

苏北盆地源岩无双峰生烃和未低熟油

刘玉瑞

(中国石油化工股份有限公司 江苏油田分公司 科技装备处, 江苏 扬州 225009)

摘要:针对苏北盆地“未低熟油”理论盛行,却与勘探效果完全不符合的矛盾,深入剖析前人论著、甄别资料真伪,发现问题如下:误用原始资料,把野值当证据;存在认识盲区,成烃模式缺乏多参数严谨论证,推论不成立;有油/岩亲缘对比,未做油藏/烃灶成熟度匹配一致性验证;脱离实践,认识经不起源岩钻探气测资料等勘探检验。由此证明,所谓“源岩早期非干酪根生油、双峰成烃模式”是假的,未低熟油并不存在。基于此,利用大数据资料分析误差、剔除野值,优选出油/岩的甾烷 $C_{29}S/(S+R)$ 、 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 、萜烷 $C_{31}S/(S+R)$ 、 $C_{32}S/(S+R)$ 和 CPI 、 OEP 成熟度敏感参数,将干酪根热降解晚期生成原油分为浅成熟油、中成熟油、成熟油3类。 $R_o>0.70\%$ 的中成熟—成熟源岩,与大量的中成熟—成熟油成熟度参数匹配很好; R_o 在 $0.60\% \sim 0.70\%$ 的浅成熟源岩,与少量的浅成熟油成熟度参数有一些匹配关系; $R_o<0.60\%$ 的未成熟源岩,无原油可与之匹配,表明没有非干酪根的未低熟油。实践反映,中成熟—成熟源岩钻探气测异常明显,由其供油气的圈闭勘探效果好,已探明石油储量 99.83%属此类原油;浅成熟源岩气测无或微弱异常,单靠此类油源不足以形成商业规模的油藏,多数仅见油气显示;未成熟源岩气测无异常,若无异地成熟油供给,圈闭不成藏。

关键词:生标参数;匹配关系;油源对比;无早期生油;无未低熟油;苏北盆地

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

Bimodal hydrocarbon generation and immature oil do not exist in the North Jiangsu Basin

LIU Yurui

(Scientific and Technical-equipment Department, SINOPEC Jiangsu Oilfield Company, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: A contradiction in the “immature oil in North Jiangsu Basin” theory prevails and the results of geological exploration is not consistent with it. After making a thorough analysis of previous work and validating the data, the following problems were noticed: misusing of raw data, taking outliers as evidence; multi-parameter consideration is lacking in the hydrocarbon generation model, which makes the inference invalid; the consistency of reservoir and hydrocarbon maturity was not verified after the oil-source correlation; hypotheses do not stand the test of source rock gas logging data and other prospecting results. These indicate that the “non-kerogen source rock early maturation & bimodal hydrocarbon generation model” could be incorrect, and the “immature oil” may not exist. After using big an extensive data set to analyze errors and exclude outliers, the sterane $C_{29}S/(S+R)$ and $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$, the terpane $C_{31}S/(S+R)$ and $C_{32}S/(S+R)$, as well as CPI and OEP maturity sensitive parameters of hydrocarbon and rocks were optimized. Crude oil from the thermal degradation of late kerogen can be divided into 3 types: low maturity oil, medium maturity oil and mature oil. It is pointed that the maturity parameters of a large quantity of medium maturity source rocks ($R_o>0.70\%$) could match well with those of medium maturity oil; the maturity parameters of low maturity source rocks ($0.60\%\leq R_o\leq 0.70\%$) have only some matching relationships with a small number of low maturity oil maturity parameters; no crude oil matched the immature source rocks ($R_o<0.60\%$). The results indicate that the non-kerogen immature oil does not exist. Prominent anomalous data can be detected in the medium maturity and mature source rock gas logging. Hydrocarbon traps with these source rocks usually have good exploration results, and 99.83% of the discovered oil reserves belong to this type. There is little or no anomalous data in the low maturity source rock gas logging. This source rock is unable to form a commercial scale reservoir, and only some shows of hydrocarbon may exist. No anomalous data can be found in immature source rock gas logging. If there is no mature oil supply from other places, reservoirs will not be formed.

Key words: biomarker parameters; matching relationship; oil-source correlation; no early maturation; no immature oil; North Jiangsu Basin

1982 年,国内首篇质谱法研究油/岩生标物特征、低熟原油的论文发表^[1];1985 年首次报道苏北盆地存在低熟原油^[2]。嗣后,阐述未熟、低熟(合称未低熟)油的论著不断涌现^[3-17],部分学者的专著、论文影响甚广。苏北盆地被看作是中国最早发现未低熟油、建立源岩双峰生烃模式、实践效果好的地区之一。

近 30 年来,多家油公司在苏北盆地不停地勘探未低熟油,有学者不断肯定该理论^[18-25];有学者^[26]提出“未熟油”异议,否定双峰生烃;有学者^[27-29]认为未低熟油贡献甚微。期间,一批外甩井纷纷落空,引发怀疑此理论;2016 年临泽次凹临 5 井预探落空,与本文钻前预测吻合,更证实不存在未低熟油。

1 未低熟油认识商榷

为避免与国内所谓非干酪根生成的“未熟油、低熟油、未低熟油”概念和分类混淆,凡引文的沿用原概念;现以干酪根热降解晚期生成的原油按成熟度分为 3 类(表 1):浅成熟油、中成熟油、成熟油^[30];相应地,源岩分为未熟、浅成熟、中成熟和成熟 4 类,划分依据后叙。将甾烷 $C_{29}S/(S+R)$ 、 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$ 和萜烷 $C_{31}S/(S+R)$ 、 $C_{32}S/(S+R)$ 分别记为 SM_1 、 SM_2 和 HM_1 、 HM_2 。

1.1 低熟油认识提出期

1983 年,按全国油气资源评价部署,江苏油田地质科学研究院(以下简称地研院)与中国科学院地球化学研究所(以下简称地化所)合作,开展了苏北盆地源岩评价;1984 年各出 1 份报告,涉低熟油认识^[9]。地研院提出:①苏北盆地源岩热演化分为未熟、低熟和成熟 3 个阶段。未熟期,干酪根不降解成油,源岩无效;低熟期,源岩烃转化率升至 2%左右, T_{max} 接近 435℃, OEP 在 1.2 左右, $R_o < 0.50\%$,未达到干酪根热降解成油门槛,但有可能生排出一部分油,如高邮北斜坡少量油流和多处油

显示可能属此类;成熟期,源岩 $R_o > 0.50\%$, 烃转化率大于 3%, 饱和烃大于 40%, $OEP = 1 \sim 1.15$, T_{max} 在 437℃左右。②海安凹陷安 2 井 2 932~2 941 m 阜三段(E_1f_3)产高密度、高黏度、高含蜡原油, $SM_1 = 0.15$, $SM_2 = 0.13$, $HM_2 = 0.43$,属成熟度非常低的类型;其生物标志物特征与安 1 井 E_1f_2 源岩很相似(表 2), SM 值还低 0.03,推断安 2 油源是浅于安 1 井成熟度更低的 E_1f_2 源岩,即在成熟门槛附近埋藏相对较浅的源岩可形成工业油藏。

地化所专家把 1 份报告、26 块岩样和 15 个油样化验资料发表论文 4 篇^[2-5],要点如下:①借巴黎盆地侏罗系页岩 $SM = 0.25$ 、 $HM = 0.50$ 的生油门槛,取 $R_o = 0.60\%$ 作为本区源岩生成低熟油与成熟油的分界;文献^[5]则取 $SM_1 = 0.18$ 、 $SM_2 = 0.20$ 作为高邮凹陷古近系泥岩的生油门槛。认为安 2 井油样低于上述标准,是一种特殊的低熟油,油源和油藏成因与地研院观点一样。②根据油/岩对比,指出苏北盆地原油甾萜烷参数一般比其源岩的高,这一现象与济阳坳陷的油/岩关系相似。认为这种差异的主因是运移效应,即原油甾萜烷成熟度随运移距离增大而变高,并推断供油源岩成熟度比原油的更低,表 3 成熟度低于生油门槛的源岩能找到非干酪根热降解的低熟油。

分析这些文献的低熟油核心观点,发现问题如下:

(1)资料错误,低熟油推论不成立。各文皆指安 2 井原油产自 E_1f_3 ,有学者^[11]指 E_1f_3 砂岩油藏;实际是 E_1f_2 源岩夹层 2 m 玄武岩油藏。录井反映安 2 井从 2 931 m 揭开 E_1f_2 源岩到井底 3 051 m 未穿,全段 120 m 气测全烃由基值 0.2%左右升到 2%~6%, $C_1H_4-C_4H_{10}$ 组分齐全,全烃升高倍数大,重烃丰富,证明源岩已大量生排烃。安 1 井 E_1f_2 源岩 2 530~2 740 m,全段 210 m 气测基值无升高,仅 7 处单层厚度不足 1 m 异常小峰;2 681~2 701 m 岩心 3 块样品 R_o 分别为 0.58%、0.59%和 0.64%,高于 $R_o = 0.50\%$ 生油门槛,介于文献^[2-5] $R_o = 0.60\%$ 生油门槛, $CPI = 1.12$, $OEP = 0.82$,表明该套源岩进入大量生烃、尚未大量排烃阶段,源岩基质微孔隙无油气,故气测基值无异常。安 10 井 E_1f_2 源岩 2 390~2 591 m,全段 201 m 气测无异常,2 433 m 岩心 $R_o = 0.46\%$, $SM_1 = 0.18$, $SM_2 = 0.15$, $HM_1 = 0.42$, $CPI = 1.4$, $OEP = 1.31$,说明源岩未进入生烃门槛。可见,

表 1 原油成熟度分类

Table 1 Maturity classification of crude oil in North Jiangsu Basin

参数	浅成熟油	中成熟油	成熟油
SM_1	0.14~0.20	0.20~0.30	>0.30
HM	0.45~0.55	0.50~0.55	>0.55
CPI/OEP	0.70~1.20	0.85~1.20	0.93~1.15

表 2 苏北盆地油藏/源岩生标成熟度匹配关系

Table 2 Matching relationship of biomarker maturity between reservoirs and source rocks in North Jiangsu Basin

井号	样品	井深/m	层位	SM ₁	SM ₂	HM ₁	HM ₂	R _o /%	CPI	OEP	引用说明	匹配关系
管 1	原油	921.5	E ₁ f ₄	0.17	0.20	0.48	0.56		0.94	0.92	文献[7,9-10]	不匹配
管 2	源岩	932.6	E ₁ f ₄	0.06	0.27			0.53	4.10	6.27		不匹配
黄 20	原油	3 148.0	E ₁ f ₄	0.59	0.51	0.56	0.57		1.02	0.99	源岩裂缝油藏	匹配
黄 20	原油	3 148.0	E ₁ f ₄	0.32	0.42	0.77					文献[5]	匹配
黄 20	源岩	3 163.6	E ₁ f ₄	0.43	0.43		0.59	0.94	1.12	1.11	文献[5]	匹配
安 2	原油	2 932.0	E ₁ f ₂	0.18	0.20	0.50	0.57		1.08	1.02	源岩内玄武岩油藏	不匹配
安 2	原油	2 932.0	E ₁ f ₂	0.15	0.13		0.43		1.08	1.14	文献[5]	不匹配
安 1	源岩	2 554.0	E ₁ f ₂	0.15	0.15	0.48	0.38	0.58	1.40	0.73		不匹配
安 1	源岩	2 692.0	E ₁ f ₂	0.18	0.16		0.42	0.64	1.12	0.84	文献[5]	不匹配
安 16	原油	3 650.0	E ₁ f ₂	0.35	0.25	0.54	0.56		0.96	0.85	源岩裂缝油藏	匹配
安 16	源岩	3 670.9	E ₁ f ₂	0.36	0.23	0.56	0.55	0.74	0.95	0.82		匹配
卞 1	原油	1 729.0	E ₁ f ₂	0.36	0.31	0.55			0.99	0.87	文献[7,9]	不匹配
卞 2	源岩	1 578.0	E ₁ f ₂	0.11	0.15	0.36	0.41	0.55	0.70	0.45		不匹配
塔 1	原油	1 408.6	E ₁ f ₃	0.32	0.22	0.57	0.57					不匹配
李 1	原油	1 592.0	E ₁ f ₂	0.20	0.17	0.56	0.54		0.98	0.79	文献[6-7,9]	不匹配
李 1	源岩	1 551.4	E ₁ f ₂	0.06	0.14	0.49	0.15	0.54	1.18	0.56		不匹配
临 1	原油	2 549.0	E ₁ f ₃	0.17	0.17	0.46			1.09	0.82	文献[9]	匹配
临 1	源岩	2 657.1	E ₁ f ₂	0.19	0.16	0.52	0.46	0.66	1.04	0.88		匹配
吕 1	油砂	1 909.0	E ₁ f ₂	0.21	0.19	0.57	0.46				文献[7,9]	较匹配
吕 1	源岩	1 961.7	E ₁ f ₂	0.19	0.17	0.50	0.48	0.65	1.19	1.26	文献[7,9]	较匹配
天 96	原油	2 643.1	E ₁ f ₂	0.40	0.28	0.58	0.56		1.05	0.87	灰质源岩油藏	匹配
天 96-1	源岩	2 378.7	E ₁ f ₂	0.41	0.25	0.59	0.57	0.67	0.99	1.16		匹配
盐城 1	原油	3 180.0	E ₁ f ₂	0.17	0.17	0.44			1.11	0.67	源岩油藏;文献[7,9]	匹配
盐城 1	源岩	3 158.8	E ₁ f ₂	0.12	0.19	0.48	0.40	0.72	0.97	0.62		匹配
庄 2	原油	1 685.5	E ₁ f ₁	0.22	0.21	0.55	0.51		1.06	0.87		不匹配
庄 14	油砂	2 034.7	E ₁ f ₁	0.15	0.16	0.47	0.43		1.18	0.72		较匹配
庄 1	源岩	1 788.6	E ₁ f ₂	0.19	0.17	0.53		0.62	1.22	1.12		较匹配
安丰 1	原油	2 310.0	K ₂ t ₁	0.06	0.26	0.35	0.28		0.91	0.82	文献[6-7,9]	不匹配
安丰 1	原油	2 310.0	K ₂ t ₁	0.25	0.25	0.57	0.58		0.99	0.98		不匹配
安 10	源岩	2 800.0	K ₂ t ₂	0.13	0.20	0.45	0.37	0.62	1.03	1.21		不匹配
梁 6	油砂	2 473.0	K ₂ t ₁	0.17	0.19	0.47	0.52		1.02	0.90		不匹配
梁 6	源岩	2 383.0	K ₂ t ₂	0.20	0.24	0.54	0.44	0.51	2.08	2.42		不匹配
吴岔 1	砂岩	1 990.0	K ₂ t ₁	0.09	0.27	0.29			1.71	1.69	文献[7,9]	较匹配
吴岔 1	源岩	1 951.4	K ₂ t ₂	0.08	0.25	0.25	0.20	0.58	2.03	2.12		较匹配

表 3 各盆地沉积岩的甾萜参数^[2]

Table 3 Sterane-terpane parameters of sedimentary rocks in different basins

盆地名称	SM ₁	SM ₂	HM ₁
苏北盆地	0.03~0.44	0.07~0.30	0.33~0.65
沾化凹陷	0.04~0.35	0.03~0.38	0.36~0.65
准噶尔盆地	0.32~0.52	0.09~0.54	0.35~0.60
巴黎盆地	0.02~0.50	0.08~0.78	0.01~0.59

安 1、安 10 所处源岩是未排烃无效区。安 2 油藏埋深大于安 1 源岩,前文推测由安 1 或更浅源岩下排烃后,再向深处安 2 倒灌输导供油成藏,这种渤海湾、松辽盆地存在的油气运聚模式,迄今苏北盆地成熟油源区都未见到;此外,安 2 油层源岩至少

比安 1 岩心样品深 240 m,成熟度肯定超过安 1 岩样最大 R_o值 0.64%,即进入 R_o>0.60%的干酪根热降解晚期生烃阶段,形成安 2 井 E₁f₂源岩自生自储油藏。由此判断,安 2 油藏被作为典型未熟—低熟油的实例不复存在,前文推测的低熟油、源岩门槛

外找非干酪根生成低熟油也都不成立。

(2) 运移使原油甾萜烷成熟度增加无依据。有学者^[1-2]提出原油运移能使甾萜烷成熟度变大, 得到部分学者^[7]的肯定。显然这是早期认识盲区, 若此观点成立, 则参数无法识别原油成熟度, 因从供烃灶到油藏的运距和路径千差万别, 无法比较。部分学者^[2]做的油/岩对比, 其岩样全部浅于生油门槛, 油藏/烃灶关系难成立; 相反, 油样随运移距离增大, 其 SM 、 HM 值有的反而变小, 证明原文观点缺乏依据。譬如, 黄 20 井 E_1f_4 原油 $SM_1 = 0.32$, 真 19 井 E_2d_2 原油 $SM_1 = 0.30$, 真 49 井 E_2s_1 原油 $SM_1 = 0.28$, 这些井的油源同为邵伯次凹 E_1f_4 烃灶, 黄 20 是 E_1f_4 源岩裂缝油藏, 从 E_1f_4 烃灶到上覆 E_2d_2 、浅层 E_2s_1 运距渐大, SM 、 HM 值不升反降。事实上, 成熟度间微小差值不足以反映地质问题, 测试、烃灶变化皆可造成这些误差。

(3) 缺乏严谨的油/岩对比, 未做藏/灶匹配比较, 观点前后矛盾。上述各文共做 15 个油/26 块岩油源对比, 认为与 16 块岩有亲缘关系。但是, 成熟的油样 14 个、岩样 9 块, 仅黄 20、凌 1 井的油/岩成熟一致, 在未做油藏与供烃灶成熟匹配关系研究的前提下, 把甾萜烷小于生油门槛的岩样全部纳入低熟范畴, 认定表 2、表 3 参数无论多低, 都是可生成低熟油的源岩显然错误, 也与其文的高邮 2 000 m 以内是未熟无效源岩矛盾。此外, 报告推测的北斜坡低熟油, 实为大量的成熟油, 少量为中成熟油, 无一例来自 $R_o < 0.60\%$ 的源岩。

1.2 未低熟油认识发酵期

1985 年油田发展举步维艰, 油气勘探被迫寻找不足 0.1 km^2 的微断块圈闭^[31]。1986 年海安凹陷斜坡钻证实安丰 K_2t_1 富集油藏, 探明面积 2.3 km^2 、储量 $181 \times 10^4 \text{ t}$, 这是外围新区的首次突破。1987 年金湖凹陷卞杨断鼻带卞 1 井斩获 E_1f_{2+1} 富集油藏, 探明面积 5.2 km^2 、储量 $387 \times 10^4 \text{ t}$, 这是 1974 年金湖首获刘庄油气藏(面积 2.5 km^2 、储量 $110 \times 10^4 \text{ t}$)、油气发现停滞 13 年后苏北盆地斜坡带的一次更大突破; 随后多年, 全凹主要构造带圈闭群相继新发现几十个断块油藏, 实现了勘探从高邮凹陷向金湖、海安凹陷的接替转移; 录取了丰富资料, 为评价源岩提供了新平台。

有学者^[6]指出: ①苏北盆地以 $SM < 0.3$ 、 $HM < 0.5$ 、 $R_o = 0.60\%$ 作低熟油/岩的上限指标, 安丰 1、安 12、李 1、闵 15 等新油藏归低熟油类型(表 2)。②安丰 1 原油 $SM_1 = 0.06$ 、 $HM_2 = 0.28$, 低部位安 10 源岩 $SM_1 = 0.13$ 、 $HM_2 = 0.37$, 两者成熟度相近, 油源

来自 K_2t_2 低熟源岩。卞 1 原油成熟度偏低, 闵北、李庄油藏皆属低熟油, 其周缘受 E_1f_2 低熟源岩围限, 两者有亲缘关系。③存在淡水、半咸水 2 类湖相源岩。 K_2t_2 、 E_1f_2 、 E_1f_4 淡水源岩遵循干酪根晚期生烃模式; 金湖凹陷 E_1f_2 半咸水源岩富含藻类有机质, 能早期生烃, 不符合干酪根晚期成油理论, 建立斜坡区咸化优质源岩能拓展早期生烃的找油思路。至此, 低熟油界限进一步放宽。

1992 年外围新区洪泽凹陷管 1 井发现 E_1f_4 、 E_2d_1 油藏。1993 年主探区高邮凹陷北斜坡码头庄断背庄 2 块钻遇新层系 E_1f_{2+1} 富集油藏, 探明面积 2.5 km^2 、储量达 $491 \times 10^4 \text{ t}$ 。表 2 反映这 2 口井原油成熟度较低。此前, 北斜坡钻预探井 55 口, 仅 1976 年码头庄苏 82 井获 E_1f_3 低产油层, 1977 年沙埕断块群苏 122 井获 E_2d_1 微型油藏, 其他皆落空。庄 2 一举扭转了高邮凹陷多年勘探停滞的局面, 北斜坡成为接替深凹带的增储上产主阵地。

上世纪 90 年代初, 借助一批油气新发现和全国油气二次资源评价平台, 地研院与高校联合开展苏北盆地油/岩地化特征与成烃模式研究, 未低熟油新认识如文献^[7, 13]所述: ①表征参数。未熟 $SM \leq 0.2$, 低熟 $0.2 < SM \leq 0.4$, 成熟 $SM > 0.4$ 。②双峰生烃。 E_1f_2 、 E_1f_4 源岩具有早期生成未低熟油的物质基础, 其中金湖凹陷 E_1f_2 源岩 $R_o = 0.20\% \sim 0.65\%$ 阶段, 生物类脂物早期生成低熟油峰带; 洪泽凹陷 E_1f_4 源岩 $R_o = 0.20\% \sim 0.53\%$ 阶段, 含硫大分子的生物类脂物早期生成低熟油峰带, 即源岩具有低熟油—成熟油双峰生烃模式(图 1a)。③油/岩对比。金湖凹陷原油均属未低熟油范畴, 全部低于三河次凹河参 1 源岩 $SM_1 = 0.40 \sim 0.47$ 成熟度, 西斜坡供烃来自次凹成熟源岩与斜坡低熟源岩的混合油源。李 1、吕 1 等原油与吕 1 源岩亲缘和成熟匹配良好, 就地附近供烃聚集; 闵北地区闵 7、闵 15、塔 1 原油成熟度略高于其周缘及吕 1 源岩, 油源为邻近成熟较低及两侧次凹成熟相对高的混源烃。管 1 原油与管镇次凹中心兴隆 1 源岩 $R_o = 0.60\%$ 的甾萜烷指纹特征相似, 是管 1 油藏烃灶。安 2 井 E_1f_3 原油 $SM_1 = 0.18$, 含丰富的热不稳定物 $5\beta(\text{H})$ -粪甾烷, 几乎检测不到 $C_{29}\alpha\beta\beta$ -甾烷, 是全国成熟度最低的原油之一。④金湖西斜坡、闵北区、三河次凹 E_1f_2 源岩低熟与成熟门槛深度分别是 1 850、1 900、2 600 m。

针对上述诸论, 商榷如下:

(1) 无半咸水源岩与早期生烃模式。文献^[6]指金湖凹陷 E_1f_2 源岩富含藻类和低等浮游生物, 与

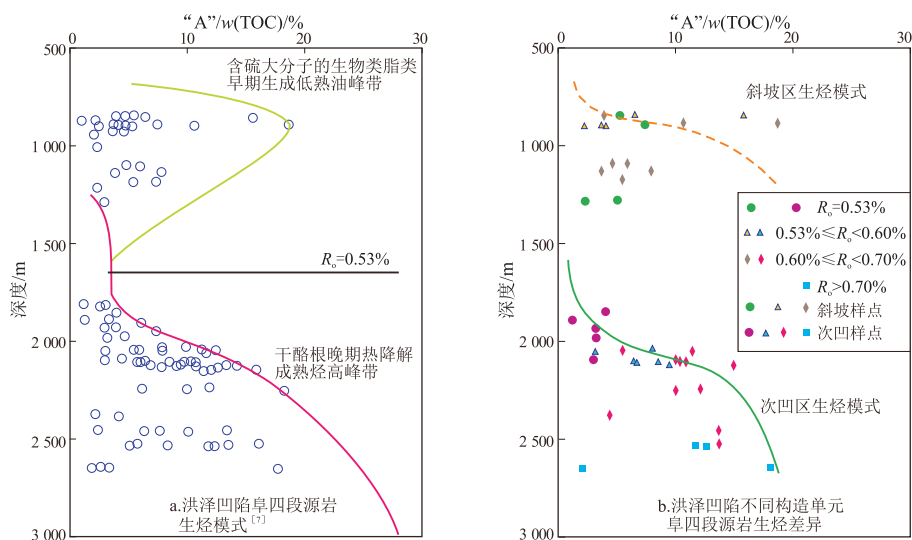


图 1 苏北盆地洪泽凹陷源岩生烃模式对比

Fig.1 Comparison of source rock hydrocarbon generation models in Hongze Sag, North Jiangsu Basin

鲕粒、藻虫管灰岩等伴生,系半咸水源岩; K_2t_2 、 E_1f_4 源岩和其他地区 E_1f_2 源岩无此类岩性组合属淡水型。半咸水论来自海侵论。1979 年,首报金湖凹陷阜宁群海侵沉积^[32],其后海侵论推向全苏北和中国东部盆地^[33]。然而,海侵论遭到部分学者^[34-36]的质疑,论据充分、阐述严谨;如所有指相化石多毛纲虫管、有孔虫等皆为广盐性的生物种群,却共生全盆丰富的淡水型介形类、腹足类和微体浮游藻类等生物种群,如 *pediastrium boryanum*(短棘盘星藻)迄今仅见于淡水湖盆;无海侵必有海相性递变现象。相反,海侵论摒弃全盆纵横共生分布的大量淡水化石,只选用局部产出、点状分布、数量稀少的广盐性化石、多解性矿物来推测水体环境。

此外,本文发现佐证海侵化石有层位错误:文献[32-36]指有孔虫产自 4 个凹陷 7 口井 K_2t_2 、 E_1f_2 、 E_1f_4 层位。经核查,金湖凹陷盱 3、东 65、卞 1 井 E_1f_2 各产 1 枚化石层位可靠;金湖洪 2 井 3 枚化石原层位 E_1f_4 ,现为 E_2d_2 ;涟水凹陷钦 28 井 80 枚化石原层位 E_1f_2 ,现为 E_1f_1 ;高邮凹陷新仪 1 井 4 枚化石深度 525 m,原层位 E_1f_4 ,此深度是 E_2s_2 ,本井完钻于 E_2s_1 底或 E_2d_2 顶,未到 E_1f_4 ;海安凹陷黄 3 井产 10 枚有孔虫,有学者置 K_2t_2 层位^[34],有学者置 E_1f_2 层位^[36],现为浦口组(K_2p)。 E_2s 期盆地呈一批分隔的封闭断陷群,新仪 1 井所处东台断陷 E_2s_2 为河流泛滥沉积,有孔虫产自泛滥盆地相的灰色泥岩; K_2p 是盆地基底岩系,为众所周知的陆相。这是苏北 E_2s_2 、 E_2d_2 、 E_1f_1 、 K_2p 首次发现有孔虫化石,也是国内首次在淡水河泛环境见到有孔虫化石。可见,广盐性有孔虫生活于各种水体,仅凭个别广盐性化

石、忽略大量的主体指相化石,其结论必然错误。

苏北与南黄海 K_2t — E_1f 原型为统一大湖盆是共识,现认为除洪泽凹陷呈独立断陷、又有淮阴隆起 K_2p 含膏盐地层供给物源、造成 E_1f 半咸水湖—盐湖外,其他地区是统一的大型坳陷^[30,37], E_1f_2 、 E_1f_4 期分处湿润、潮湿气候,源岩的岩相、测井相、有机相、古盐度全盆横向变化小^[38],金湖西南隅还有大型河流注入^[39],金湖凹陷不具备形成半咸水体环境, K_2t_2 为半湿润气候,不可能在 K_2t_2 、 E_1f_2 、 E_1f_4 湖进深水期发生咸化,只可能在深湖区发生垂向水体分层,下部滞留水体呈强还原环境,盐度有可能会稍高于上部流动水层,利于有机质保存。这 3 套源岩碳酸盐岩同位素反映,数据点多落入 $\delta^{13}C$ — $\delta^{18}O$ 坐标第三象限淡水湖泊区,少数点处于微咸水—咸水湖泊区靠淡水区的边界附近;明显不同于海相的地球化学特征^[40]。可见,所谓“海侵、咸化源岩”无依据,高效早期生烃无前提,该模式已弃用。同时,文献[6]将安丰、梁垛 K_2t 油藏归典型的未熟油范畴,安丰 1 原油与低部位安 10 源岩生标参数近似(表 2),推定后者低熟源岩是烃灶,显然与其 K_2t_2 淡水源岩只遵循干酪根晚期生烃自相矛盾,何况安 10 井源岩气测无显示。

(2)表征参数界限差异大,分类不可信。前述识别低熟油、成熟油的分界有 4 种,分别为 $SM = 0.2$ ^[5], 0.25 ^[2], 0.3 ^[6], 0.4 ^[7]。各家方案差异之大,远超测试误差的本底值,也未提供分界详细依据,显然这些分类难以采信。

(3)无双峰生烃模式。有学者提出中国低熟油有 5 种成因机制^[7,13],其中金湖凹陷 E_1f_2 源岩、

洪泽凹陷 E_{f4} 源岩皆属生物类脂物早期生烃模式, 并采用“ $A/w(\text{TOC})-H$ ”关系图展示低熟、成熟双峰生烃模式, 金湖凹陷此模式作为典例被选入高校教材。现查明金湖凹陷双峰生烃不存在^[30], 这是同一凹陷不同区带、不同生油门槛源岩成烃叠加造成的假象。如将文献[7]金湖凹陷西斜坡、闵北区、三河次凹3个不同生油门槛源岩的生烃图重叠, 必然冒出双峰或三峰假象。将图1a无 R_o 值样品剔除, 有 R_o 值样分3级成熟度和2类构造单元作出图1b, 结果清楚表明“双峰生油带”是斜坡、次凹源岩不同门槛成烃叠加的假象。可见, 所谓的早期生烃不存在。此外, 文献[7]将管1井 E_{f4} 原油划归典型的未熟油, 照其理论油源应该来自 E_{f4} 源岩 $R_o < 0.53\%$ 早期生烃带; 但如表2所示, 其生标成熟度明显高于同处斜坡埋深相近的管2井 E_{f4} 源岩, 只好推测油源来自管镇次凹兴隆1井 E_{f4} 源岩, 而后者6块岩心 $R_o = 0.60\% \sim 0.65\%$, 无论按图1a或图1b投点都将落入成熟生烃带。由此也证明没有早期生烃带。

1.3 未低熟油肯定与否定交锋期

从1987年发现卞1油藏, 到证实 E_{f2} 是盆地主烃灶和 E_{f1} 主力含油层系, 1997年探获最富集的陈3油藏, 油气增储上产最快, 文献[6-9]认定这是低熟油指导的重大贡献。“九五”期间, 引入未熟油理论^[41], 再次系统开展苏北盆地源岩成烃机制及资源量评价, 主要新成果发表在文献[8-9]中, 要点如下:

(1) 广泛存在可溶有机质早期生烃。认为受海侵影响 K_2t_2 、 E_{f2} 、 E_{f4} 成化优质源岩广泛富可溶有机质是形成未低熟油的良好物质, $R_o = 0.20\% \sim 0.75\%$ 阶段, 非烃在低温条件下可转化为未低熟油。未熟阶段 $R_o = 0.20\% \sim 0.60\%/0.65\%$, $SM < 0.25$, 以生物体和非干酪根生烃; 成熟阶段 $R_o \geq 0.60\%/0.65\%$, $SM \geq 0.25$, 再细分: ①低熟生烃 $0.60\%/0.65\% \leq R_o < 0.75\%$, 由非干酪根、年轻干酪根解聚、干酪根热降解生烃; ②成熟生烃 $0.75\% \leq R_o < 1.30\%$, 干酪根热降解生烃; ③高熟生烃 $R_o \geq 1.30\%$, 干酪根热降解裂解生烃。表征参数: 未熟油 $SM < 0.25$, $HM < 0.55$; 低熟油 $0.25 \leq SM \leq 0.40$, $0.55 \leq HM \leq 0.60$; 成熟油 $SM > 0.40$ 。

(2) 普遍的混源供烃运聚成藏。有学者^[8]选未熟油最低的唐6井原油($SM_1 = 0.18$, $HM_2 = 0.49$), 成熟最高达平衡终点的沙7井原油($SM_1 = 0.5$, $HM_2 = 0.6$), 开展混源实验, 结果混合样的饱和烃、非烃、OEP、CPI、SM、HM等参数, 随混合比例不

同呈规律性递增或递减变化, 成熟油占比100%降至60%、未熟油占比0%升至40%, SM 值由0.50降到0.21; 未熟油约占30%时, SM 值就跌入0.25“整体未熟油特征”的门槛界限, 制作饱和烃— SM 图版量化未熟、成熟油占比。认为未低熟油中, 大部分油源来自成熟油; 未熟油分布不连续是后期大量的干酪根热降解烃, 稀释掩盖前期可溶有机质的未低熟油特性; 未低熟油、成熟油混源成藏是普遍现象。

(3) 可观的未低熟油资源量。资源评价计算3套源岩未低熟生油量占总生油量的67%, 资源量 2.29×10^8 t, 占总资源量的39%; 已探明储量中, 未低熟油占总发现储量的15.8%。

(4) 未熟油/岩典例对比。认为表2吕1、李1、唐6、安2、盐城1、管1和吴岔1等典型未熟油, 为就地及附近未熟源岩供烃成藏; 庄2、安丰1、阳1等未低熟油, 由就近未低熟与次凹成熟源岩混合供油。1987年安丰1构造顶部首次取样 $SM_1 = 0.06$, 油藏低部位安3井 $SM_1 = 0.27$; 1992年安丰1井口取样 $SM_1 = 0.28$; 1997年高部位再取样 $SM_1 = 0.21$ 。据吴岔1井荧光砂岩 $SM_1 = 0.09$ /源岩 $SM_1 = 0.08$, 两者生标对比良好, 推定安丰 $SM_1 = 0.06$ 不是误差造成。再对比位于油藏与次凹间斜坡处的安10井源岩 $SM_1 = 0.13$ 介于油藏顶部和底部值, 认定安丰1早期开采的原油是构造顶部的未熟油, 随着开采, 油藏下部的低熟油进入顶部而采出, 致成熟度先低后高, 即就近广大斜坡未低熟源岩与次凹成熟源岩混合供油成藏。

期间, 有学者^[26]质疑“未熟生烃与未熟油”, 认为苏北断陷盆地存在“不等深等温、等熟”现象, 成熟度 R_o 与今埋深 H 具“平行变浅”变化特点, 是因古近纪末区域性地层差异剥蚀, 源岩今/古埋深不一致, 古埋大于今埋; 若用 $H_{\text{古}}-A/w(\text{TOC})$ 作产烃率图, 浅部必出现假“未熟生烃峰”, 只需恢复剥蚀量, 用 $H_{\text{古}}$ 重新勾画产烃率曲线, 浅部“低温早期生烃”就会消除, 即不存在未熟油。认为源岩依然遵循干酪根晚期热降解生烃, $R_o = 0.60\%$ 进入大量排烃门槛。

此外, 有学者^[16]通过金湖凹陷混合原油生标物绝对定量分析, 指出该区未熟油除甾烷成熟度偏低外, CPI、萜烷、芳烃等成熟度参数都与正常油差异甚微, 这反映了混合成藏的特点; 正常油混入少于20%未低熟油, 可使混合油 $SM < 0.3$, 计算出西斜坡、闵北的原油混入未熟油比例一般少于10%。选唐6井、沙7井原油开展混合实验^[27], 混合样正

烷烃、萘烷等参数与混合比大致呈线性变化,甾烷与混合比呈非线性变化,这是由化合物质量分数差异造成的,遵循“浓度—特征贡献比”分配原理,混合样生标参数非线性变化总是倾向化合物质量分数大的,甾烷即如此;计算证实甾烷认定的“未熟油”,实际是以成熟油为主的混合油。运用数种未低熟油的成因模式研究新华夏构造带的渤海湾、苏北盆地等后,认为诸盆地真正的未熟源岩对已经发现的未低熟油贡献甚微^[28]。

针对上述观点,讨论如下:

(1)可溶有机质早期生烃无实质资料佐证。前节已阐述源岩不存在咸化, $R_o < 0.60\%$ 阶段,其“A”/ $w(\text{TOC})$ 与深度 H 、反射率 R_o 的产烃曲线,无早期未低熟生烃峰。中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所最新的生烃模拟实验,也无早期的未低熟油峰。可见,文献[9,41]热模拟多峰生烃不符合地质实情。事实上,部分学者^[9,41]的生烃模式难自圆其说,把成熟度偏低就归结为非干酪根生成的未低熟油无依据。

(2)成烃模式概念和表征参数分歧大。一是部分学者^[9]将源岩演化分未成熟、成熟、过成熟3个阶段,成熟再分低熟、成熟(或中熟)、高熟3个阶段。不仅成熟套“成熟”,而且成熟阶段干酪根晚期降解成烃又套所谓的“低熟”非干酪根生烃,概念极其混乱。二是未熟与成熟分界值有 $R_o = 0.50\%$, 0.60% , 0.65% 等3种方案,低熟与成熟划分有 $R_o = 0.65\%$, 0.70% , 0.75% , 0.80% , 0.95% 等5种方案。可见,未熟、低熟生烃上限、下限分界参数很混乱,跨度达 $R_o = 0.50\% \sim 0.95\%$,而且该值属于Tissot生烃理论的成熟范畴。

(3)混源实验恰恰证实无混源油。实验指出江苏油田以成熟油为主,混有不等量的未低熟油。这被看作是未低熟油的关键证据和定量评价的科学方法。有学者^[8-9]计算苏北多数油田的未低熟油含量占3%~38%,唐港最高约72%;储量占总发现的15.8%。有学者^[16]得出金湖凹陷正常油中的“未熟油”含量一般在2.6%~23.2%，“未熟油”中的未熟油含量可高达63%。有学者^[27]测算苏北甾烷指标 $SM_1 = 0.25$ 原油,其成熟油含量占60%以上,未熟源岩贡献较少。济阳坳陷八面河油田被认作中国未低熟油的典例^[9],做该区混源实验得出以成熟油为主,混入了一定量的未低熟油,导致 SM 值大幅降低而呈“未低熟油”特征^[42]。

上述数据看似科学,但缺乏地质的良好结合:

①据文献[9]苏北盆地篇的原始报告,3套源岩未

低熟油生排中心与次凹成熟烃灶区基本重叠,即前者资源主要集中于次凹,按前述平均未低熟生油量占67%、资源量占39%,次凹未低熟油资源量应该高于39%均值。按苏北^[8-9,16,27]和八面河^[42]混源实验认识,成熟油混入20%未熟油,混合油就跌入 $SM < 0.25$ “未熟油”特征;混入30%未熟油,混合油就呈 $SM < 0.2$ “未熟油”特征;那么,以次凹含可溶有机质转化的未低熟油肯定超过总资源量的39%比例,理应稀释和掩盖后期成熟油,呈全次凹“未低熟油”特征,而不是部分学者^[9,41]假说的后期成熟油稀释了前期的未低熟油,掩盖了中国盆地普遍存在的“未低熟油”特性。充分说明稀释掩盖论、混源论假说不成立。②把安丰1井前后期所产原油 SM 、 HM 值差异,归结为顶部未熟油、下部低熟油先后产出毫无依据。成藏及保存地质时间漫长,不同成熟度油竟然不融合?那么,稀释和掩盖论何存?如表2所示,安丰1原油与安10源岩的 SM 、 HM 似乎可对比,但两者色谱 OEP 等特征完全不匹配,安10源岩成熟度明显低于安丰油,说明由构造顶部未熟源岩、斜坡低熟源岩、次凹成熟源岩混合供烃,并能在油藏内保持纵向分界是不存在的。③原油成熟度较低的所有油藏,都处于源岩埋藏热演化偏低的地区,且呈不连续分布,这显然与所谓的“普遍混源”矛盾,恰恰是不同构造单元源岩成熟差异,提供了不同成熟度的烃灶所致。

此外,部分学者^[26]的剥蚀量重构产烃率观点也缺乏依据,文献[30]有说明,不予赘述。

2 原油/源岩成熟度特征

本次引用文献[8]苏北篇的初始报告油样65个/60口井、岩样14块/11口井,其他文献油样28个/28口井、岩样13块/12口井数据^[4-6,15-18];补充饱和烃质谱油样315个/170口井、岩样273块/161口井,以及饱和烃色谱、 R_o 等配套资料,开展大数据量的油/岩成熟度对比分析。

2.1 样品分布及数据误差情况

2.1.1 样品分布代表性

油样来自高邮、金湖、海安、溱潼、盐城、白驹、洪泽和临泽凹陷及吴堡、柘垛低凸起10个二级构造单元的258口井, K_2t_1 、 E_1f 、 E_2d 、 E_2s_1 各组8个层段,其中源岩裂缝油藏样品6个、夹层玄武岩油藏样品2个;岩样取自高邮、金湖、海安、盐城、溱潼、临泽、白驹、阜宁、洪泽凹陷及吴堡、柘垛低凸起11个二级构造单元、184口井岩心资料,分处次凹、斜坡、断阶和低凸起不同位置,主要在 K_2t_2 、 E_1f_2 、

E_1f_4 层位,少数 E_1f_1 、 E_1f_3 层位。可见,样品数量多、覆盖面广、代表性强。

2.1.2 数据误差分析

本次使用的饱和烃质谱资料来源时间跨度大、测试单位多,有文献现成参数,更多是历年 8 家不同单位检测的原始报告,实验条件差别大,原始资料误差难免;为此,统计多次重做油样、岩样或密集岩样,考察误差情况(表 4)。可见, SM_1 、 SM_2 最大误差各达 0.22 和 0.17, HM_1 、 HM_2 最大误差各达 0.24 和 0.30,油样误差明显高于岩样。据质谱测量精度实验^[43],同一样品在同台仪器相同条件下,每隔 20 天测试参数,这 4 个参数本底值误差仅 0.02~0.03。显然,本区部分资料远超本底值误差;尤其油样若无重样、总样数少,由此推论的认识难以保证可靠性。

2.1.3 油样野值剔除

鉴于此,利用大量的饱和烃质谱资料计算甾烷 SM_1 、 SM_2 ,萜烷 HM_1 、 HM_2 , Ts/Tm 、 C_{30} 藿烷/ $C_{29}R$ 甾烷、 γ -蜡烷/ C_{30} 藿烷,饱和烃色谱 OEP 、 CPI 、 Pr/Ph 、 Pr/nC_{17} 、 Ph/nC_{18} 等参数,分析发现 SM_1 、 SM_2 、 HM_1 、 HM_2 、 OEP 、 CPI 等 6 项 3 对参数成熟度最敏感,分界矛盾最小,据此作图分析参数误差和野值情况(图 2);为避免重点,作图时同层位 SM 同值多个样品,只保留 1 个样数据。

(1)安丰 1 井 K_2t_1 油藏野值点。1987 年安丰 1 油藏首次取油样,送胜利油田做质谱分析,计算参数 $SM_1=0.06$ (图 2a 左侧虚圈叉点),被国内油气

地化专家和文献[6-9]当作中国未熟油的典型,成为支撑未低熟油理论的重要依据。然而,图 2 反映该值实为野值点:一是本井和该油藏后期 4 次取油样测试,其 SM_1 值均在 0.21~0.28,即样品不可重复接近 0.06 值;二是 1987 年以来,全盆地原油再未出现如此低值 SM_1 参数,即 30 多年数百个原油样测试不可再现该值;三是该值在图 2a,b 上完全背离了原油样正常点群。这进一步佐证了地化专家认定安丰 1 油藏属未低熟油、由斜坡未熟和次凹成熟混源油成因缺乏科学证据,本文阐述的来自异地次凹中熟油是可信的。

(2)吴岔 1 井 K_2t_1 野值点。如图 2a,b 左侧虚圈绿点 $SM_1=0.09$,也被文献[7,9]等作为未熟油的典例。1994 年在柘垛低凸起实施本井, E_1f_1 、 K_2t_1 断鼻面向毗邻的高邮凹陷,钻探全井气测无异常,岩屑干照、湿照均无荧光,紧邻 $K_2t_2^2$ 源岩 $K_2t_1^1$ 顶部取心,为白色砂岩未见油气显示;钻后反馈,地研院取岩心砂岩置试管加氯仿浸泡数小时后,荧光灯下观察浸泡液发荧光,由此认定砂岩为荧光油气显示层段,后砂岩样做质谱、色谱分析,得到如表 2 所示各值,这些参数与 $K_2t_2^2$ 源岩各项成熟度似匹配,且 $R_o=0.58\%$,使得一些人更坚定优质源岩早期未熟生油。事实上,该数据也是背离正常油样点群,属于野值:一是全盆地未见这类“荧光显示”能形成油藏的,哪怕是肉眼可见的油气显示;二是以此未熟油理论指导,后期在柘垛低凸起部署 2 块三维地震,沿吴岔 1 周缘先后预探 4 口井、西部预探

表 4 苏北盆地重样间甾萜烷参数最大误差
Table 4 Maximum error of duplicate samples' sterane-terpene parameters in North Jiangsu Basin

井号	样品	层位	SM_1	SM_2	HM_1	HM_2	样品数/个
石 13	源岩	E_1f_4	0.10	0.04	0.01	0.04	2
河 4	源岩	E_1f_4	0.03	0.02	0.13	0.13	4
红 2	源岩	E_1f_4	0.11	0.02	0.02	0.08	3
联 5	源岩	E_1f_2	0.11	0.17	0.01	0.03	2
河 4	源岩	E_1f_2	0.03	0.01	0.11	0.20	7
河参 1	源岩	E_1f_2	0.10	0.08	0.04	0.04	2
花 27	源岩	K_2t_2	0.08	0.16	0.09	0.11	4
肖 3	原油	E_2d	0.09	0.07	0.01	0.01	2
黄 20	原油	E_1f_4	0.27	0.09	0.21	0.08	3
管 1	原油	E_1f_4	0.07	0.03			2
阳 1	原油	E_1f_3	0.10	0.01	0.02		2
闵 18 块	原油	E_1f_2	0.14	0.07	0.05	0.02	5
卞 1	原油	E_1f_2	0.05	0.06	0.05		2
范 1	原油	E_1f_2	0.03	0.10	0.04	0.03	3
安 2	原油	E_1f_2	0.06	0.07	0.04	0.14	4
安丰 1	原油	K_2t_1	0.22	0.03	0.24	0.30	3
富安 1	原油	K_2t_1	0.08	0.09	0.01	0.04	2

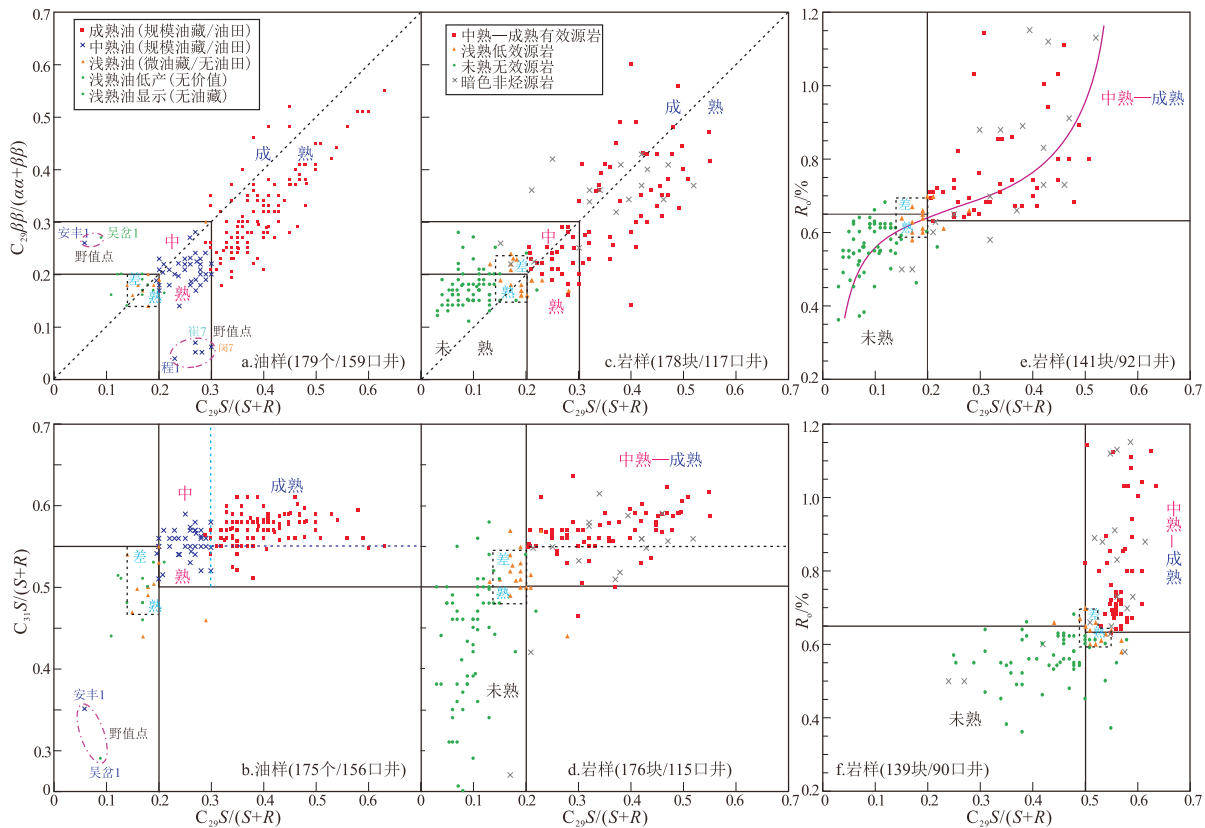


图2 苏北盆地原油/源岩甾烷—萜烷及镜煤反射率参数相关关系

Fig.2 Correlation parameters of sterane-terpene and vitrinite reflectance of crude oil/source rocks in North Jiangsu Basin

2口井全落空,未见油气显示;三是砂岩色谱 $CPI=1.71$, $OEP=1.69$,全盆地凡未生物降解的原油和油气显示砂样, CPI 、 OEP 均小于1.20,趋近1.0。

(3)崔庄、闵北 E_1f 油藏野值点。图2a下侧虚圈5个叉点,数据引自文献[16],为金湖凹陷 E_1f 油样,其 SM_1 值在0.23~0.29间, SM_2 值程1井0.04,崔7井0.07,闵7井0.06,闵15-1井和闵18-1A井为0.05,作者认为崔7属正常油,其他4口井属未熟油,且卞闵杨、西斜坡构造带正常油也不同程度混入未熟油。本文认为这组 SM_2 数据是典型野值:一是对比图2a油样与c源岩可知,全盆最低成熟度源岩都未出现如此低 SM_2 值,包括12块 R_o 值仅0.36%~0.50%岩样,何况这5口油井所处地区 R_o 值均大于0.55%;二是此低值不可再现,文献[9]程1井 $SM_2=0.21$,闵15-1井 $SM_2=0.19$,与所处地区原油成熟度一致。

2.2 原油成熟度特征

剔除油样野值后,利用大数据统计,作图2a、b。只要 SM_1 和 $SM_2 \geq 0.20$, HM_1 和 $HM_2 > 0.50$, CPI 和 OEP 在0.85~1.18,这3对6个参数同步达标,则原油必可聚集形成规模油藏和油田。结合油样来源地情况,将原油成熟度分为3级(表1),特

点如下:一是成熟油, $SM_1 \geq 0.30$, $SM_2 > 0.20$, $HM > 0.55$, CPI 和 OEP 在0.93~1.15, SM_1 值与文献[9]成熟油分界一致;此类原油是3对参数同步达标,油藏最多、规模最大。二是中熟油, $0.2 \leq SM_1 < 0.30$, $0.18 \leq SM_2 < 0.30$, $HM \geq 0.50$, CPI 和 OEP 在0.85~1.20;此类原油一般也是3对参数同步达标,油藏较多、规模较大。三是浅熟油, $0.14 \leq SM < 0.20$, $0.45 \leq HM \leq 0.55$, CPI 和 OEP 在0.70~1.30;此类原油6个参数不同步达到规模油藏指标,成熟度越低、不达标参数越多;可形成无规模的微型油藏,无论是油层厚度或油气显示层厚度都很小,极不富集。

2.3 油/岩成熟度对比特征

目前,苏北盆地 $K_2t_2^2$ 、 E_1f_2 、 E_1f_4 源岩样品测得 R_o 最小值0.36%、最大值1.16%,最小值样沛1、韩1井处于金湖凹陷斜坡带外缘,埋深浅;据此推定苏北盆地绝大部分地区3套源岩 $R_o > 0.35\%$;按照“未低熟油”理论,都进入生烃排油了,应当处处见油气显示,成藏不缺油源。油/岩成熟度对比发现,情况并非如此。

(1)油/岩 CPI 、 OEP 匹配关系(图3)。剔除生物降解原油外,统计209个油样,除1个未成藏浅

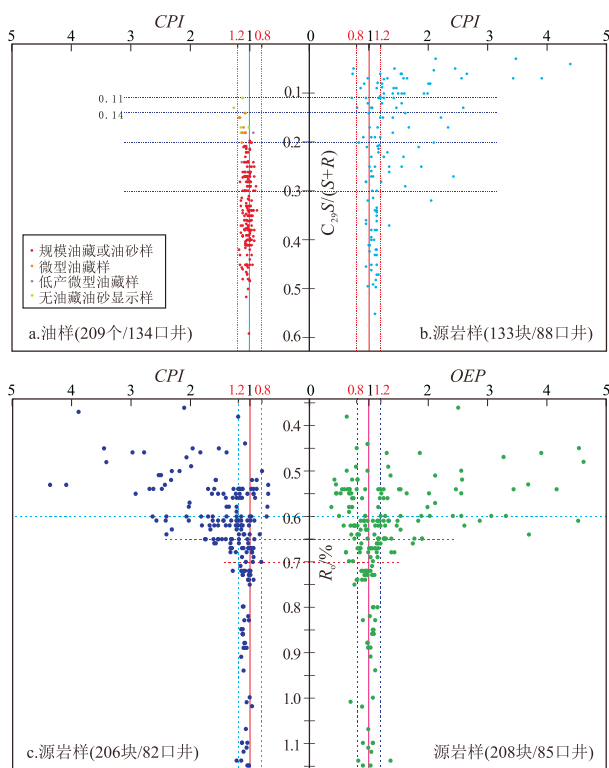


图3 苏北盆地原油与源岩
CPI/OPE— $C_{29}S/(S+R)$ — R_o 匹配关系对比

Fig.3 Matching relationship of $CPI/OPE-C_{29}S/(S+R)-R_o$ between crude oil and source rocks in North Jiangsu Basin

熟油砂样 $CPI=1.28$ 外,其余在 $0.88 \sim 1.18$ 范围, $0.67 \leq OEP \leq 1.23$, $OEP < 0.80$ 的为 6 个浅熟油;其他如图 3a 所示, CPI 、 OEP 皆趋近 1.0 分布。图 3a, b 油/岩比较可知,成熟度 $SM_1 \geq 0.30$ 样段,两者匹配很好;源岩 $0.20 \leq SM_1 < 0.30$ 样段,油/岩有较多可匹配,部分源岩表现出成熟度不足特点,与油不相匹配;源岩 $0.14 \leq SM_1 < 0.20$ 样段,两者很少能匹配,多数源岩成熟不足,与油不相匹配;源岩 $SM_1 \leq 0.14$ 样段,则无油层样,仅 1 个油砂显示点。

另外,图 3c 反映源岩 $R_o \geq 0.70\%$ 样段,其 CPI 、 OEP 表现出与图 3a 油样很匹配的关系; $R_o = 0.65\% \sim 0.70\%$ 样段,多数样点趋向与油样匹配; $R_o = 0.60\% \sim 0.65\%$ 样段,匹配样点明显减少; $R_o < 0.60\%$ 样段,则与 $SM_1 \leq 0.14$ 样段一样, CPI 、 OEP 高度分散,也无油可与之相匹配。由此证明,源岩热演化生油有门槛值和阶段性:早期未成熟阶段,无油可找;中期浅成熟向中成熟过渡阶段,油/岩成熟关系从少量匹配到较多匹配;后期成熟阶段,油/岩两者成熟特征一致。证明不存在非干酪根早期生油,源岩生油必须达到一定的成熟门槛,这种门槛实为短暂的快速变化过渡带。

(2) 油/岩的 SM 、 HM 成熟度匹配关系。从图

2a, c 与 b, d 的油/岩对比同样看出,中成熟、成熟油 SM 、 HM 两对参数与源岩匹配关系良好;浅成熟油/岩成熟度关系匹配较差,且该部分油不少取自油源不足的油砂样(无油层、油藏);未成熟源岩则完全无油可对应,未见到比浅成熟油更低的“非干酪根早期生成油”的任何踪迹。

(3) 源岩 R_o 与 SM 、 HM 成熟度匹配关系。从图 2e, f 可知,源岩 $R_o = 0.60\% \sim 0.70\%$, 成熟参数 SM_1 (或 SM_2)— R_o 、 HM_1 (或 HM_2)— R_o 关系呈过渡变化关系,向两端则呈完全不同变化趋势,这种变化分界犹如图 3c 的 R_o — CPI 或 OEP 变化关系门槛基本一致,说明源岩 R_o 、 SM 、 HM 、 CPI 和 OEP 成熟度各参数变化趋势一致,由此确定的源岩生油门槛一致,也与原油的成熟度相匹配。由此确定 $R_o < 0.60\%$ 地区,为未成熟不生成任何油的无效源岩。

(4) 油藏/烃灶成对匹配关系。全部 258 口井 408 个油样中,本井或本断块的油/岩亲缘成对取样的有 52 口井、53 对样品,另选油/岩亲缘临块 5 对样品,进行油藏/烃灶成对成熟度匹配对比,结果发现:有 24 对样品的 SM 、 HM 、 CPI 和 OEP 等 6 个参数成熟度完全匹配,有 7 对样品 6 个参数 5 个匹配、1 个匹配稍差,包括浅成熟、中成熟和成熟油 3 种,这些源岩 $R_o = 0.61\% \sim 1.10\%$, 为属地油源成藏;有 27 对样品按这 6 个参数判别,两者成熟度不甚匹配,包括浅成熟、中成熟和成熟油,全部是原油成熟度高于本地源岩,为异地供源成藏,这些源岩 $R_o = 0.37\% \sim 0.70\%$, 其中 $R_o < 0.50\%$ 的仅 2 个样品。

由此判定,不存在源岩早期生成“未熟油”和成熟油稀释“未熟油”的现象;否则,成熟源岩区将出现成熟度不连续、不匹配的油/岩关系,未熟源岩区则出现油/岩相匹配的情况。

3 不同成熟度源岩勘探效果对比

实践是检验源岩生烃理论的唯一标准。20 世纪 80 年代中期,发现所谓“未熟油、低熟油”,建立早期生成“未低熟油”模式;期间,江苏油田实现凹陷、区带和层系的油气资源接替,但外甩预探成熟度不同的源岩领域,依然冰火两重天。

3.1 中成熟—成熟源岩勘探效果好

50 年来,实践证明源岩 $R_o > 0.70\%$ 、 $SM \geq 0.20$ 、 $HM > 0.50$ 、 CPI 或 $OEP = 0.85 \sim 1.20$ 的领域,油气勘探效果好,尤其 $SM \geq 0.30$ 、 $HM > 0.55$ 、 CPI 或 OEP 在 $0.85 \sim 1.20$ 烃灶最佳,具体有:一是油源丰沛,储量集中。烃灶是油源供给区,主力探区高邮、金湖、溱潼和海安凹陷皆由其提供油源,形成富集油

藏和规模油田;截至 2015 年底,全盆地探明石油地质储量 3.527×10^8 t,包括未熟—浅熟源岩区发现的 $SM\geq 0.20$ 中熟—成熟油,探明储量占总量的 99.83%。二是烃灶油气运移远。高邮、金湖、溱潼凹陷 E_1f_2 成熟烃灶油气以侧向运移为主,沿倾向式、斜向式断层通道油气供烃半径可达 20 km^[30],油藏环绕烃灶内外呈扇形环带分布;高邮凹陷 E_1f_4 成熟烃灶油气以垂向运移为主,沿通源断层垂向运距达 3 km,油藏沿断层墙呈串珠状富集分布,金湖、溱潼凹陷 E_1f_4 中成熟烃灶,油气垂向运距仅 0.5~1.0 km^[30]。三是油气显示十分活跃。输导层具有油气显示频度高^[31]、强度大、井段长^[25]、组分齐、丰度高的特点。四是烃灶普见气测异常显示。钻开成熟源岩最大特点是气测明显升高异常,全烃升倍高、组分齐,并随 R_o 增大油气显示和全烃升倍快速递增,部分井泥浆槽面、录井岩屑见良好的油气显示,反映源岩微孔隙空间充满生排烃后的残留油气^[30]。渤海湾盆地沙河街组成熟源岩见广泛的油气显示,形成页岩油^[44];犹如国内外页岩油,须源岩 $R_o>0.60\%$ 且足够成熟^[45]。五是圈闭预探风险

小(图 4)。此类烃灶区圈闭钻探若落空,肯定是构造不落实、断层不封闭、储层差因素造成的。

3.2 浅成熟源岩勘探效果极差

图 4 反映,苏北盆地主力探区和外围地区皆有些浅成熟源岩, $0.60\%\leq R_o\leq 0.70\%$, $0.14\leq SM<0.20$, $0.45\leq HM\leq 0.55$, CPI 和 OEP 在 0.70~1.30, 此类烃灶油气勘探仅局部可获微型油藏,总体无效:一是油气资源贫乏。源岩成熟不足导致油气资源匮乏,若无异地丰富的中成熟—成熟油气运抵,本地浅成熟油烃灶至多形成微型油藏或低产油层、油气显示层;迄今仅探明 4 个油藏,合计地质储量 60×10^4 t,占总储量的 0.17%,油藏小、油层薄,靠单井开采。二是烃灶油气运移距离很近。如图 4 所示,与中成熟—成熟油广泛分布于各领域不同,浅成熟油侧向、垂向运距都极短,为就近运聚成藏,油藏、油气显示层皆处于烃灶内。三是油气显示不活跃。输导层油气显示频度中低,显示强度小、井段短,组分齐全不定^[30]。四是源岩气测异常弱或无。钻开浅成熟源岩气测无异常或弱异常,全烃升高倍数低,组分常常不齐,泥浆槽面无油花显示,反映源

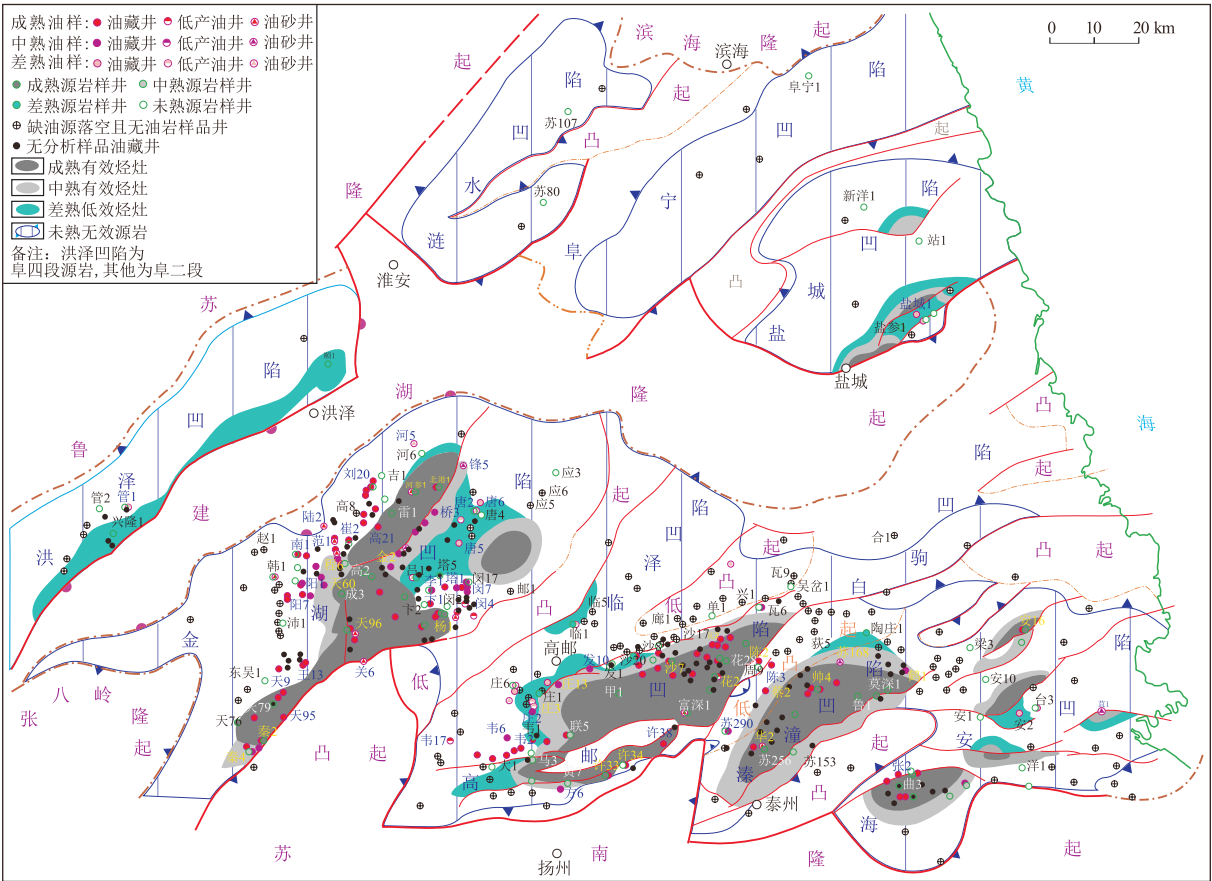


图 4 苏北盆地阜二段不同成熟度源岩与钻探效果展布

Fig.4 Distribution of source rocks with different maturities and drilling results in second member of Funing Formation, North Jiangsu Basin

岩已进入干酪根晚期生烃,但微孔隙空间尚未充满可排出的烃。五是圈闭勘探风险大。如图5所示,靠本地油源难以成藏,油源是勘探头号风险。如高邮凹陷北斜坡码头庄断背斜圈闭群,除庄2、庄13断块靠东部车逻鞍槽中熟油供给富集成藏外,其他13个断块10个落空,3个超微油藏,钻探效果极差。又如,海安曲塘次凹 E_1f_2 源岩 R_o 在0.80%~1.20%左右处良好成熟,烃灶具异常高压,形成大面积 E_1f_3 油藏和 E_2d_1 、 E_2s_1 肥小油藏;相反,盐城凹陷南洋次凹 E_1f_2 源岩品质、厚度与曲塘次凹几乎一样,且面积更大,源岩 $R_o=0.62\%\sim 0.90\%$,处于浅成熟—中成熟阶段,烃灶也有异常高压,因源岩成熟不足,原油具高密度、高黏度、高含蜡特点,只发现1个 E_1f_3 难采的微型稠油藏和1个 E_1f_2 源岩裂缝油藏。

3.3 未成熟源岩勘探全部无效

苏北盆地 $K_2t_2^2$ 、 E_1f_2 、 $E_1f_4^1$ 全部源岩 $R_o>0.35\%$,按照“未低熟油”理论,全进入早期生排烃阶段,该满盆处处不缺油源,普见油气显示;但情况恰恰相反:一是源岩未熟无效。在源岩 $R_o<0.60\%$ 、 $SM_1<0.14$ 、 $SM_2<0.20$ 、 $HM<0.50$,以及 CPI 或 $OEP>1.30$ 的地区,所有油藏或油气显示均为异地来的中成熟—成熟油,本地无任何油源。二是源岩也无油气显示。迄今为止,凡钻开未成熟源岩,全部未见气测异常,印证不存在“早期生油峰、未低熟生油带”。三是油源为制约甩开勘探最大风险。甩开源岩 $R_o<0.60\%$ 的主探区广阔斜坡、外围凹陷、(低)凸起等领域,除主探区外缘发现成熟油外,其他地区纷纷落空,如图5大量空井密布于未成熟源岩区,皆因缺油源失败。

2016年,勘探再甩临泽凹陷,部署临5井预探 E_1f_1 圈闭,油源为 E_1f_2 源岩。该次凹曾预探7口井皆落空,其中临1井 E_1f_3 底获一薄层低产油层,另2口见油气显示、4口无显示。如表1所示,临1油/岩匹配关系良好,属浅成熟油;该区油气显示频率低、强度小,源岩气测无明显异常,表明成熟不足,加之远离毗邻的高邮凹陷中成熟—成熟油源,临5井源岩深度与临1井接近;钻前本文预测临5井将因本地源岩成熟不足、油源匮乏落空,钻后验证了此推断,证明不存在所谓的“未低熟油、早期生油和双峰生烃模式”。

4 结论

(1)苏北盆地所谓的“未低熟油、双峰生烃、早期生油”等观点,经大量地化参数和勘探验证均不

存在,即源岩非干酪根早期生油是假的。

(2)大数据资料反映,实验数据存在误差野值,根据油/岩成熟度3组6个敏感参数,原油分浅成熟油、中成熟油、成熟油3类,源岩相应分未成熟、浅成熟、中成熟和成熟4类。中成熟—成熟油/岩成熟度参数匹配很好,对应源岩 $R_o>0.70\%$;浅成熟油/岩成熟度参数有一定的匹配关系,对应源岩 $R_o=0.60\%\sim 0.70\%$;未成熟源岩 $R_o<0.60\%$,无油可匹配,证明无非干酪根的未—低熟油。

(3)勘探证实,苏北盆地源岩遵循干酪根晚期生烃模式,商业油气均来自中成熟—成熟源岩;浅成熟源岩仅生成极少的无商业价值油藏或油气显示;未成熟源岩全部无效,异地成熟油供给状况是该区勘探的最大风险。

参考文献:

- [1] 史继扬,麦坎任 A S,埃格林顿 G, et al.胜利油田原油和生油岩中的生物标志化合物及其应用[J].地球化学,1982(1):4-20.
SHI Jiyang, MACKENZIE A S, EGLINTON G, et al. Biological markers for petroleum and shales in Shengli Oilfield and their geochemical implications[J]. Geochimica, 1982(1):4-20.
- [2] 史继扬,汪本善,范善发,等.苏北盆地生油岩中甾、萜的地球化学特征和我国东部低成熟的生油岩与原油[J].地球化学,1985(1):80-89.
SHI Jiyang, WANG Benshan, FAN Shanfa, et al. Geochemical features of steroids and terpenoids in source rocks from the Subei Basin and immature crude oils and source rocks in the eastern part of China[J]. Geochimica, 1985(1):80-89.
- [3] 汪本善,范善发,史继扬,等.苏北高邮凹陷下第三系生油岩的有机地化特征和生油门槛研究[J].石油与天然气地质,1985,6(1):60-70.
WANG Benshan, FAN Shanfa, SHI Jiyang, et al. Studies on organic geochemical characteristics of Eogene source rock in Gaoyou Depression and its oil generation threshold[J]. Oil & Gas Geology, 1985,6(1):60-70.
- [4] 范善发,汪本善,史继扬.苏北盆地第三系生油岩和原油中的生物标记物及其油源对比[J].石油学报,1986,7(2):1-11.
FAN Shanfa, WANG Benshan, SHI Jiyang. Biomarkers and source-rock correlation for Tertiary source-rock and oil from Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986,7(2):1-11.
- [5] 范善发,汪本善,史继扬,等.苏北盆地东台拗陷下第三系油源对比[J].地球化学,1986,(2):147-159.
FAN Shanfa, WANG Benshan, SHI Jiyang, et al. Oil-source correlations of the Lower Tertiary in the Dongtai Depression of the Subei Basin[J]. Geochimica, 1986,(2):147-159.
- [6] 黄宛平.苏北盆地两类生油岩的特征[J].江苏油气,1990,1(3):2-10.
HUANG Wanping. The characteristics of two types of source rocks in the Subei Basin[J]. Jiangsu Oil & Gas, 1990,1(3):2-10.
- [7] 王铁冠,钟宁宁,侯读杰,等.低熟油气形成机理与分布[M].

- 北京:石油工业出版社,1995.
- WANG Tiegua, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Genetic mechanism and occurrence of immature hydrocarbon [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.
- [8] 王文军, 宋宁, 姜乃煌, 等. 未熟油与成熟油的混源实验、混源理论图版及其应用 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(4): 34-37.
- WANG Wenjun, SONG Ning, JIANG Naihuang, et al. The mixture laboratory experiment of immature oils and mature oils, making and using the mixture source theory plat and its application [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(4): 34-37.
- [9] 黄第藩, 张大江, 王培荣, 等. 中国未成熟石油成因机制和成藏条件 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- HUANG Difan, ZHANG Dajiang, WANG Peirong, et al. Genetic mechanism and accumulation condition of immature oil in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [10] 侯读杰, 王铁冠, 李贤庆, 等. 洪泽凹陷低熟原油的饱和烃化合物组合 [J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 38-44.
- HOU Dujie, WANG Tiegua, LI Xianqing, et al. Biomarker assemblage of immature oils in Hongze Sag, Subei Basin, East of China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 14(4): 38-44.
- [11] 侯读杰, 王铁冠. 中国陆相沉积中的低熟油气资源 [J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 38-45.
- HOU Dujie, WANG Tiegua. Immature-low mature oil in continental deposit in China: a review [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(6): 38-45.
- [12] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 陆相湖盆生物类脂物早期生烃机制研究 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 1996, 26(6): 518-524.
- WANG Tiegua, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Early hydrocarbon generation of biological lipids in non-marine lacustrine basins: a genetic mechanism of immature oil [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1997, 40(1): 54-64.
- [13] 王铁冠, 钟宁宁, 侯读杰, 等. 中国低熟油的几种成因机制 [J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 75-83.
- WANG Tiegua, ZHONG Ningning, HOU Dujie, et al. Several genetic mechanisms of immature crude oils in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 75-83.
- [14] 胡国艺, 冉启贵, 王铁冠, 等. 金湖凹陷阜宁组低熟烃源岩饱和烃组成及其生源探讨 [J]. 沉积学报, 1997, 15(S1): 138-141.
- HU Guoyi, RAN Qigui, WANG Tiegua, et al. Preliminary study on saturate components characteristics and its origin of Fuling Formation immature source rock in Jinhu Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(S1): 138-141.
- [15] 李素梅, 曾凡刚, 庞雄奇, 等. 金湖凹陷西斜坡油气运移分子地球化学研究 [J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 459-464.
- LI Sumei, ZENG Fangang, PANG Xiongqi, et al. Oil migration study of the Western Slope, Jinhu Depression of Subei Basin, Eastern China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 459-464.
- [16] 李素梅, 庞雄奇, 金之钧, 等. 苏北金湖凹陷混合原油的地质地球化学特征 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2002, 26(1): 11-15.
- LI Sumei, PANG Xiongqi, JIN Zhijun, et al. Geochemical characteristics of the mixed oil in Jinhu Sag of Subei Basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2002, 26(1): 11-15.
- [17] 李素梅, 庞雄奇, 金之钧, 等. 未熟—低熟油研究现状与存在的问题 [J]. 地质论评, 2003, 49(3): 298-304.
- LI Sumei, PANG Xiongqi, JIN Zhijun, et al. Present studies and problems of immature oils [J]. Geological Review, 2003, 49(3): 298-304.
- [18] 胡瑛, 张枝焕, 方朝合. 溱潼凹陷低熟油生物标志物特征及成熟度浅析 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 512-517.
- HU Ying, ZHANG Zhihuan, FANG Chaohe. Biomarker features of low-mature oil in Qintong Sag and maturity analysis [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(4): 512-517.
- [19] 胡瑛, 张枝焕, 骆卫峰. 溱潼凹陷低熟油的生烃母质特征及油源分析 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28(1): 25-28.
- HU Ying, ZHANG Zhihuan, LUO Weifeng. Immature crude oil in Qintong Sag: kerogen characteristics and oil sources analysis [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(1): 25-28.
- [20] 袁际华, 柳广弟. 苏北盆地泰州组原油有机地球化学特征及成因 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(6): 34-38.
- YUAN Jihua, LIU Guangdi. Geochemistry and genesis of crude oil of Taizhou Formation in Northern Jiangsu Basin [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(6): 34-38.
- [21] 杨斌, 梁兴, 马孝祥, 等. 苏北管镇次凹低成熟原油的地球化学特征 [J]. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 553-556.
- YANG Bin, LIANG Xing, MA Xiaoxiang, et al. Geochemical feature of low-mature crude oil in Sub-Sag of Guanzhen in Subei Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(5): 553-556.
- [22] 龚永杰, 何胜, 鲁雪松. 金湖凹陷烃源岩“浅熟”原因探讨 [J]. 特种油气藏, 2008, 15(1): 36-39.
- GONG Yongjie, HE Sheng, LU Xuesong. Study on “shallow maturation” of source rock in Jinhu Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(1): 36-39.
- [23] 陈荣. 溱潼凹陷低熟油生物标记物特征及成因机理探讨 [J]. 内蒙古石油化工, 2010, (13): 140-144.
- CHEN Rong. Biomarkers characteristics and original Mechanisms of immature oils in Qintong Sag [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, (13): 140-144.
- [24] 毛光周, 刘池洋, 高丽华. 中国未熟—低熟油的基本特征及成因 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2012, 31(6): 76-85.
- MAO Guangzhou, LIU Chiyang, GAO Lihua. Essential characteristics and origin of the immature oil in China [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2012, 31(6): 76-85.
- [25] 徐健. 高邮凹陷北斜坡韦码地区阜宁组油气富集差异分析 [J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 164-171.
- XU Jian. Petroleum accumulation diversity of Funing Formation in Weima area, Northern Slope Belt of Gaoyou Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 164-171.
- [26] 陈安定. “未熟油”与“未熟生烃”异议 [J]. 地质论评, 1998, 44(5): 470-477.
- CHEN Anding. Dissent over “immature oil” and “generation of hydrocarbon by immature source rocks” [J]. Geological Review, 1998, 44(5): 470-477.

- [27] 宋宁,林春明,陈丽萍.未熟—成熟油混合后生物标志物参数的变化特征[J].新疆石油地质,2004,25(3):267-269.
SONG Ning, LIN Chunming, CHEN Liping. Variation of biomarker parameters in the mixed immature and mature oils [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2004, 25(3): 267-269.
- [28] 黎茂稳,庞雄奇.中国沉积盆地中若干悬而未决的地球化学问题[J].石油科学,2004,1(3):4-22.
LI Maowen, PANG Xiongqi. Contentious petroleum geochemical issues in China's sedimentary basins [J]. Petroleum Science, 2004, 1(3): 4-22.
- [29] 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.
PANG Xiongqi, LI Sumei, LI Maowen, et al. Origin of “immature oils” in the Bamanhe Oilfield of Eastern China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 586-591.
- [30] 刘玉瑞.苏北后生—同生断陷盆地油气成藏规律研究[J].石油实验地质,2016,38(6):721-731.
LIU Yurui. Petroleum accumulation rules in hystrogenetic reconstructive-syngenetic rift basins, North Jiangsu Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 721-731.
- [31] 刘玉瑞.利用油气显示频度优化勘探选区[J].新疆石油地质,2003,24(5):407-410.
LIU Yurui. Optimization of exploration target areas by using oil-gas showing probability [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2003, 24(5): 407-410.
- [32] 严钦尚,张国栋,项立嵩,等.苏北金湖凹陷阜宁群的海侵和沉积环境[J].地质学报,1979,53(1):74-83.
YAN Qinchang, ZHANG Guodong, XIANG Lisong, et al. Marine inundation and related sedimentary environment of Funing Group (Lower Paleogene), in Jinhu Depression, North Jiangsu Plain [J]. Acta Geological Sinica, 1979, 53(1): 74-83.
- [33] 张国栋,王慧中.中国东部早第三纪海侵和沉积环境:以苏北盆地为例[M].北京:地质出版社,1987.
ZHANG Guodong, WANG Huizhong. The East of China Early Tertiary transgression and sedimentation environment [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [34] 李道琪.苏北盆地古新统泰州组、阜宁组大相环境的讨论[J].地质学报,1984,58(1):80-85.
LI Daoqi. A discussion on the environment of the large facies of the Paleogene Taizhou and Funing formations in the Northern Jiangsu Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 1984, 58(1): 80-85.
- [35] 童晓光.中国东部早第三纪海侵质疑[J].地质论评,1985,31(3):261-267.
TONG Xiaoguang. Doubts about the validity of Paleogene transgression in Eastern China [J]. Geological Review, 1985, 31(3): 261-267.
- [36] 王仪诚,陈永祥.苏北盆地早第三纪海侵析疑[J].石油学报,1992,13(2):137-142.
WANG Yicheng, CHEN Yongxiang. A discussion of the Palaeogene transgression in North Jiangsu Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(2): 137-142.
- [37] 刘玉瑞.论苏北后生—同生断陷盆地性质[J].复杂油气藏,2017,10(1):1-8.
LIU Yurui. Study on characteristics of hystrogenic reconstructive and syngenetic rift basins in Subei Basin [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(1): 1-8.
- [38] 刘玉瑞.苏北盆地与南黄海盆地中—新生界成烃对比浅析[J].石油实验地质,2010,32(6):541-546.
LIU Yurui. Comparison analysis of Meso-Cenozoic hydrocarbon generation between the North Jiangsu Basin and the South Yellow Sea Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6): 541-546.
- [39] 马英俊.苏北盆地金湖凹陷阜二段砂岩物性影响因素分析[J].石油实验地质,2017,39(4):477-483.
MA Yingjun. Influencing factors of sandstone properties of the second member of Funing Formation in the Jinhu Sag, Subei Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 477-483.
- [40] 张运周,徐胜林,陈洪德,等.川东北旺苍地区栖霞组地球化学特征及其古环境意义[J].石油实验地质,2018,40(2):210-217.
ZHANG Yuzhou, XU Shenglin, CHEN Hongde, et al. Geochemical characteristics and paleo-environmental implications of Middle Permian Qixia Formation in Wangcang, northern Sichuan [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 210-217.
- [41] 黄第藩.成烃理论的发展:(I)未熟油及有机质成烃演化模式[J].地球科学进展,1996,11(4):327-335.
HUANG Dipan. Advances in hydrocarbon generation theory: (I) immature oils and generating hydrocarbon and evolutionary model [J]. Advances in Earth Sciences, 1996, 11(4): 327-335.
- [42] 李素梅,庞雄奇,金之钧,等.济阳凹陷牛庄洼陷南斜坡原油成熟度浅析[J].地质地球化学,2001,29(4):50-56.
LI Sumei, PANG Xiongqi, JIN Zhijun, et al. A study of oil maturity at the Southern Slope of Niuzhuang Subdepression, Dongying Depression, Bohaiwan Basin, Eastern China [J]. Geology - Geochemistry, 2001, 29(4): 50-56.
- [43] 曾宪章,梁狄刚.中国陆相原油和生油岩中的生物标志物[M].甘肃:甘肃科学技术出版社,1989.
ZENG Xianzhang, LIANG Digang. Biomarkers of continental crude oil and source rocks in China [M]. Gansu: Science and Technology Press of Gansu, 1989.
- [44] 刘毅,陆正元,戚明辉,等.渤海湾盆地沾化凹陷沙河街组页岩油微观储集特征[J].石油实验地质,2017,39(2):180-185.
LIU Yi, LU Zhengyuan, QI Minghui, et al. Microscopic characteristics of shale oil reservoirs in Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(2): 180-185.
- [45] 高辉,何梦卿,赵鹏云,等.鄂尔多斯盆地长7页岩油与北美地区典型页岩油地质特征对比[J].石油实验地质,2018,40(2):133-140.
GAO Hui, HE Mengqing, ZHAO Pengyun, et al. Comparison of geological characteristics of Chang 7 shale oil in Ordos Basin and typical shale oil in North America [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(2): 133-140.