

南襄盆地泌阳凹陷烃源岩成熟度厘定及其意义

李志明¹, 张隽¹, 余晓露¹, 鲍芳¹, 谢小敏¹, 仰云峰¹, 罗家群², 朱景修²

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151;

2. 中国石油化工股份有限公司 河南油田分公司 石油勘探开发研究院, 河南 南阳 473132)

摘要:利用 FMM 技术对取自南襄盆地泌阳凹陷 15 口钻井的 19 件核桃园组湖相烃源岩样品进行了成熟度厘定。结果显示, 烃源岩的镜质体反射率(R_o)抑制程度显著, 抑制校正值介于 0.08% ~ 0.39%, 有机质类型越好, 镜质体反射率抑制程度越高。19 件烃源岩样品的成熟度均已处于生油窗内(等效镜质体反射率值介于 0.58% ~ 1.29%), 而非镜质体反射率结果所反映的处于 0.38% ~ 1.05%。根据 4 个钻井不同深度段烃源岩的成熟度确定古地温梯度为 36 ~ 45 °C/km, 成烃门限深度为 1 800 ~ 1 400 m。核桃园组烃源岩成熟度的正确厘定, 为合理评价泌阳凹陷石油资源潜力奠定了基础。

关键词:镜质体反射率; FMM 技术; 成熟度; 烃源岩; 泌阳凹陷; 南襄盆地

中图分类号: TE122.1⁺13

文献标识码: A

Determination of maturity for source rocks in Biyang Sag of Nanxiang Basin and its significance

Li Zhiming¹, Zhang Jun¹, Yu Xiaolu¹, Bao Fang¹, Xie Xiaomin¹, Yang Yunfeng¹, Luo Jiaqun², Zhu Jingxiu²

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC Henan Oilfield Company, Nanyang, Henan 473131, China)

Abstract: 19 source rock samples of lacustrine facies have been collected from the Hetaoyuan Formation in 15 drilling wells in the Biyang Sag of the Nanxiang Basin, and their maturities have been determined by means of fluorescence alteration of multiple macerals (FAMM) technique. The vitrinite reflectance of source rocks from the Hetaoyuan Formation is obviously suppressed, and the suppression corrected value is from 0.08% to 0.39%. The level of vitrinite reflectance suppression is relatively higher when source rock quality is better. The maturity of 19 samples has entered oil window ($EqVR$ from 0.58% to 1.29%) instead of 0.38%–1.05% from vitrinite reflectance. According to the maturity of source rocks at different depth in 4 wells, paleogeothermal gradient is 36–45 °C/km, and the depth of threshold for oil generation is 1 800–1 400 m. The correct determination of maturity for the source rocks from the Hetaoyuan Formation provides the basis to evaluate the potential of hydrocarbon reasonably.

Key words: vitrinite reflectance; fluorescence alteration of multiple macerals (FAMM); maturity; source rock; Biyang Sag; Nanxiang Basin

泌阳凹陷是南襄盆地的一个次级凹陷, 面积 1 000 km², 凹陷内发育的地层自下而上为古近系玉皇顶组、大仓房组、核桃园组、廖庄组, 新近系凤凰镇组及第四系。其中, 古近纪核桃园组沉积时期是凹陷湖盆发育的全盛时期, 深凹区既是沉降中心, 也是沉积中心, 沉积了一套巨厚的生油岩系, 最厚达 3 000 m, 分布面积 635 km²。该凹陷是典型的富油凹陷, 以“小而肥”著称^[1], 核三段湖相泥岩为泌阳凹陷的主要烃源岩, 有机质类型以 I 型和 II₁

型为主, 具有很高的生油潜力^[2]。镜质体反射率是衡量烃源岩成熟度的最有效指标, 尤其是对于腐殖型(III型)有机质烃源岩及含腐殖型有机质烃源岩而言, 镜质体反射率的可靠性较高。然而, 对于有机质类型为 I、II₁ 和 II₂ 型的烃源岩, 其镜质体反射率存在明显的抑制作用, 并且有机质类型越好, 其镜质体反射率受抑制程度越大^[3-5]。泌阳凹陷核桃园组烃源岩镜质体反射率 0.5% 所对应的现今埋藏深度为 2 600 m 左右^[6], 而据钻井测温资料确定的泌阳

凹陷现今地温梯度一般在 $36 \sim 54 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}^{[7]}$ 。显然,泌阳凹陷核桃园组烃源岩镜质体反射率分析结果不能真实地反映其成熟度特征。为此,本文采用能有效解决镜质体反射率抑制问题的方法——FAMM (fluorescence alteration of multiple macerals) 技术^[8-11]来重新厘定泌阳凹陷有效烃源岩的成熟度,为合理评价泌阳凹陷石油资源潜力等奠定基础。

1 样品与分析方法

19 件研究样品取自泌阳凹陷 15 口钻井钻遇的核桃园组烃源岩岩心,其中 17 件样品归属于核三段,2 件样品归属于核二段,取样深度最浅者为 974.31 m,最深为 3 372.00 m,各取样井的分布位置如图 1 所示。为了揭示不同类型烃源岩镜质体反射率(R_o)的抑制程度,对进行 FAMM 分析的样品也进行有机质类型与镜质体反射率分析,其中 11 件烃源岩样品的有机质类型属 II_1 型,3 件属 II_2 型,5 件属 I 型(表 1)。

样品的 FAMM 和镜质体反射率分析均在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心完成。进行 FAMM 分析的样品先碎至略小于 1 mm 的颗粒,然后用环氧树脂胶结,并以镜质体反射率测定的要求进行抛光,抛光后的样品尽快进行 FAMM 分析,否则置于真空密闭干燥器中保存,以避免有机质颗粒发生氧化。利用 Renishaw 激光拉曼光谱仪进行 FAMM 分析的条件为:利用氩离子激光器激发的 488 nm 蓝色激光对显微组分

颗粒(尤其是镜质体)进行 612 ~ 638 nm 波长段间断定态光谱扫描,扫描次数为 140 次、曝光时间 1.0 s/次,激光功率设置在 30%,间隔时间 0.5 s,样品表面激光功率为 $(75 \pm 5) \mu\text{W}$ 。每个测点扫描结束后,提取 625 nm 的检测波长下测定镜质体随激光束辐射时间而变化的荧光强度变化曲线,再根据荧光强度变化曲线,提取初始荧光强度、400 s 时的荧光强度,并计算荧光变化比^[11]。把所测镜质体的 FAMM 分析结果落到图 2,就可以确定烃源岩等效镜质体反射率(E_{qVR})和获知镜质体反射率值的抑制程度,结果见表 1。为了对比分析,对 FAMM 分析的样品也进行了镜质体反射率分析,结果也列于表 1。

2 成熟度厘定结果及其意义

2.1 成熟度厘定结果

由表 1 可见,泌阳凹陷 19 件核桃园组烃源岩样品的实测镜质体反射率(R_o)值处于 0.38% ~ 1.05% 之间,其中仅 6 件样品的 $R_o > 0.50\%$,镜质体反射率 0.50% 所对应的现今埋藏深度为 2 500 m 左右(图 3),与前人的镜质体反射率分析结果^[6]相一致,说明研究样品实测镜质体反射率值是可靠的。而根据 FAMM 技术厘定的 19 件烃源岩样品的成熟度——等效镜质体反射率(E_{qVR})值介于 0.58% ~ 1.29% 之间,表明这些样品的成熟度均已处于生油窗内,现今 2 500 m 深度段烃源岩的真实成熟度——等效镜质体反射率(E_{qVR})约为 0.80%

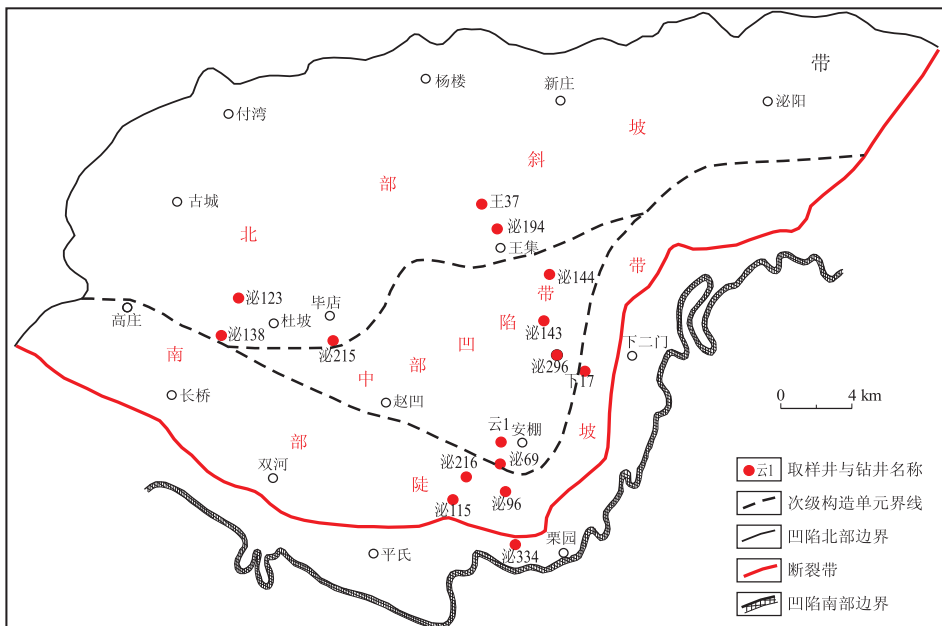


图 1 南襄盆地泌阳凹陷取样井分布位置

Fig. 1 Location of sampling wells in Biyang Sag, Nanyang Basin

表 1 泌阳凹陷烃源岩样品基本特征与镜质体反射率、等效镜质体反射率结果

Table 1 Basic characteristics of studied source rocks in Biyang sag and mature results of R_o and $EqVR$

钻井名称	样品号	样品名称	取样深度/m	层位	有机质类型	R_o /%	$EqVR$ /%	抑制校正正值/%	$R_{o校}$ /%	$(EqVR-R_{o校})$ /%
下 17	下 17-10	灰色泥页岩	3 372.00	Eh_3	II_1	1.05	1.29	0.20	1.25	0.04
泌 334	泌 334-1	黑色泥岩	2 506.51	Eh_3	I	0.49	0.80	0.32	0.81	-0.01
泌 334	泌 334-3	黑色泥岩	3 008.40	Eh_3	II_1	0.76	1.1	0.29	1.05	0.05
泌 96	泌 96-10	灰色泥岩	1 706.43	Eh_3	II_1	0.43	0.62	0.17	0.60	0.02
泌 115	泌 115-4	灰色泥岩	2 665.82	Eh_3	I	0.52	0.82	0.35	0.87	-0.05
泌 216	泌 216-2	灰色泥岩	2 803.40	Eh_3	II_2	0.73	0.87	0.13	0.86	0.01
泌 194	泌 194-2	灰色泥岩	2 087.97	Eh_3	II_1	0.49	0.76	0.26	0.75	0.01
泌 296	泌 296-1	深灰色泥岩	2 414.26	Eh_3	II_1	0.50	0.76	0.21	0.72	0.04
泌 296	泌 296-6	黑色泥岩	3 180.82	Eh_3	I	0.61	0.99	0.39	1.00	-0.01
云 1	云 1-4	黑色泥岩	1 502.33	Eh_2	II_1	0.38	0.69	0.26	0.64	0.05
泌 143	泌 143-6	深灰色泥页岩	2 545.97	Eh_3	II_1	0.52	0.80	0.27	0.79	0.01
泌 143	泌 143-9	灰色泥岩	2891.85	Eh_3	I	0.61	0.92	0.30	0.91	0.01
泌 144	泌 144-1	黑色泥岩	2 492.44	Eh_3	II_1	0.43	0.67	0.22	0.65	0.02
泌 69	泌 69-6	黑色泥岩	2 082.41	Eh_2	II_1	0.50	0.76	0.25	0.75	0.01
王 37	王 37-1	灰色泥岩	1 337.75	Eh_3	II_2	0.49	0.59	0.08	0.57	0.02
泌 123	泌 123-1	灰色泥岩	974.31	Eh_3	II_2	0.46	0.58	0.10	0.56	0.02
泌 138	泌 138-1	灰色泥岩	1 083.60	Eh_3	II_1	0.39	0.62	0.19	0.58	0.04
泌 215	泌 215-1	深灰色泥岩	1 532.60	Eh_3	II_1	0.39	0.66	0.24	0.63	0.03
泌 215	泌 215-6	深灰色泥岩	2 111.80	Eh_3	I	0.44	0.78	0.34	0.78	0

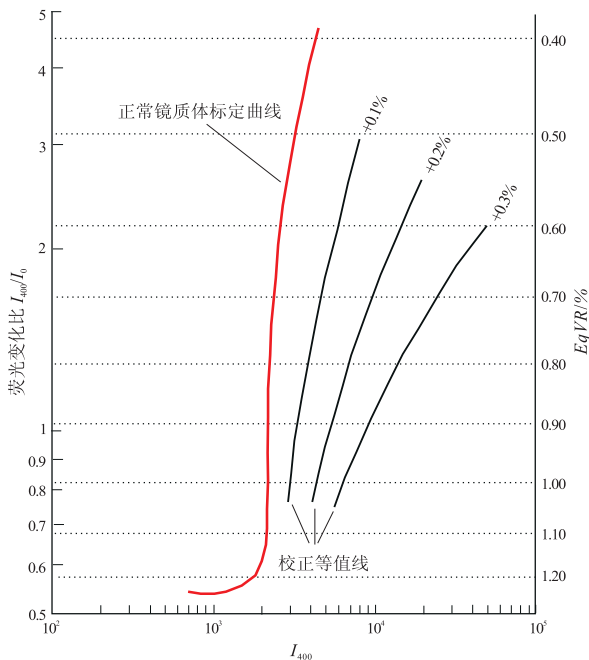


图 2 显示正常镜质体标定曲线和抑制校正等值线的荧光变化图解^[9]

Fig. 2 Fluorescence alteration diagram showing normal vitrinite reflectance calibrated curve and corrected equivalent lines for suppression

映了泌阳凹陷核桃园组烃源岩镜质体反射率抑制程度显著。烃源岩有机质类型越好,镜质体反射率的抑制程度越大,其中 I 型烃源岩的抑制校正值一般大于 0.30%, II_1 型在 0.17% ~ 0.29% 之间, II_2 型小于 0.15%, 这种特征与东营凹陷有效烃源岩的镜质体反射率抑制程度^[3-4] 相似。同时,各样品等效镜质体反射率($EqVR$)值与镜质体反射率校正正值($R_{o校}$)之差的绝对值均小于等于 0.05% (表 1), 说明利用 FAMM 技术厘定的成熟度值和根据 FAMM 分析获得的镜质体反射率校正正值($R_{o校}$)是可信而正确的。

结合图 1 和表 2 可见,泌阳凹陷北部斜坡带南部,现今埋藏深度在 1 000 m 左右的核桃园组烃源岩,其真实成熟度应为 0.60% 左右,现今埋藏深度在 2 000 m 左右的核桃园组烃源岩,其真实成熟度应为 0.76% 左右,而不是实测镜质体反射率(R_o)所反映的那样均小于 0.50%。在泌阳凹陷中部凹陷带南部安棚一带,现今埋藏深度在 1 500 m 和 2 000 m 左右的核桃园组烃源岩,其真实成熟度分别约为 0.70% 和 0.75% 左右;而在中部凹陷带的中部,埋藏深度在 2 500 m 和 3 200 m 左右的核桃园组烃源岩,其真实成熟度在 0.70% ~ 0.80% 及 1.00%。在泌阳凹陷南部陡坡带,现今埋藏深度在 1 700, 2 500, 3 000 m 左右

(图 3);另外, FAMM 分析获得的各样品镜质体反射率抑制校正正值介于 0.08% ~ 0.39%, 平均为 0.24%, 反

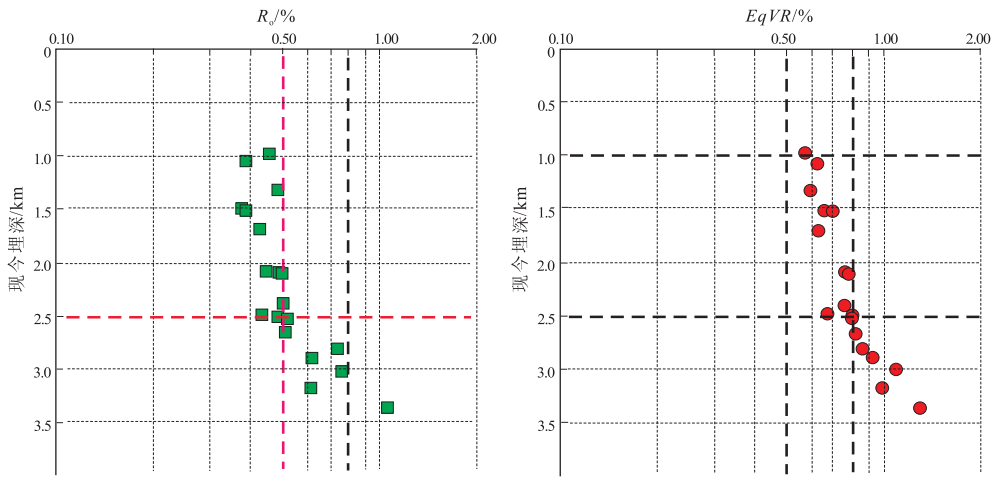


图 3 南襄盆地泌阳凹陷核桃园组烃源岩 R_o 和 $EqVR$ 对比及与现今埋深的对应关系

Fig. 3 Comparative diagram of R_o (a), $EqVR$ (b) vs. present burial depth of source rocks of Hetaoyuan Formation in Biyang Sag, Nanxiang Basin

的核桃园组烃源岩,其真实成熟度分别在 0.60%, 0.80% 左右及 1.00% 以上。泌阳凹陷不同部位相同埋藏深度的烃源岩,其成熟度不尽相同。这应主要与不同部位廖庄组沉积后至上寺组沉积前受区域抬升而遭受的剥蚀量不同有关,同时也应与不同部位的古地温梯度存在差异有一定关系。

2.2 石油地质意义

2.2.1 古地温梯度、成烃门限与古埋深推算

评价古地温及古地温梯度是含油气盆地地质研究的重要内容。肖贤明等^[12]以 Arrhenius 方法为理论基础,应用 Karweil 方法,对不同古地温梯度条件下有机质热成熟度作用进行了模拟计算,并建立起了镜质体反射率梯度、古地温梯度和镜质体反射率之间的相关图版(图 4),详见文献[12]。

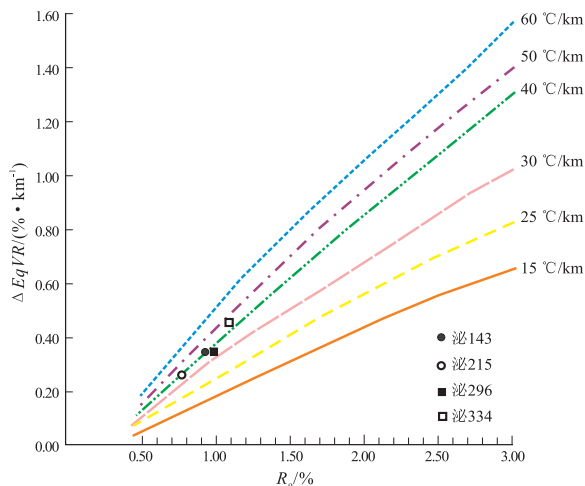


图 4 南襄盆地泌阳凹陷 4 口钻井区核三段古地温梯度图解
底图据文献[12]。

Fig. 4 Paleotemperature gradient diagram of Eh_3 of 4 wells in Biyang Sag, Nanxiang Basin

根据文献[12]所述的方法,利用泌 143、泌 215、泌 296 和泌 334 井 2 个深度段核三段烃源岩样品的等效镜质体反射率值对 4 口钻井区的古地温梯度进行了恢复(表 2,图 4)。泌 334 井、泌 215 井、泌 143 井和泌 296 井核桃园组古地温梯度分别约为 45,39.5,40,36 °C/km(图 4)。可见,泌阳凹陷不同部位的古地温梯度差异较大,4 口钻井区平均古地温梯度为 40 °C/km。泌阳凹陷的古地温梯度与现今地温梯度基本相近,这符合中生代年轻凹陷的地温特征。

同时,据 Suggate^[13]的研究结果,烃源岩埋藏深度、镜质体反射率与古地温梯度之间的关系如图 5 所示。那么,据泌阳凹陷 4 口钻井核桃园组烃源岩古地温梯度为 36 ~ 45 °C/km 推断,泌阳凹陷的成烃门限深度介于 1 800 ~ 1 400 m。

另外,由于烃源岩有机质的成熟度是不可逆的,其代表了烃源岩所遭受的最高古地温,也即代表了烃源岩经历的最大古埋藏深度(在无异常热流体和岩浆活动或构造作用影响下)。因此,根据图 5,结合泌 334、泌 296、泌 143 和泌 215 井核桃园组的古地温梯度和成熟度,对 4 口井取心段所经历的古埋藏深度进行了推断,结果如表 2 所示。

2.2.2 对资源潜力评价的意义

一个凹陷油(气)资源潜力的大小主要与烃源岩的有机质类型、有机质丰度、分布规模以及成熟度密切相关^[14]。当烃源岩有机质类型和丰度明确的情况下,烃源岩成熟度评价正确与否,除直接影响产烃能力和产烃类型外,还影响到进入生烃门限的烃源岩规模,从而影响凹陷油(气)资源潜力的评价结果。前面的研究表明,泌阳凹陷的实测

表2 南襄盆地泌阳凹陷4口钻井古地温梯度与古埋深

Table 2 Paleotemperature gradient and paleo-burial depth of 4 wells in Biyang Sag, Nanxiang Basin

钻井名称	样品号	样品名称	取样深度/m	层位	$E_{qVR}/\%$	$\Delta E_{qVR}/(\% \cdot \text{km}^{-1})$	古地温梯度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)	古埋深/m
泌334	泌343-1	黑色泥岩	2 506.51	Eh_3	0.80			
	泌343-3	黑色泥岩	3 008.40	Eh_3	1.01	0.42	45	3 300
泌296	泌296-1	深灰色泥岩	2 414.26	Eh_3	0.72			
	泌296-6	黑色泥岩	3 180.82	Eh_3	0.99	0.35	36	4 000
泌143	泌143-6	深灰色泥页岩	2 545.97	Eh_3	0.80			
	泌143-9	灰色泥岩	2 891.85	Eh_3	0.92	0.35	40	3 600
泌215	泌215-1	深灰色泥岩	1 532.60	Eh_3	0.63			
	泌215-6	深灰色泥岩	2 111.80	Eh_3	0.78	0.26	39.5	3 300

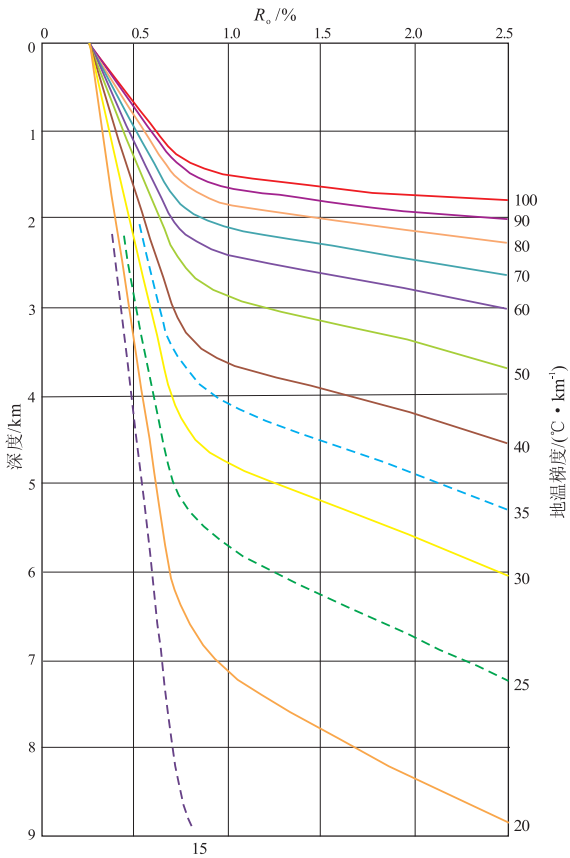
图5 埋深、镜质体反射率及地温梯度之间的关系^[13]

Fig. 5 Relationship among burial depth, vitrinite reflectance and paleotemperature gradient

镜质体反射率值抑制程度显著,19件研究样品的抑制校正值平均为0.24%,烃源岩成烃门限深度不是现今镜质体反射率所反映的2 500 m,而是古埋深1 800~1 400 m左右,这意味着以前主要根据烃源岩镜质体反射率确定的未成熟烃源岩,实际上均已进入生油窗内,如凹陷内核二段烃源岩和核三上部分烃源岩。所以,原来以镜质体反射率为基础确定的泌阳凹陷有效烃源岩的规模将显著偏低,结果必然导致原来的油(气)资源潜力评价结果也偏

低。本研究厘定的核桃园组烃源岩成熟度成果,为合理评价泌阳凹陷石油资源潜力奠定了基础。

3 结论

1)泌阳凹陷核桃园组烃源岩镜质体反射率抑制程度显著,抑制校正值介于0.08%~0.39%,烃源岩有机质类型越好,镜质体反射率抑制程度越高。

2)泌阳凹陷19件烃源岩样品的成熟度均已处于生油窗内(等效镜质体反射率值介于0.58%~1.29%),而非镜质体反射率结果所反映的处于0.38%~1.05%。

3)泌334井、泌215井、泌143井和泌296井核桃园组古地温梯度分别约为45,39.5,40,36 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$,成烃门限深度为1 800~1 400 m,而非镜质体反射率结果揭示的2 500 m。

4)本研究厘定的核桃园组烃源岩成熟度成果,为合理评价泌阳凹陷石油资源潜力奠定了基础。

参考文献:

- [1] 蔡佳,罗家群,甘华军,等.南襄盆地泌阳凹陷隐蔽油气藏模式与富集规律[J].石油实验地质,2009,31(3):244-252.
- [2] 曾小阳,赵得力,孔凡军.泌阳凹陷构造控油规律分析[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(3):422-424.
- [3] 李志明,秦建中,徐旭辉,等.镜质体反射率抑制与烃源岩质量关系:以渤海湾盆地东营凹陷烃源岩为例[J].石油实验地质,2008,30(3):276-280.
- [4] 张美珍,李志明,秦建中,等.东营凹陷有效烃源岩成熟度评价[J].西安石油大学学报:自然科学版,2008,23(3):12-16.
- [5] 陈中红,曲江秀,高卫红.牛38井湖相烃源岩镜质体反射率异常与有机组分含量相关性[J].西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(1):29-33.
- [6] 涂阳发,王正文,张本书,等.泌阳凹陷下第三系成烃研究[R].南阳:河南油田分公司石油勘探开发研究院,2002:15-37.
- [7] 罗家群,朱颜,朱景修,等.泌阳凹陷成烃成藏定量研究地质模型及勘探方向[R].南阳:中国石化河南油田分公司,2008.

(下转第86页)

结论:

1) 异常压力影响地层水演化。超压和低压都会使地层水总矿化度升高, 压力越显著, 矿化度越高。但是超压和低压对矿化度控制的机理不同。

2) 不同压力条件下地层水水型不同。超压体系和常压体系一样, 主要为 NaHCO₃ 和 NaCl 型水, 低压体系主要发育 CaCl₂ 型水。

3) 异常压力体系影响了成岩作用。从地层水离子变化情况来看, 超压促进了矿物溶解, 而低压体系中主要成岩作用为钙长石的钠长石化。

参考文献:

[1] Garven G. Continental-scale groundwater-flow and geological processes[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23: 8-117.

[2] Hanor J S. Kilometer-scale thermohaline overturn of pore waters in the Louisiana Gulf-Coast[J]. Nature, 1987, 327: 501-503.

[3] Moldovanyi E P, Walter L M. Regional trends in water chemistry, Smackover Formation, Southwest Arkansas: geochemical and physical controls[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(6): 864-894.

[4] Kharaka Y K, Hanor J S. Deep fluids in the continents: I. Sedimentary basins[G]//Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry 5. [s. n.]: Elsevier Science Ltd, 2003: 499-540.

[5] 杨万里. 松辽陆相盆地石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.

[6] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

[7] 侯启军, 冯志强, 冯子辉, 等. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.

[8] 邢顺淦. 松辽盆地北部扶、杨油层砂岩的成岩作用与储层性质研究[J]. 大庆石油地质与开发, 1990(4): 13-24.

[9] 黄福堂. 松辽盆地北部扶杨地层水地球化学特征研究[J]. 西南石油学院学报, 1995, 17(4): 6-13.

[10] 解习农, 焦赳赳, 熊海河. 松辽盆地十屋断陷异常低压体系及其成因机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003, 28(1): 25-56.

[11] 孟元林, 王建伟, 吴河勇, 等. 松辽盆地北部中浅层成岩作用及其对储层质量的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(3): 217-226.

[12] Cheng J M, McIntosh J C, Xie X N, et al. Hydrochemistry of formation water with implication to diagenetic reactions in Sanzhao depression and Qijia-gulong depression of Songliao Basin, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 88(1-3): 86-90.

[13] 赵健. 松辽盆地西斜坡泥岩地层压实规律[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 486-492.

[14] Xie X N, Jiao J J, Tang Z H, et al. Evolution of abnormally low pressure and its implications for the hydrocarbon system in the southeast uplift zone of Songliao basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(1): 99-119.

[15] 黄福堂. 松辽盆地油气水地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.

[16] Du X B, Xie X N, Lu Y C, et al. Hydrogeochemistry of formation water in relation to overpressures and fluid flow in the Qikou Depression of the Bohai bay basin, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2010, 106(1-3): 77-83.

[17] Surdam R C. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.

[18] Thyne G B, Boundreau P, Ramm M. Simulation of potassium feldspar dissolution and illitization in the Staffjord Formation, North Sea[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(4): 621-635.

[19] Hanor J S. Reactive transport involving rock-buffered fluids of varying salinity [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(21): 3721-3732.

[20] Land L S. Na-Ca-Cl saline formation waters, Frio Formation (Oligocene), South Texas, USA: products of diagenesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(11): 2163-2174.

[21] 黄福堂, 谭伟, 冯子辉. 松辽盆地北部地层水的物理化学性质和特征[J]. 大庆石油地质与开发, 1997(3): 22-25.

[22] He S, Middleton M, Tang Z H. Characteristics and origin of underpressure system in the Shiwu Fault Depression, south-east Songliao Basin, China[J]. Basin Research, 2000, 12(2): 147-158.

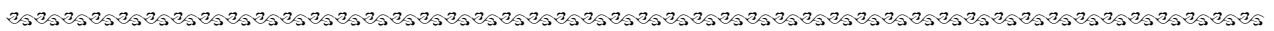
[23] 李伟, 赵克斌, 刘崇禧. 含油气盆地水文地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008.

[24] 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

[25] Davissou M L, Criss R E. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(15): 2743-2752.

[26] Xie Xinong, Jiao Jiujiu, Cheng Jianmei. Regional variation of formation water chemistry and diagenesis reaction in underpressured system: example from Shiwu depression of Songliao basin, NE China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78-79: 585-590.

(编辑 韩 彧)



(上接第 80 页)

[8] Wilkiins R W T, Wilmsburst J R, Russell N J, et al. Fluorescence alteration and the suppression of vitrinite reflectance[J]. Organic Geochemistry, 1992, 18: 629-640.

[9] Wilkiins R W T, Wilmsburst J R, Hladky G, et al. Should fluorescence alteration replace vitrinite reflectance as a major tool for thermal maturity determination in oil exploration? [J]. Organic Geochemistry, 1995, 22: 191-209.

[10] 李志明, 秦建中, 廖宗廷, 等. FAMM 技术及其应用进展[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 307-311.

[11] 李志明, 施伟军, Sherwood N, 等. 激光拉曼光谱法分析多种

显微组分荧光变化及其应用[J]. 岩矿测试, 2008, 27(5): 341-345.

[12] 肖贤明, 刘祖发, 申家贵, 等. 确定含油气盆地古地温梯度的一种新方法: 镜质体反射率梯度法[J]. 科学通报, 1998, 43(21): 2340-2343.

[13] Suggate R P. 埋深、镜质体反射率及地温梯度之间的相互关系[J]. 李军, 译. 石油地质与实验, 2002(总 61 期): 40-53.

[14] 李志明, 徐二社, 秦建中, 等. 烃源岩评价中的若干问题[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2010, 25(6): 8-12.

(编辑 徐文明)