的贡

献相对较高,一般超过50%;南堡1号构造带沙二十三段的贡献量约为29%~51%(表1)。预测出老爷庙、高尚堡中浅层原油中均不同程度地混有沙二十三段成因原油。

地质研究表明,南堡凹陷原油具有混源的地质条件:(1)多套烃源岩空间分布叠置;(2)不同类型烃源岩生排烃时间有重叠,为混源油的形成提供了物质条件;(3)深切油源断层发育,为深部油气的垂向运移提供了运移通道;(4)深、浅层冲积扇等砂体发育,为混源油形成与聚集提供了运载体。相关研究正在进行中。

5 结论

(1)南堡凹陷主要存在3大类烃源岩,分别是拾场次洼 E_{s3} 、林雀次洼\柳南次洼\曹妃甸次洼 E_{s2+3} 、南堡凹陷 E_{s1} - E_{d3} 。烃源岩生烃潜能分析表明,南堡凹陷存在有利沙二十三段烃源岩。南堡凹陷主要有四类原油,分别是第Ⅰ类高柳深层(E_{s3})、第Ⅱ类南堡油田潜山(O)、第Ⅲ类北堡+南堡3、4号构造带、第Ⅳ类高柳中浅层+老爷庙油田及南堡1+2号构造带原油,分布最为普遍。不同类型原油和烃源岩生物标志物与碳同位素均有显著差异。

(2)油源对比表明,Ⅰ—Ⅲ类原油分别与拾场次洼沙三段、林雀—曹妃甸次洼沙二十三段、沙—东三段烃源岩具有较好的成因联系,第Ⅳ原油为混合成因。油源对比表明,沙二十三段烃源岩为南堡油田重要的主力烃源岩之一。

(3)混源定量表明,南堡1-2号构造带沙二十三段源岩的贡献量高达82%,老爷庙与高柳中浅层也为不同程度的混源油。南堡凹陷混源油的普遍存在、深部烃源岩对中浅层原油具有成烃贡献的认识,对于指导该区油气勘探方向具有重要实用意义,对于该区油气成藏机理研究具有重要理论意义。

References

Jia, Q. S., Li, S. L., Ma, Q., et al., 2006. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the No. 2 structural belt, of the Nanpu subbasin, eastern Hebei oilfield, and source rock correlation. *Journal of Geomechanics*, 12(4): 469—475 (in Chinese with English abstract).

Jiang, C. Q., Li, M. W., Osadetz, K. G., et al., 2001. Bakken/Madison petroleum systems in the Canadian

Williston basin. Part 2: molecular markers diagnostic of Bakken and Lodgepole source rocks. *Organic Geochemistry*, 32(4): 1037—1054. doi: 10. 1016/S0146—6380(01)00079—1

Li, S. M., Jiang, Z. X., Dong, Y. X., et al., 2008. Genetic type and distribution of the oils in the Nanpu depression, Bohai Bay basin. *Geoscience*, 22(5): 817—823 (in Chinese with English abstract).

Li, S. M., Pang, X. Q., Jin, Z. J., et al., 2010. Petroleum source in the Tazhong uplift, Tarim basin: new insights from geochemical and fluid inclusion data. *Organic Geochemistry*, 41(6): 531—553. doi: 10. 1016/j. orggeochem. 2010. 02. 018

Li, S. M., Pang, X. Q., Li, M. W., et al., 2003. Geochemistry of petroleum systems in the Niuzhuang south slope of Bohai Bay basin—Part 1: source rock characterization. *Organic Geochemistry*, 34(3): 389—412. doi: 10. 1016/S0146—6380(02)00210—3

Li, S. M., Pang, X. Q., Yang, H. J., et al., 2010. Generation, migration and accumulation model for the marine oils in the Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 1—11 (in Chinese with English abstract).

Lin, R. Z., Wang, P. R., 1991. PAH in fossil fuels and their geochemical significance. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 5(1—4): 257—262. doi: 10. 1016/0743—9547(91)90034—U

Mei, L., Zhang, Z. H., Wang, X. D., et al., 2008. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation in Nanpu sag, Bohai Bay basin. *Journal of China University of Petroleum*, 32(6): 40—46 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. D., Liu, L. F., Zhang, Z. H., et al., 2008. Source analysis of oils from the Ordovician in the shoal zone, Nanpu sag, Bohai Bay basin. *Geoscience*, 22(2): 264—272 (in Chinese with English abstract).

Zheng, H. J., Dong, Y. X., Zhu, G. Y., et al., 2007a. High-quality source rocks in Nanpu sag. *Petroleum Exploration and Development*, 34(4): 385—391 (in Chinese with English abstract).

Zheng, H. J., Dong, Y. X., Wang, X. D., et al., 2007b. The generation and characteristics of source rocks in Nanpu oil-rich depression, Bohai Bay basin. *Natural Gas Geoscience*, 18(1): 78—83 (in Chinese with English abstract).

Zhou, H. M., Cong, L. Z., 1999. Polyphase extension and its impact on hydrocarbon accumulation in fault basin—case analysis of polyphase rifting in Nanpu depression.

Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 24(6): 625—629 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

贾齐山,李胜利,马乾,等,2006.冀东油田南堡凹陷南堡 2 号构造带烃源岩地球化学特征与油源对比.地质力学学报,12(4): 469—475.

李素梅,姜振学,董月霞,等,2008.渤海湾盆地南堡凹陷原油成因类型及其分布规律.现代地质,22(5): 817—823.

李素梅,庞雄奇,杨海军,等,2010.塔里木盆地海相油气源与混源成藏模式.地球科学——中国地质大学学报,35(4): 1—11.

梅玲,张枝焕,王旭东,等,2008.渤海湾盆地南堡凹陷原油地

球化学特征及油源对比.中国石油大学学报(自然科学版),32(6): 40—46.

赵彦德,刘洛夫,张枝焕,等,2008.渤海湾盆地南堡凹陷滩海地区奥陶系原油油源分析.现代地质,22(2): 264—272.

郑红菊,董月霞,朱光有,等,2007a.南堡凹陷优质烃源岩的新发现.石油勘探与开发,34(4): 385—391.

郑红菊,董月霞,王旭东,等,2007b.渤海湾盆地南堡富油气凹陷烃源岩的形成及其特征.天然气地球科学,18(1): 78—83.

周海民,丛良滋.1999.浅析断陷盆地多幕拉张与油气的关系——以南堡凹陷的多幕裂陷作用为例.地球科学——中国地质大学学报,24(6): 625—629.