

不同加热温度下松辽盆地北部低熟页岩油生烃特征与演化规律

林铁锋^{1,2}, 李 昕^{1,2}, 杨 帆^{1,2}, 刘 鑫^{1,2*}, 程心阳^{1,2}, 王 猛^{1,2}, 张红丽^{1,2}, 吴 锡^{1,2}

¹多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江 大庆

²中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆

收稿日期: 2026年6月11日; 录用日期: 2026年8月24日; 发布日期: 2026年9月2日

摘 要

松辽盆地北部嫩江组与青山口组发育巨厚层富有机质页岩, 低熟页岩油资源潜力巨大, 但针对其加热过程中生烃特征与动态演化规律的系统研究仍较薄弱, 制约了勘探有利区优选与资源量精准评价。本研究以齐家-古龙凹陷和三肇凹陷为重点研究区, 系统采集不同层位、不同有机碳含量的低成熟度页岩样品, 设计生油率测定实验、封闭体系热演化实验以及边生边排热演化实验等, 揭示不同温度下低熟页岩的生烃特征及变化规律。研究表明: ① 松辽盆地北部低熟页岩干酪根类型为I-IIa型, 研究区油页岩生油潜力有利区的地球化学参数指标为: TOC > 4%, 含油率 > 3%, 热解烃S₂ > 25 mg/g, 氢指数HI > 350 mg/g; ② 封闭体系下, 生油量呈现先升后降的变化规律, 350℃~400℃为生油高峰阶段, 对应成熟度1.08%~1.74%, 有机质转化率达68.2%; ③ 半开放体系下, 生油量随温度升高持续增加, 350℃~400℃增幅大, 占总量78%, 对应成熟度0.95%~1.53%, 有机质转化率达71.7%。

关键词

松辽盆地北部, 低熟页岩油, 生烃特征, 演化规律

Hydrocarbon Generation Characteristics and Evolution Patterns of Low-Maturity Shale Oil in the Northern Songliao Basin under Different Heating Temperatures

Tiefeng Lin^{1,2}, Xin Li^{1,2}, Fan Yang^{1,2}, Xin Liu^{1,2*}, Xinyang Cheng^{1,2}, Meng Wang^{1,2}, Hongli Zhang^{1,2}, Xi Wu^{1,2}

¹State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing Heilongjiang

*通讯作者。

文章引用: 林铁锋, 李昕, 杨帆, 刘鑫, 程心阳, 王猛, 张红丽, 吴锡. 不同加热温度下松辽盆地北部低熟页岩油生烃特征与演化规律[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(3): 408-419. DOI: 10.12677/jogt.2026.483045

Abstract

The Nenjiang and Qingshankou formations in the northern Songliao Basin host thick, organic-rich shales with significant potential for low-maturity shale oil resources. However, systematic studies on the hydrocarbon generation characteristics and dynamic evolution during thermal maturation remain insufficient, which constrains the optimization of exploration sweet spots and accurate resource assessment. This study focuses on the Qijia-Gulong and Sanzhao sags as key areas, systematically collecting low-maturity shale samples from different layers and with varying total organic carbon (TOC) contents. Experiments including oil yield determination, closed-system thermal evolution, and semi-open (generation-and-expulsion) thermal evolution were designed to reveal the hydrocarbon generation characteristics and variation patterns of low-maturity shales under different temperatures. The results show: (1) The kerogen in low-maturity shales of the northern Songliao Basin is predominantly type I-IIa. The geochemical parameter thresholds defining favorable zones for oil shale potential in the study area are: TOC > 4%, oil yield > 3%, pyrolysis hydrocarbon S_2 > 25 mg/g, and hydrogen index HI > 350 mg/g. (2) Under closed-system conditions, oil generation first increases and then decreases; the peak oil generation window occurs at 350°C~400°C, corresponding to a maturity of 1.08%~1.74% R_o , with an organic matter conversion rate of 68.2%. (3) Under semi-open system conditions, oil generation continuously increases with rising temperature. The temperature range of 350°C~400°C exhibits a sharp increase, accounting for 78% of the total oil generated, corresponding to a maturity of 0.95%~1.53% R_o and an organic matter conversion rate of 71.7%.

Keywords

Northern Songliao Basin, Low-Maturity Shale Oil, Hydrocarbon Generation Characteristics, Evolution Patterns

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国页岩油资源丰富，正成为推动原油增产稳产、保障国家能源安全的重要战略接替领域。按有机质热演化成熟度，陆相页岩油可分为中高熟和中低熟两大类[1]。其中，陆相中低熟页岩油原位转化资源潜力巨大，被视为我国石油工业的下一个“革命者”[2]，原位转化技术是中低熟页岩油实现工业化开发的有效路径[3]，目前其成熟度已接近 95%，一旦先导试验取得突破，能源安全保障能力将得到实质性提升[4]。以松辽盆地北部为例，其嫩江组与青山口组发育有厚层富有机质页岩，低熟页岩油资源量可观，勘探前景广阔[5]-[7]。然而，这类页岩油因热演化程度低，干酪根尚未大量生烃，必须通过原位加热才能实现有效开发[8]。目前，对低熟页岩油在不同加热温度下的生烃特征与演化规律仍缺乏系统认识，制约了资源评价与高效开发。

本研究以松辽盆地北部嫩江组及青山口组低熟页岩为对象，整体优选取心井，兼顾不同层位、不同

成熟度、不同有机碳含量,开展封闭及半封闭体系热演化实验,定量分析不同温度条件下产油气量、产物族组成等演化特征,旨在揭示低熟页岩油生烃规律,厘定关键演化阶段的温度界限,为建立大庆油田低熟页岩油原位转化开采方案奠定科学基础。

2. 区域地质背景

松辽盆地是我国东北地区一个具断拗双重结构的中新生代陆相含油气盆地。横跨黑龙江、吉林、辽宁三省和内蒙古自治区,总面积约 26 万平方千米,是一个北东向展布的菱形沉积盆地。构造上可划分为中央坳陷区、西部斜坡区、西南隆起区、东南隆起区、东北隆起区和北部倾没区六大构造单元[9]。从构造的观点来看,松辽盆地位于环太平洋构造域北段,介于西伯利亚和中朝地台之间,盆地四周被加里东和海西褶皱带所环抱,西部为内蒙海西晚期褶皱带,东部为吉黑海西晚期褶皱带,南部为华北地台北缘-内蒙地轴。盆地基底由海西期褶皱变质岩系及同期的岩浆岩构成。盆地内部发育大面积中、新生代地层,白垩系是松辽盆地主要沉积地层,分布范围广、沉积厚度大,是盆地主要生、储油岩系。

松辽盆地在白垩纪沉积时期,地层序列完整,地层自下而上为白垩系下统火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组和泉头组,白垩系上统青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组和明水组[10]。

松辽盆地经历青山口组沉积时期和嫩江组沉积时期两次大规模湖侵,形成了两套厚层的优质烃源岩,分别为白垩系青山口组和嫩江组,具有丰度高、类型好,生油潜力大,分布范围广的特点[11]。松辽盆地北部低熟页岩油纵向上划分出 4 套甜点层,分别是嫩二段下部甜点层、嫩一段中部甜点层、嫩一段下部甜点层及青一段下部甜点层。嫩二段与青一段甜点层以高总有机碳含量为突出特征,而嫩一段各甜点层有机质丰度整体偏低。所有层段有机质类型均以 I 型为主,热演化程度整体较低,表明其具备良好的原位转化生烃潜力。平面上,高品质甜点层的发育受沉积相带控制,分布规律各异:嫩二段甜点层稳定分布于古龙凹陷及三肇凹陷东部;青一段下部甜点层则主要富集在三肇凹陷东部至朝阳沟阶地一带,具有高丰度、大厚度的特点。相比之下,嫩一段中部甜点层非均质性强,厚度变化大,主要发育在古龙凹陷-大庆长垣南部及三肇凹陷东部;嫩一段下部甜点层丰度与厚度均有限,集中分布在中央坳陷区南部[11][12]。

3. 样品与实验方法

3.1. 样品来源

取样层位选取嫩江组二段、嫩江组一段及青山口组一段,样品选取于尚 15 井、鱼 20 井、江 79 井、杜 77 井、双油 1 井、长 Y1 井、朝 85 井、古页 1 井、朝 21 井、敖 34 井、朝页 6801 井等 11 口井,图 1 是松辽盆地北部低熟页岩油取样井平面分布图。样品的成熟度范围为 0.41%~0.78%,TOC 范围为 1.18%~13.97%。

3.2. 实验测试方法

本次研究设计了三类热模拟实验,具体条件如下:

1、生油率测定实验

采用铝甑干馏反应釜,在半开放体系中进行。样品为 40~60 目页岩颗粒,共 35 块。以电加热方式从常温连续升温至 520℃,总加热时长 2.5 h。实验产出物为油和气。

2、封闭体系热演化实验

采用高温高压反应釜,构建完全封闭的实验环境。样品为 $\phi 2.5$ cm 圆柱状及尺寸约 1 cm 的块状页岩,设 4 组平行样。采用电加热,设置 300℃、350℃、375℃、400℃、450℃、500℃共 6 个温度梯度,各温度点恒温 72 h。实验产出物为油和气。

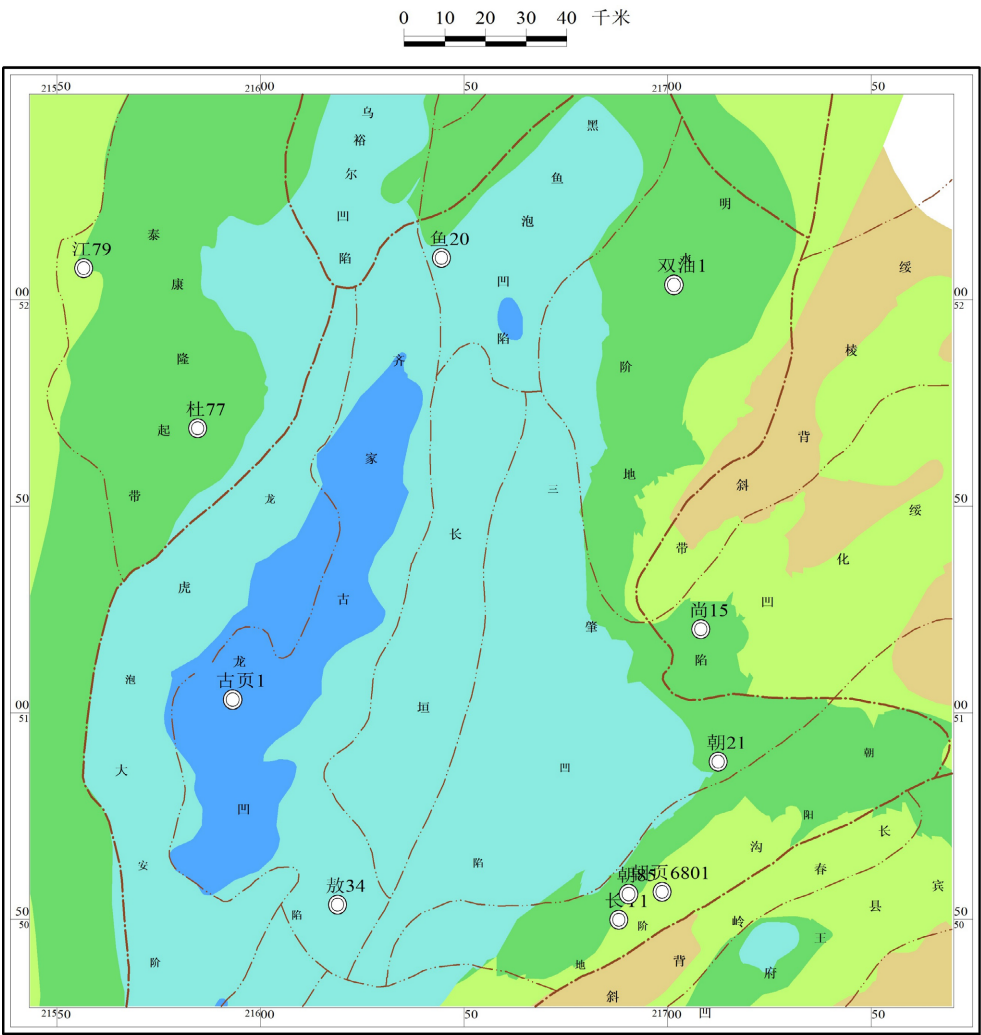


Figure 1. Plan view distribution of sampling wells for low-maturity shale oil in the northern Songliao Basin

图 1. 松辽盆地北部低熟页岩油取样井平面分布图

3、边生边排热演化实验

采用铝甄干馏反应釜，构建半开放实验环境。样品规格、加热方式与温度梯度同封闭体系实验，设 3 组平行样。各温度点恒温 30 h。实验产出物为油和气(见表 1)。

Table 1. Comparison of experimental conditions for thermal evolution hydrocarbon generation
表 1. 热演化生烃实验条件对比表

序号	实验名称	实验设备	体系	样品状态	加热方式	数量(块)	实验温度(℃)	加热时间(h)	产物
1	生油率测定实验	铝甄干馏反应釜	半开放	40~60 目粒度颗粒	电加热	35 块	常温至 520	连续加热 2.5 h	油、气
2	封闭体系热演化实验	高温高压反应釜	封闭	φ2.5 cm 圆柱 + 尺寸约 1 cm 块状样	电加热	4 套	300、350、375、400、450、500	单温度点 72 h	油、气
3	边生边排热演化实验	铝甄干馏反应釜	半开放	φ2.5 cm 圆柱 + 尺寸约 1 cm 块状样	电加热	3 套	300、350、375、400、450、500	单温度点 30 h	油、气

4. 加热过程中生烃特征变化规律

4.1. 样品有机地球化学特征

对成熟度较低的烃源岩而言, 氢指数 HI 能较好地反映有机质生烃能力的高低, 可作为良好的有机质类型判识指标, Tmax-HI 是评价有机质类型的有力工具[13]。通过对尚 15、朝 85、朝页 6801 等 6 口井近 100 余块样品进行热解分析, 绘制了松辽盆地北部低熟页岩油 Tmax-HI 关系图(图 2)。从图中可以看出, 样品总体处于未熟 - 低熟阶段, 干酪根类型为 I-IIa 型, 成熟度处于生油窗早期阶段。参照标准 NBT 51011-2014, 采用 KD-Q1200 低熟页岩含油率测定仪, 选取部分样品开展铝甄干馏含油率实验, 35 块样品中, 生油率 > 5% 的有 12 块, 在 3%~5% 之间的有 7 块, 生油率 < 3% 的 16 块, 结合热解实验数据, 认为当 TOC > 4%, $S_1 + S_2 > 25 \text{ mg/g}$ 时, 样品的含油率 > 3%; 当 TOC > 6%, $S_1 + S_2 > 40 \text{ mg/g}$ 时, 样品的含油率 > 4.5% (图 3~5)。

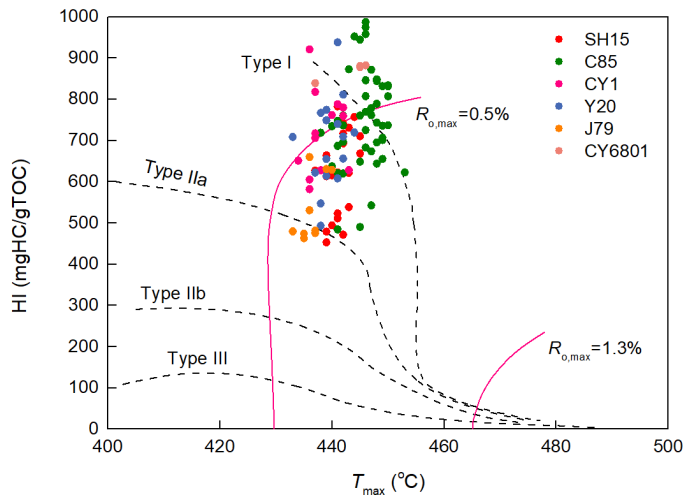


Figure 2. Relationship diagram of Tmax and HI
图 2. Tmax-HI 关系图

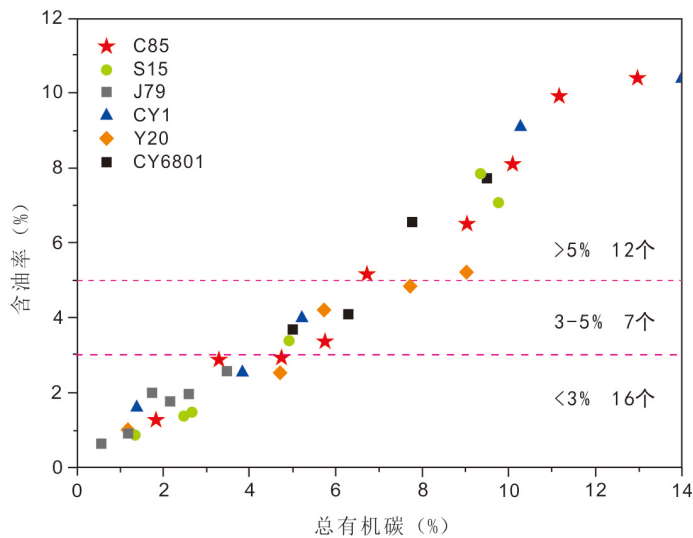


Figure 3. Relationship between oil content and TOC
图 3. 含油率与 TOC 关系图

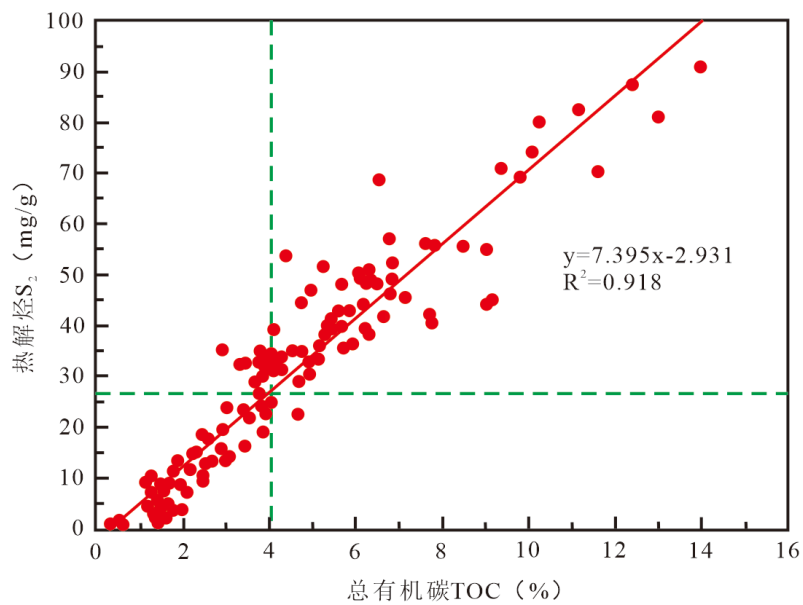


Figure 4. TOC-S₂ relationship diagram
图 4. TOC-S₂ 关系图

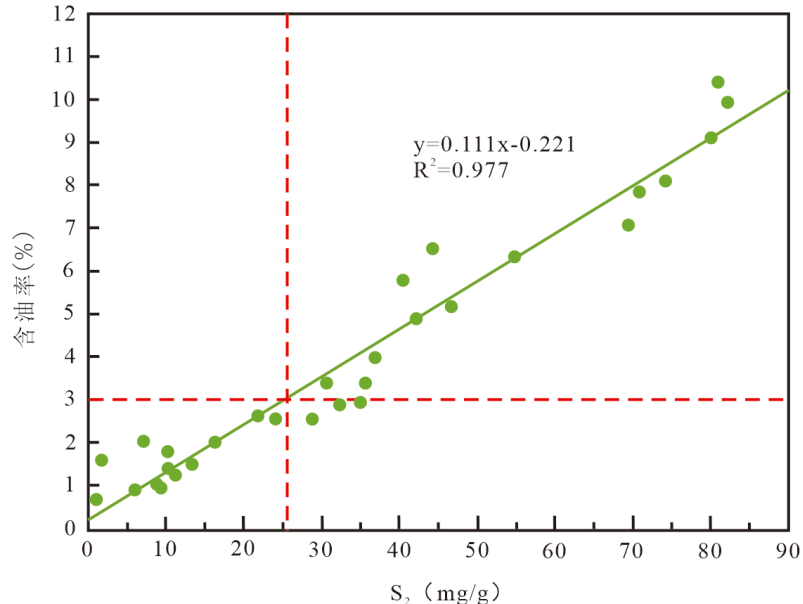


Figure 5. S₂-oil content relationship graph
图 5. S₂-含油率关系图

依据 Peters (1986)和 Goodarzi 等(2019)研究成果[14] [15], 构建 TOC-S₂ 油气潜力划分图评价油页岩生烃潜力指标。从有机碳含量及含油率角度出发, 江 79 井多数样品处于生油一般区, 不是油页岩工业开发的有利区域, 朝 85 井、尚 15 井和鱼 20 井是较好的区域。鉴于本区 TOC 是决定油页岩生烃能力及产油率的关键要素, 联合 TOC-含油率、TOC-S₂ 和 S₂-含油率关系图选取油页岩生油有利区的参数指标。TOC-S₂ 和 S₂-含油率之间很强的正线性关系显示 TOC>4%时, S₂>25 mg/g, 含油率>3%。因此, 依据油气潜力划分图、TOC-含油率及 TOC-S₂ 曲线表明研究区油页岩生油潜力有利区的地球化学参数指标为: TOC>4%, 含油率>3%, 热解烃 S₂>25 mg/g, 氢指数 HI>350 mg/g (图 6)。

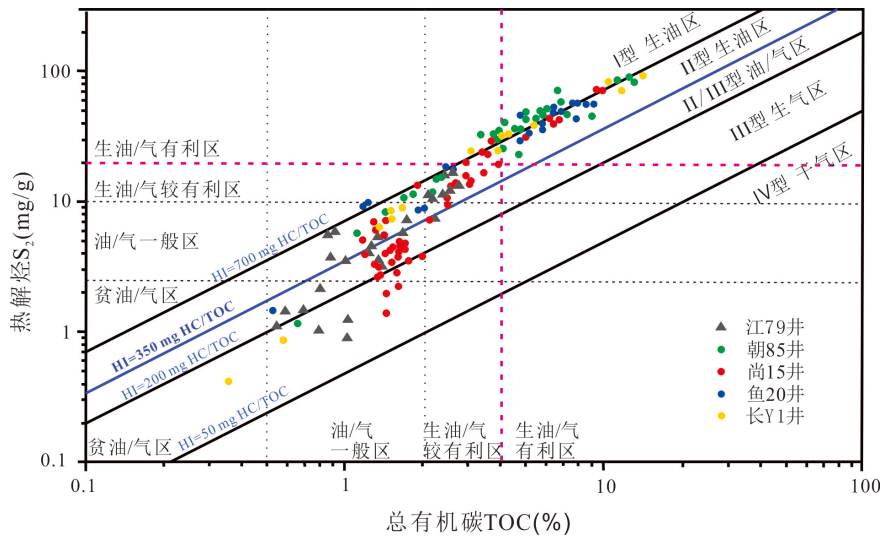


Figure 6. Hydrocarbon generation potential identification map of the sample
图 6. 样品生烃潜力判别图

4.2. 生烃特征变化规律

为了评价不同温度下低熟页岩生烃演化特征, 采用封闭体系电加热及半开放体系电加热实验进行低熟页岩热解模拟实验。考虑到有机碳含量的影响, 实验选取较低有机碳($\text{TOC} < 4\%$)、中等有机碳($4\% \sim 8\%$)和较高有机碳含量($\text{TOC} > 8\%$)的低熟页岩样品作为研究对象。

4.2.1. 封闭体系电加热实验

① 油气产量及变化规律

封闭体系电加热实验即借助高温高压热解模拟仪, 明确封闭体系电传导加热条件下, 低熟页岩在不同温度作用下的油气产出规律。封闭体系热演化实验采用样品为 SH15-3 ($\text{TOC} = 11.05\%$)、J79-29 ($\text{TOC} = 3.47\%$)、Y20-17 ($\text{TOC} = 7.14\%$)和 SH15-13 ($\text{TOC} = 4.91\%$)。

根据 SH15-3 ($\text{TOC} = 11.05\%$)在 $300^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 热解温度范围内油气产量分布图(图 7), 可以看出, 排出油及残留油产量随温度升高呈现先升后降的演化规律, 生油率 350°C 急剧上升, 375°C 最高, 450°C 迅速下降, 说明 $350^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 为生油高峰阶段, 其对应成熟度 $1.08\% \sim 1.74\%$ 。有机质转化率高, 原始样品 TOC 为 11.05% , 最高生油量 75.36 mg/g , 有机质转化率可达 68.2% 。封闭体系下, 残留油量大于排出油量, 排出油占比约 $37\% \sim 50\%$, 生气量随温度升高逐渐增加。

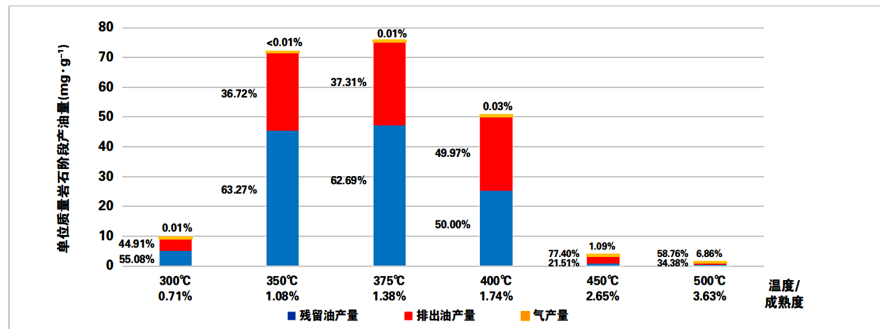


Figure 7. Distribution map of oil and gas production in closed system samples
图 7. 封闭体系样品油气产量分布图

② 油气族组成分布特征

不同热解温度下低熟页岩油族组成分布规律如图 8 所示。300℃油气生成量低,饱和烃和芳烃占比较低,非烃和沥青质占比较高。随着温度的升高,饱和烃和芳烃占比逐渐增加,非烃及沥青质占比逐渐降低。

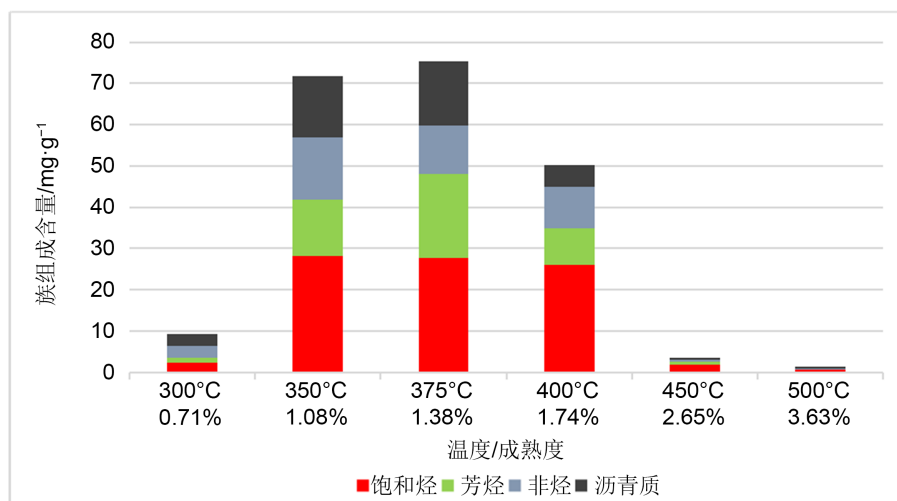


Figure 8. Composition of the generated oil at different pyrolysis temperatures in a closed system
图 8. 封闭体系下不同热解温度下生成油族组成

由图 9 中不同热解温度下排出油族组成分布规律可知,在温度较低(300℃~350℃)时排出油沥青质含量较高,说明 350℃排出的页岩油重质组分较多,不利于流动;但是在 375℃时沥青质含量迅速降低,且随温度升高含量持续降低;排出油中非烃含量在 350℃时迅速升高,在 450℃前保持稳定,450℃时含量骤降;饱和烃与芳烃含量则随着温度升高不断增加。整体上,随着温度升高,排出油的族组成呈现明显变化:非烃和沥青质等重质组分在热演化过程中不断分解,含量逐渐降低;而饱和烃与非烃等轻质组分则随热演化进行含量持续增加。这表明随着热演化程度加深,排出油中的重质组分逐渐裂解生成轻质组分。值得注意的是,在 375℃~400℃区间内,轻质组分占比较高,因而该温度范围是更为理想的反应条件。

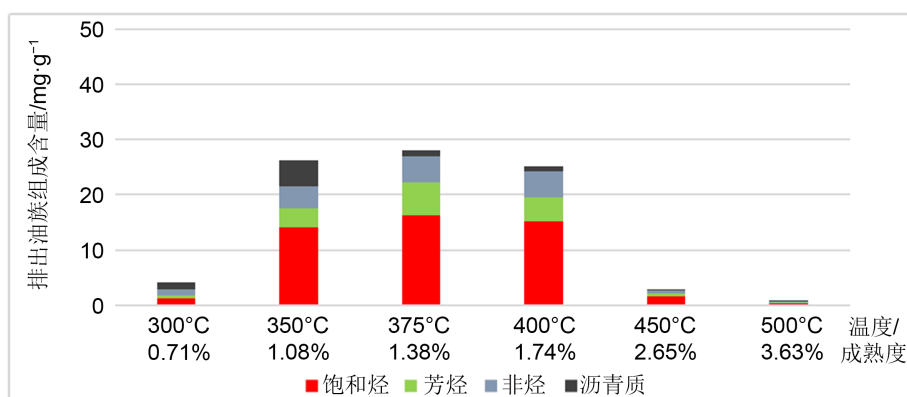


Figure 9. Composition of the expelled oil at different pyrolysis temperatures in a closed system
图 9. 封闭体系下不同热解温度下排出油族组成

图 10 给出了不同热解温度下残留油族组分的分布特征。由图可知,随热解温度升高,350℃时残留油中饱和烃和芳烃含量最低,非烃和沥青质含量较高,说明 350℃残留于样品中的油页岩油重质组分较

多,不利于流动;400℃时饱和烃含量最高,沥青质含量最低,与排出油组分分布规律一致,即400℃残留于样品中的油页岩油轻质组分较多,利于页岩油的二次开发;非烃含量>375℃呈下降趋势,而沥青质含量>400℃一直增大,即重质组分比例升高,说明350℃~400℃温度范围利于油页岩油的采出。

在450℃之前残留油生成量较高,其中非烃及沥青质占比较高,450℃之后残留油生成量骤降。对比排出油及残留油族组成占比,可以发现排出油中饱和烃约占60%,而残留油中饱和烃约占35%,说明饱和烃更易于排出。

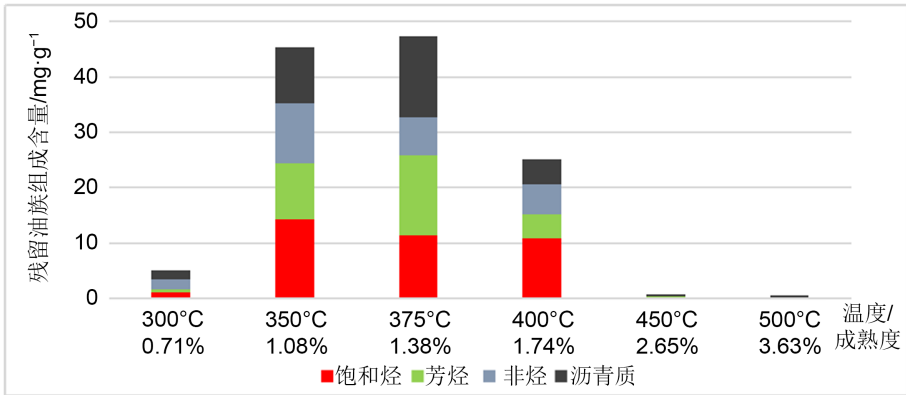


Figure 10. Composition of residual oil at different pyrolysis temperatures in a closed system
图 10. 封闭体系下不同热解温度下残留油族组成

4.2.2. 半开放体系电加热实验

① 油气产量及变化规律

半开放体系选取样品为 SH15-26 (TOC = 2.586%)、SH15-9 (TOC = 7.609%)、C85-52 (TOC = 5.749%) 和 C85-49 (TOC = 11.15%)。

根据 SH15-2 (TOC = 14.31%)在 300℃~500℃热解温度范围内油气产量分布图(图 11), 可以看出, 生油量随热解温度升高展现出持续升高的变化规律, 350℃~400℃生油量增幅大, 对应成熟度 0.95%~1.53%。有机质转化率高, 原始样品 TOC 为 14.31%, 最高生油量 102.6 mg/g, 有机质转化率可达 71.7%。半开放体系下, 排出油量远大于残留油量, 350℃之后排出油占比超过 77%。

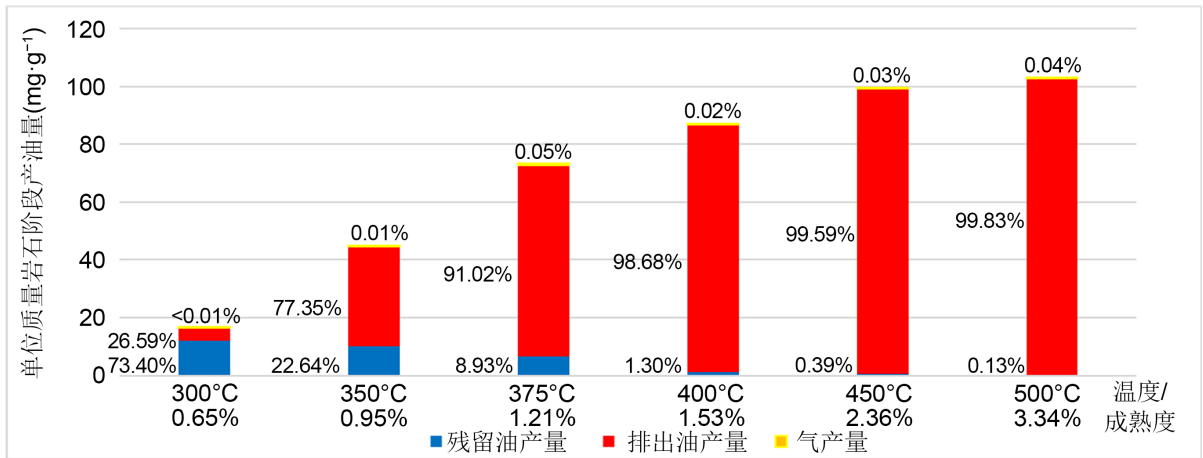


Figure 11. Distribution map of oil and gas production in semi-open system samples
图 11. 半开放体系样品油气产量分布图

② 油气族组成分布特征

图 12 展示了半开放体系中低熟页岩油在不同热解温度下的族组成分布特征。在 300℃时，油气生成量较低，其中饱和烃和芳烃所占比例较小，而非烃与沥青质的占比较高。随着温度升高，饱和烃和芳烃的相对含量呈现先上升后下降的趋势，非烃的相对含量逐渐增加，而沥青质的相对含量则表现出先升高、后降低、再升高的变化规律。

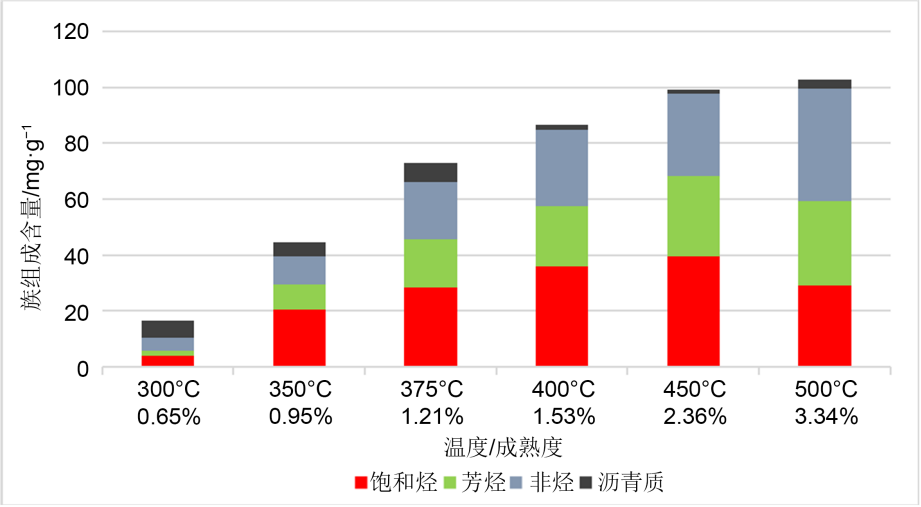


Figure 12. Composition of the generated oil at different pyrolysis temperatures under semi-open system conditions

图 12. 半开放体系下不同热解温度下生成油族组成

根据图 13 所示的不同热解温度下排出油的族组成分布规律可知，在较低温度(300℃)下，排出油含量较少，表明此时页岩油中重质组分较多，流动性较差；当温度升至 350℃时，排出油含量显著增加，且其中饱和烃占主导，芳烃与非烃含量相近，沥青质含量较低。随着温度进一步升高，排出油含量持续增加，其中饱和烃含量先上升后下降，芳烃与沥青质含量逐渐上升，但排出油中沥青质整体仍保持较低水平。

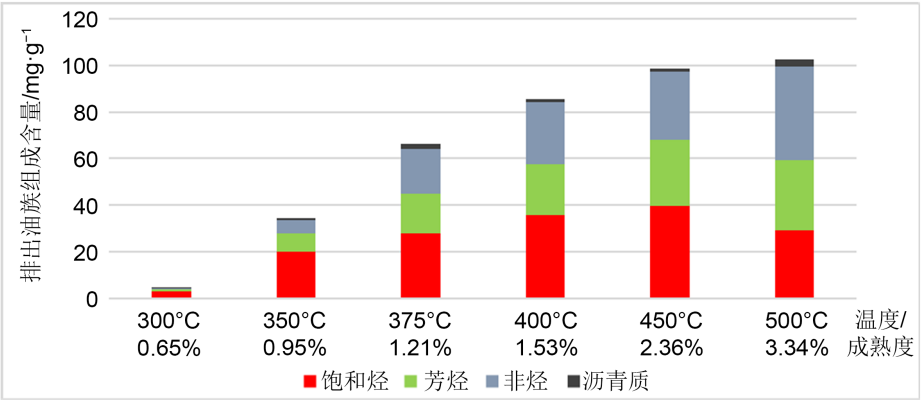


Figure 13. Composition of the expelled oil at different pyrolysis temperatures under semi-open system conditions

图 13. 半开放体系下不同热解温度下排出油族组成

由图 14 所示的不同热解温度下残留油族组分分布规律可知，随热解温度升高，350℃时残留油中饱

和烃和芳烃含量最低,非烃和沥青质含量较高,说明 350℃ 残留于样品中的油页岩油重质组分较多,不利于流动;400℃ 时饱和烃含量最高,沥青质含量最低,与排出油组分分布规律一致,即 400℃ 残留于样品中的油页岩油轻质组分较多,利于页岩油的二次开发;非烃含量 > 375℃ 呈下降趋势,而沥青质含量 > 400℃ 一直增大,即重质组分比例升高,说明 350℃~400℃ 温度范围利于油页岩油的采出。

在 450℃ 之前残留油生成量较高,其中非烃及沥青质占比较高,450℃ 之后残留油生成量骤降。对比排出油及残留油族组成占比,可以发现排出油中饱和烃约占 60%,而残留油中饱和烃约占 35%,说明饱和烃更易于排出。

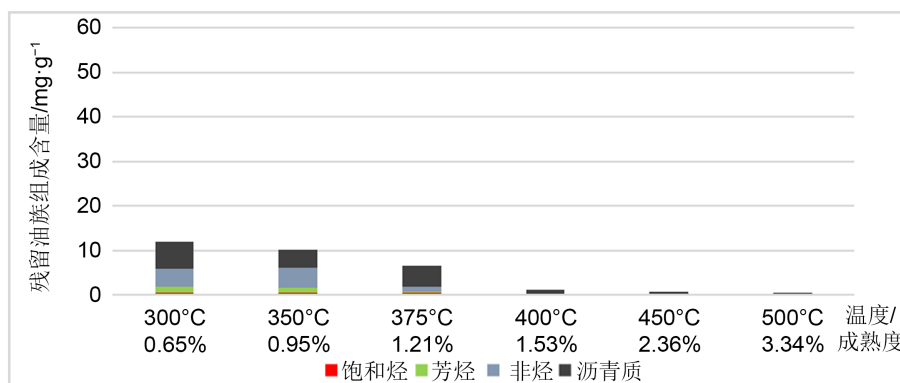


Figure 14. Composition of residual oil at different pyrolysis temperatures under semi-open system conditions

图 14. 半开放体系下不同热解温度下排出油族组成不同热解温度下残留油族组成

5. 结论

1、松辽盆地北部低熟页岩干酪根类型为 I-IIa 型,依据油气潜力划分图、TOC-含油率及 TOC-S₂ 曲线表明研究区油页岩生油潜力有利区的地球化学参数指标为: TOC > 4%, 含油率 > 3%, 热解烃 S₂ > 25 mg/g, 氢指数 HI > 350 mg/g。

2、封闭体系热演化生烃实验表明: 生油量呈现先升后降的变化规律, 350℃~400℃ 为生油高峰阶段, 对应成熟度 1.08%~1.74%; 有机质转化率高, 样品 TOC 为 11.05%, 最高生油量 75.36 mg/g, 有机质转化率可达 68.2%; 残留油量大于排出油量, 排出油占比约 37%~50%, 生气量随温度升高逐渐增加。生成油族组分以饱和烃及芳烃为主, 其中饱和烃含量最高; 排出油中饱和烃约占 60%, 而残留油中饱和烃约占 35%, 说明饱和烃更易于排出。

3、半开放体系热演化生烃实验表明: 生油量随温度升高持续增加, 350℃~400℃ 增幅大, 占总量 78%, 对应成熟度 0.95%~1.53%; 有机质转化率高, 样品 TOC 为 14.31%, 最高生油量 102.6 mg/g, 有机质转化率可达 71.7%; 半开放体系下, 排出油量远大于残留油量, 350℃ 之后排出油占比超过 77%。生成油族组分以饱和烃及芳烃为主, 其中饱和烃含量最高; 排出油中饱和烃约占 50%, 而残留油中饱和烃约占 10%, 说明饱和烃更易于排出。

致 谢

松辽盆地北部低熟页岩油转化技术研究评价及试验设计(项目编号: 25DQYTSG015-06-02)。

参考文献

[1] 赵文智, 卞从胜, 李永新, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 73 亚段页岩有机质转化率、排烃效率与页岩油主富集类

- 型[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 12-23.
- [2] 赵文智, 朱如凯, 张婧雅, 等. 中国陆相页岩油类型、勘探开发现状与发展趋势[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 1-13.
- [3] 柳波, 刘阳, 刘岩, 等. 低熟页岩电加热原位改质油气资源潜力数值模拟——以松辽盆地南部中央坳陷区嫩江组一、二段为例[J]. 石油实验地质, 2020, 42(4): 533-544.
- [4] 赵文智, 赵阳升, 李根生, 等. 陆相中低熟页岩油富集与原位转化科学问题及关键技术[J]. 中国科学基金, 2023, 37(2): 276-284.
- [5] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 1-14.
- [6] 何文渊, 崔宝文, 张金友, 等. 松辽盆地北部嫩江组中-低成熟页岩油地质特征及勘探突破[J]. 石油学报, 2024, 45(6): 900-913.
- [7] 蒙启安, 林铁锋, 张金友, 等. 页岩油原位成藏过程及油藏特征——以松辽盆地古龙页岩油为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(3): 24-37.
- [8] Bai, X., Li, J., Liu, X., Wang, R., Ma, S., Yang, F., *et al.* (2024) Evolution of the Anisotropic Thermophysical Performance for Low-Maturity Oil Shales at an Elevated Temperature and Its Implications for Restoring Oil Development. *Energy & Fuels*, **38**, 15216-15224. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02964>
- [9] 崔宝文, 王瑞, 白云凤, 等. 古龙页岩油勘探开发进展及发展对策[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(4): 125-136.
- [10] 王兴宇. 松辽盆地基底构造反射地震成像与构造演化分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2025.
- [11] 林铁锋, 马生明, 李昕, 等. 松辽盆地北部白垩系低熟页岩油甜点特征及分布规律[J]. 大庆石油地质与开发, 2025, 44(6): 54-64.
- [12] 何文渊, 蒙启安, 林铁锋, 等. 温度作用下松辽盆地北部嫩江组低熟页岩原位渗透率演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(3): 1-12.
- [13] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 中国陆相页岩油勘探理论与技术进展[J]. 石油科学通报, 2023(4): 373-390.
- [14] Peters, K.E. (1986) Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis. *AAPG Bulletin*, **70**, 318-329. <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11d7-8645000102c1865d>
- [15] Goodarzi, F., Gentzis, T. and Dewing, K. (2019) Influence of Igneous Intrusions on the Thermal Maturity of Organic Matter in the Sverdrup Basin, Arctic Canada. *International Journal of Coal Geology*, **213**, 103280. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103280>