

渝东南地区五峰 - 龙马溪组的烃源岩特征 ——以渝参7井为例

程礼军¹, 徐向阳^{2*}, 勾杰^{1*}, 刘成均¹, 韩克宁², 蒋晨², 刘娜娜², 蒙春³

¹重庆市地质矿产勘查开发局107地质队, 重庆

²中国石油化工股份有限公司华东油气分公司, 江苏南京

³重庆华地资环科技有限公司, 重庆

收稿日期: 2025年11月11日; 录用日期: 2025年12月12日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

本次研究以渝东南地区渝参7井为重点解剖对象, 通过系统的地球化学分析手段, 深入评价了上奥陶统五峰组 - 下志留统龙马溪组烃源岩的生烃潜力。分析结果表明: 该套烃源岩有机质丰度纵向非均质性强, 五峰组TOC含量(平均2.17%)显著高于龙马溪组(平均1.25%), 具备较好的原始生烃潜力; 干酪根碳同位素与显微组分特征共同揭示其有机质类型为以I型为主的腐泥型, 生烃母质优良; 镜质体反射率(R_o 平均2.14%)指示烃源岩已处于过成熟演化阶段, 生气高峰期已过。综合认为, 渝参7井揭示的五峰组烃源岩品质相对较好, 研究成果对深化该区页岩气成藏机理认识及勘探选区具有重要指导意义。

关键词

五峰组 - 龙马溪组, 烃源岩特征, 地球化学评价, 渝东南地区

Characteristics of Hydrocarbon Source Rocks in the Wufeng-Longmaxi Formations of Southeastern Chongqing

—A Case Study from Well Yucan-7

Lijun Cheng¹, Xiangyang Xu^{2*}, Jie Gou^{1*}, Chengjun Liu¹, Kening Han²,
Chen Jiang², Nana Liu², Chun Meng³

¹No. 107 Geology Team, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Development, Chongqing

²Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing Jiangsu

³Chongqing Huadi Resources and Environment Technology Co., Ltd., Chongqing

*通讯作者。

文章引用: 程礼军, 徐向阳, 勾杰, 刘成均, 韩克宁, 蒋晨, 刘娜娜, 蒙春. 渝东南地区五峰-龙马溪组的烃源岩特征[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(4): 790-800. DOI: 10.12677/jogt.2025.474088

Received: November 11, 2025; accepted: December 12, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

This work conducted a systematic geochemical analysis of the source rocks from the Upper Ordovician Wufeng Formation to the Lower Silurian Longmaxi Formation, using Well Yucan-7 in southeastern Chongqing as a key research object to thoroughly evaluate their hydrocarbon generation potential. The results indicate that the hydrocarbon source rock exhibits strong vertical heterogeneity in organic matter abundance, with the Wufeng Formation showing a significantly higher mean Total Organic Carbon (TOC) content of 2.17% compared to 1.25% in the Longmaxi Formation, indicating a favorable original hydrocarbon generation potential. Kerogen carbon isotope characteristics and maceral composition collectively reveal that the organic matter is predominantly Type I sapropelic, signifying excellent source material. Vitrinite reflectance (R_o) values, averaging 2.14%, indicate that the source rocks have reached an over-mature stage, having passed the peak phase for gas generation. In conclusion, the Wufeng Formation source rock encountered in Well Yucan-7 demonstrates relatively good quality, and these findings provide significant insights for understanding shale gas accumulation mechanisms and guiding exploration in the region.

Keywords

Wufeng-Longmaxi Formations, Hydrocarbon Source Rock Characteristics, Geochemical Evaluation, Southeastern Chongqing

Copyright © 2025 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. 前言

非常规油气资源勘探开发是保障国家能源安全的重要战略方向。其中,页岩气作为一种清洁低碳的天然气资源,已成为全球油气增储上产的重要领域。中国南方上扬子地区下古生界海相页岩层系分布广泛,特别是上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组,不仅是页岩气储集层,更是该区域古生界油气系统重要的烃源岩。渝东南地区位于四川盆地东南缘,地处利川-武隆复向斜带,是我国页岩气勘探的重点区域。该区五峰-龙马溪组页岩具有厚度大、有机质丰度高、热演化程度适中的特点,是页岩气生成的物质基础[1]。同时,该套烃源岩生成的天然气亦可能运移至常规储层中成藏,因此,深入研究其地球化学特征对页岩气及常规天然气勘探均具有重要指导意义。开展烃源岩评价,明确其生烃潜力与演化历史,是油气地质研究的核心环节,对推动渝东南地区非常规油气资源勘探开发至关重要。

前人对渝东南地区五峰-龙马溪组页岩已进行了大量研究,主要集中在页岩气储层特征、含气性分析及保存条件评价等方面[2]-[4]。区域上,该套页岩厚度一般为60~130米,下部以硅质页岩为主,向上砂质含量增加。地球化学参数显示,优质页岩段(①~⑤小层)总有机碳(TOC)含量高,介于2.05%~6.3%之间,平均值达4.0%;有机质类型以I型干酪根为主,镜质体反射率(R_o)多分布在2.0%~3.76%,指示过成孰干气阶段。在矿物组成方面,石英等脆性矿物含量高(平均59.8%),有利于压裂改造。有机岩石学研究表明,藻类体、笔石等成烃生物是主要生烃组分,形成的有机孔为页岩气提供了储集空间。然而,以往研究多侧重于页岩气的“储集”和“开采”属性,对烃源岩的生烃潜力、有机质精细组成和演化历史缺乏

系统深入的分析。具体不足体现在：首先，对烃源岩的有机质丰度虽有统计，但对其非均质性及控制因素揭示不够；其次，关于有机质类型判别多依赖宏观指标，对干酪根显微组分构成及其对生烃贡献的精细研究薄弱；再者，干酪根稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)等判识有机质来源和演化程度的关键地球化学参数数据积累不足；此外，有机质热演化史与关键生烃期次恢复的精度也有待提高。这些不足限制了对该地区油气成藏过程的完整认识，亟需以重点探井为例进行烃源岩特征的专项精细研究。

本研究以渝东南地区渝参7井为重点研究对象，系统开展五峰-龙马溪组烃源岩的精细地球化学分析。研究将聚焦以下核心内容：首先是有机质丰度，即通过高密度取样和岩石有机碳测定，精确表征烃源岩 TOC 含量及其纵向变化规律，评价生烃潜力；其次是，有机质类型，拟综合采用干酪根显微组分鉴定、岩石热解参数及稳定 $\delta^{13}\text{C}$ ，精确判别有机质类型，识别主要生烃母质来源；进而进行有机质成熟度分析，基于镜质体反射率(R_o)等参数，确定烃源岩热演化程度，划分生烃阶段。通过上述研究，旨在揭示渝参7井揭示的五峰-龙马溪组烃源岩的内在特征与生烃规律，为深化渝东南地区油气成藏机理认识和指导页岩气勘探提供扎实的地球化学依据。

2. 地质背景

渝参7井位于重庆市酉阳县桃花源镇小坝乡龙池村，构造位置位于秀山凸起褶皱带毛坝向斜轴部(图1)，主要勘探目的层是上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组，完钻井深为901.63 m，钻探目的：(1) 了解毛坝向斜及附近地区五峰组-龙马溪组地层的岩性、岩相发育情况及变化规律；(2) 获取毛坝向斜及附近地区五峰组-龙马溪组地层有关评价页岩气的各项地质参数；(3) 探索毛坝向斜及附近地区五峰组-龙马溪组黑色页岩含气性。渝参7井所在区域主要包括3个褶皱构造单元和2条断层，其中褶皱构造包括2个背斜、1个向斜，断层包括1条逆-平移断层和1条正断层(图2)：

(1) 毛坝向斜(北北东向)

位于酉阳附近扬起，向北东方向延伸，酉阳至毛坝轴向北20°东，毛坝以北逐渐转为北35°东。两翼岩层倾角为：东翼约50°，西翼约35°。向斜极为紧凑，轴部最新地层为三叠系嘉陵江组。

(2) 咸丰背斜(北北东向)

轴向可分两段，铜鼓以北为北20°东，铜鼓以南近乎南北。北段背斜开阔，轴部岩层平缓，两翼倾角较陡(东翼约50°，西翼约30°)，箱状褶皱明显，核部最老地层为寒武系天河板组，往南南西倾伏，地层顺次渐新，倾没于下志留统地层中。在鱼泉至黑水一带，由于背斜急剧倾伏及西翼北北东向正断层的影响，次级褶皱及断裂甚为发育。南段在铜鼓附近，由于轴向的变化，西翼岩层产生了局部倒转，并伴随有逆掩断层产生使有由东向西推进之势。

(3) 桐麻岭背斜(北北东向)

轴线通经青华、艮岭等地，长达60公里，南北轴向约北28°东，东段艮岭一带约北10°东，故略呈“S”形延展。

(4) 碗尔沱逆-平移断层(北北东向)

位于桐麻岭背斜轴部，长约6公里，断层走向约北55°西，倾向北东，倾角50°~70°，产状常有一定变化，该断层斜切下、中寒武统地层及该背斜的轴线，使两盘岩层产生逆向及顺时针方向扭动，地层垂直错距仅数十米，水平错动为300~400 m。

(5) 马喇湖正断层(北北东-北东向)

南段黑水至鱼泉一带走向北25°东，鱼泉以北走向北5°~10°东，倾向北西，倾角50°~70°。断层处多呈低凹地形，局部能见断层面，较平整具角砾岩化，断层上盘发育一系列分支褶皱与断裂，而与该主断层往北斜交。下盘主要为寒武系中统高台组；上盘南段为奥陶系下统，往北依次为志留系。断距往北增大达2.2公里。

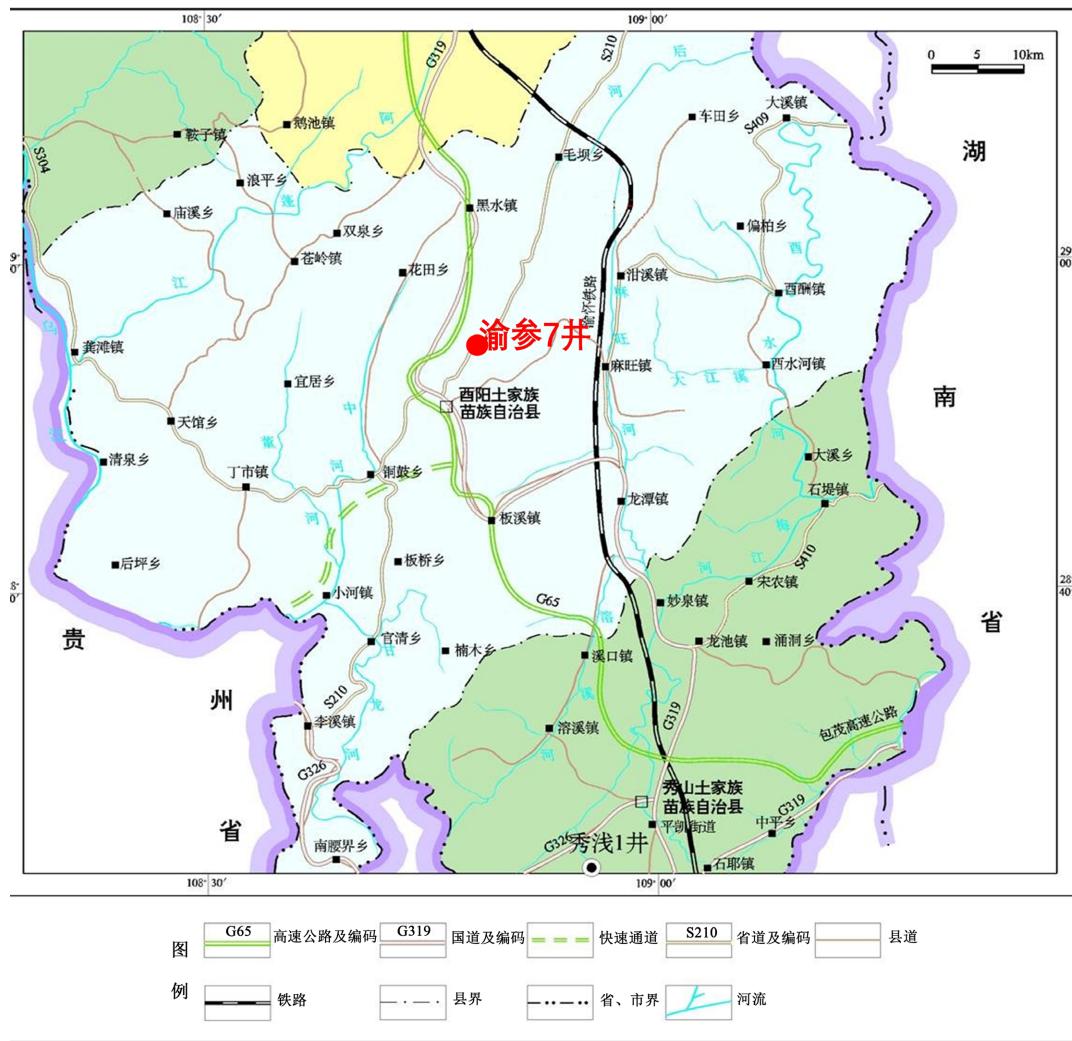


Figure 1. Geographic location map of Well Yu Can 7 [5]

图 1. 渝参 7 井地理位置图[5]

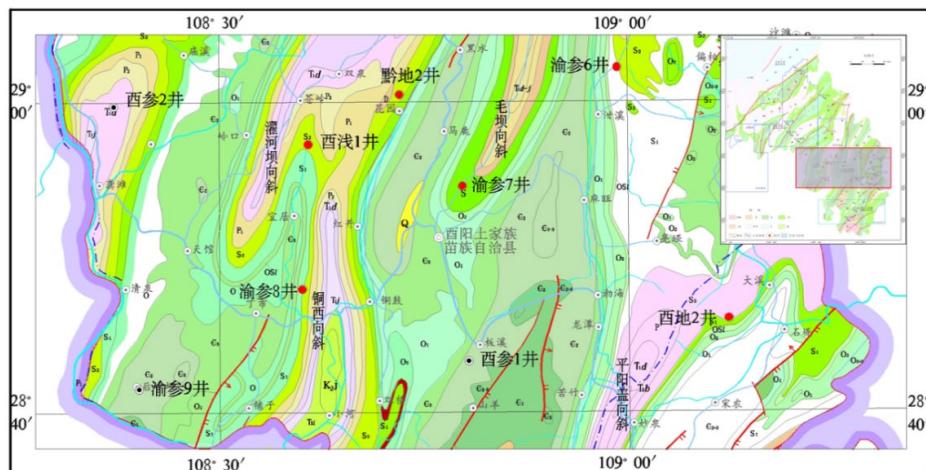


Figure 2. Tectonic outline map of the adjacent area of Well Yu Can 7 [5]

图 2. 渝参 7 井所在区域构造纲要图[5]

3. 结果与讨论

3.1. 有机质丰度

有机质丰度是指单位质量岩石内所含有机质的数量。在其它条件相近的前提下, 岩石中原始有机质含量(丰度)越高, 其生烃能力越强[6] [7]。目前, 衡量岩石中有机质的丰度所用的指标主要有总有机碳(TOC)、氯仿沥青“A”、总烃和生烃潜量($S_1 + S_2$), 但对于高-过成熟的页岩, 由于受岩石生烃、排烃作用的影响, 氯仿沥青“A”、总烃和生烃潜量等指标难以准确指示页岩原始生烃能力。而总有机碳含量是指岩石中有机碳占岩石质量的百分比, 虽然随着有机质热成熟作用的进行, 总有机碳是减少的, 但研究表明岩石质量在演化过程中也是逐渐减小的, 因此, 总有机碳含量可以近似代表岩石原始有机质丰度, 是评价烃源岩及其原始生烃能力的有效指标。

渝参 7 井五峰组-龙马溪组 79 个页岩样品分析测试结果表明, TOC 含量变化范围较大, 分布在 0.17~4.63%, 平均 1.35% (图 3(a))。其中, 有机碳含量小于 1% 的样品有 46 个, 占总数的 58.23%; 有机碳含量在 1%~2% 的样品有 18 个, 占总数的 22.78%; 有机碳含量大于 2% 的样品有 15 个, 占总数的 18.99%。整体上, 五峰组 TOC 平均值为 2.17%, 龙马溪组 TOC 平均值为 1.25%, 五峰组 TOC 比龙马溪组大。同附近的酉浅 1 井相比(图 3(b)) (酉浅 1 井位置图见图 2), 渝参 7 井页岩有机碳含量偏低。

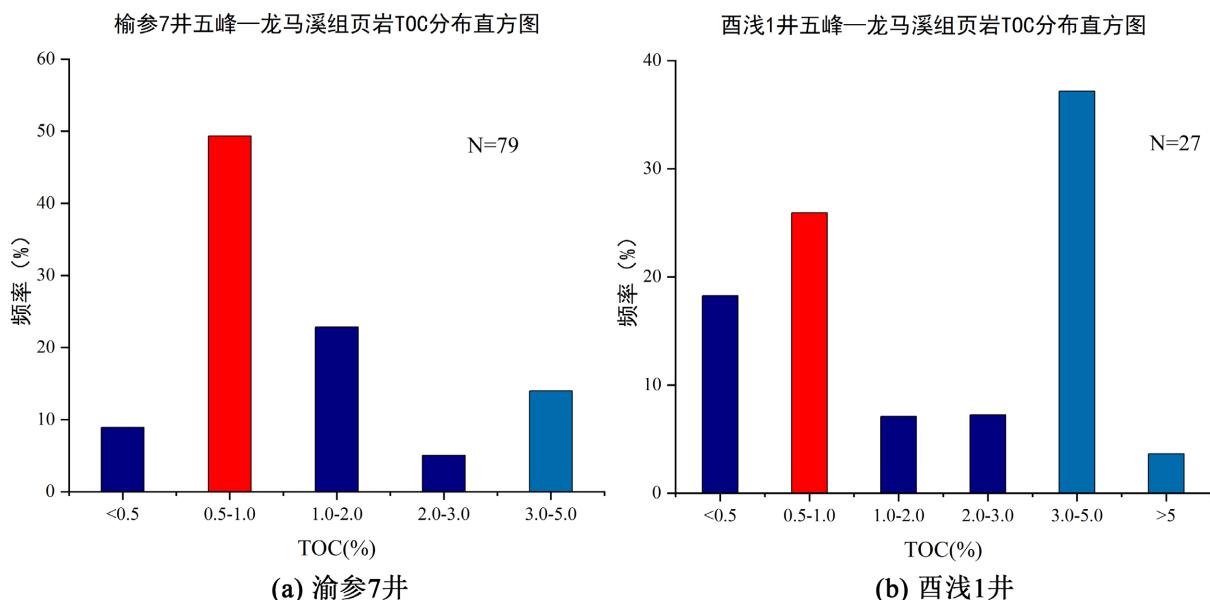


Figure 3. Histogram of TOC Distribution in Black Shale of the Wufeng-Longmaxi Formation from Well Yu Can 7 and Adjacent Well You Qian 1

图 3. 渝参 7 井及周边酉浅 1 井五峰组-龙马溪组黑色页岩 TOC 分布直方图

从纵向上看(图 4), 渝参 7 井五峰组-龙马溪组页岩有机质分布具有较强的非均质性, 富有机质页岩层段主要分布于下部, 颜色以灰黑、黑色为主, 页理逐渐发育, 普遍含黄铁矿。自下而上, 由于缺氧环境遭到破坏, 伴随岩性的变化, 页岩有机碳含量整体呈逐渐减小的趋势。龙马溪组页岩层有机质丰度较低, 页岩总有机碳含量在 0.17%~4.44% 之间, 平均值为 1.25%, 说明该页岩层段生烃潜力较差; 五峰组页岩气有机质丰度高, 总有机碳含量在 0.17%~4.63% 之间, 平均值为 2.17%。全部 9 个样品总有机碳含量大于 2% 的有 5 个, 占全部样品数的 55.6%, 表明该页岩层段有机质含量较高, 生烃潜力好。

岩石热解方面, 岩石热解参数分析的功能是定量检测岩石中的含烃量[7]。其中总烃含量为 S_0 、 S_1 、

S_2 的总和, S_0 为气态烃含量, 代表了 C_1 ~ C_7 的轻烃含量; S_1 为游离烃含量, 代表已生成但未运移走的液态烃(C_7 以后)残留量; S_2 代表干酪根可裂解生成的烃含量; $S_0 + S_1 + S_2$ 代表生烃潜量, 可反映源岩的生烃能力。但是生烃潜量受热演化程度的影响较大, 中国古生界海相烃源岩成熟度普遍很高, 岩石热解获得的残余生烃潜力通常很低, 不能直接反映其原始生烃潜力。目前, 陈建平等(2012)认为可以通过以未成熟-低成熟阶段烃源岩有机质为基础, 按有机质类型大类, 建立生烃潜量与有机碳含量之间的定量关系, 以此来计算高-过成熟烃源岩的原始生烃潜力[9]。

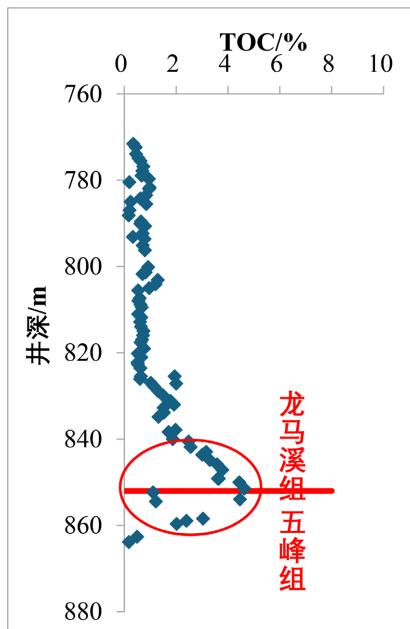


Figure 4. Variation of TOC with depth in black shale of the Wufeng-Longmaxi Formation from Well Yu Can 7
图 4. 渝参 7 井五峰组-龙马溪组黑色页岩 TOC 随深度变化图

渝参 7 井五峰组-龙马溪组 11 块页岩岩心样品岩石热解实验分析测试表明, 这套页岩生烃潜量一般为 0.025~0.093 mg/g, 平均为 0.043 mg/g (图 5)。表明该套页岩的残余生烃潜量均较低, 最大值均未达到 0.5 mg/g, 这主要是由于烃源岩演化程度过高, 随着生成的烃类的运移, $S_0 + S_1 + S_2$ 含量随之降低, 据此也可推断渝东南地区下古生界两套页岩现今生烃能力基本终止。

此外, 通过生烃潜量与 TOC 的关系(图 6)可知, 渝参 7 井生烃潜量与 TOC 呈较好的正相关关系, 随着 TOC 的增大, 生烃潜量也增大。

陈建平等(2012)以目前可以获得的我国古生界(包括元古宇)海相低成熟烃源岩为基础[9], 按下古生界(包括元古宇)、上古生界泥岩、上古生界含煤沉积(不包括煤)三大类源岩求取有机碳含量(TOC)与原始生烃潜力(Pg)之间的回归关系方程, 得出的下古生界生烃潜量计算公式: $Pg = 5.63 \times TOC - 2.37$, 按此公式推算渝参 7 井五峰组-龙马溪组页岩在其未成熟-低成熟演化阶段的原始生烃潜力应该在 0.54~23.70 mg/g 之间 (TOC 取烃源岩下限值 0.5% 和目的层最大值 4.63%), 平均值 5.83 mg/g (TOC 取目的层平均值 1.61%), 通过与中国南方地区古生界烃源岩评价等级划分标准表进行对比, 表明该套页岩原始生烃潜力较大。

3.2. 有机质类型

3.2.1. 干酪根同位素组成特征

干酪根的稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)能够表征原始生物母质的特征, 次生的同位素分馏效应不会严重

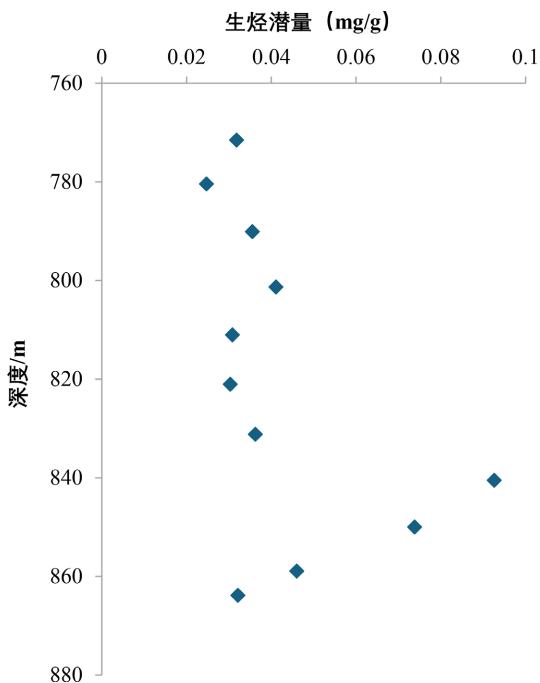


Figure 5. Variation of hydrocarbon generation potential with depth in black shale of the Wufeng-Longmaxi Formation from Well Yu Can 7

图 5. 渝参 7 井五峰组 - 龙马溪组黑色页岩生烃潜量随深度变化图

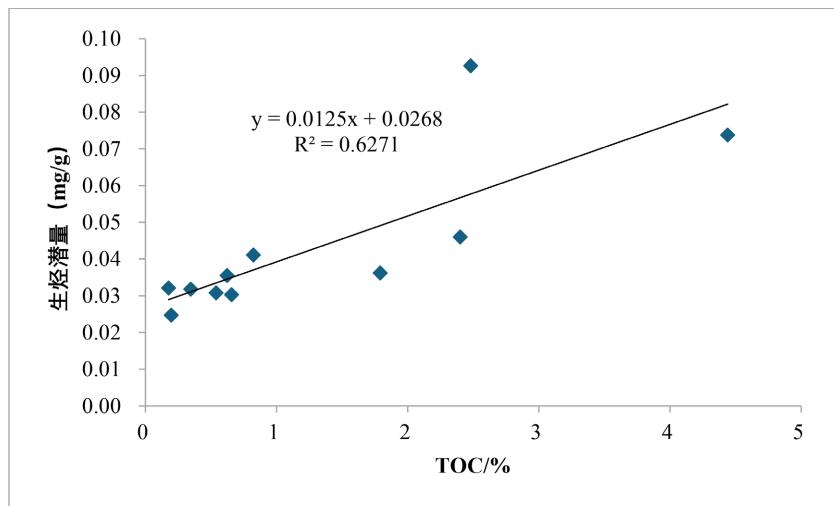


Figure 6. Relationship between hydrocarbon generation potential and TOC in Well Yu Can 7

图 6. 渝参 7 井生烃潜量与 TOC 关系图

掩盖原始生物母质的同位素印记,普遍认为是划分高-过成熟烃源岩有机质类型的有效指标。渝参 7 井 10 块页岩岩心样品干酪跟碳同位素实验结果表明,本井五峰组 - 龙马溪组干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-31.3\text{‰} \sim -19.2\text{‰}$ 之间,平均值 -28.5‰ (图 7),综合干酪根类型与 $\delta^{13}\text{C}$ 分布的关系,目的层页岩属于腐泥型干酪根。

3.2.2. 干酪根显微组分

干酪根显微组分组成中,镜质组(V)、惰性组(I)和壳质组(E)均系源于高等植物的有机质,其中镜质组(V)和惰性组(I)为典型的 III型有机质,壳质组(E)为典型的 II 型有机质,而低等生源的藻类体和无定形物质

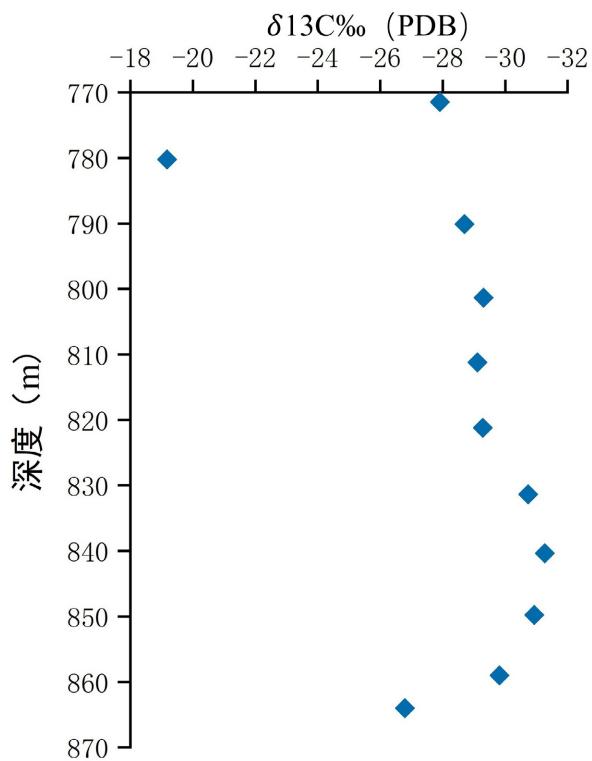


Figure 7. Variation of kerogen $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) with depth in shale samples of the Wufeng-Longmaxi Formation from Well Yu Can 7

图 7. 渝参 7 井五峰组 - 龙马溪组页岩样品干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 随深度变化图

为 I 型有机质。因此,可以根据各类组分的相对含量来划分有机质类型。据胜利油田地质院提出的干酪根类型指数(Ti)的概念,用各组分的百分含量进行加权计算:

$$Ti = (\text{腐泥组} \times 100 + \text{壳质组} \times 50 - \text{镜质组} \times 75 - \text{惰性组} \times 100)/100$$

根据这个公式可以对有机质(干酪根)类型进行综合评价:当 $Ti \geq 80$ 时为 I 型, $0 < Ti < 80$ 为 II 型, $Ti < 0$ 时为 III 型(表 1)。

Table 1. Classification criteria for kerogen types Ti

表 1. 干酪根类型 Ti 划分标准

干酪根类型	划分标准
I 型	$Ti \geq 80$
II ₁ 型	$40 < Ti < 80$
II ₂ 型	$0 < Ti < 40$
III型	$Ti < 0$

渝参 7 井五峰组 - 龙马溪组页岩 5 块岩心样品干酪根显微组分鉴定结果表明,该套页岩样品中检测到大量的腐泥组和少量的镜质组、惰质组等三类常见的有机显微组分, Ti 大于 40 小于 80 的样品有 2 个, Ti 大于 80 的样品有 3 个,故目的层页岩有机质类型为 I 和 II₁ 型;其中,五峰组 2 个样品 Ti 大于 80, 有机质类型为 I 型(表 2)。与邻井五峰组 - 龙马溪组页岩干酪根显微组分对比,渝参 7 井与渝参 8 井相类似,有机质类型均为 I 型或 II₁ 型。

Table 2. Distribution table of maceral content in shale samples of the Wufeng-Longmaxi Formation from Well Yu Can 7 and nearby wells (locations of other reference wells are shown in Figure 2)

表 2. 渝参 7 井及附近单井五峰组 - 龙马溪组页岩样品显微组分含量分布表(其他参考井位置见图 2)

井名	层位	腐泥组(%)	壳质组(%)	镜质组(%)	惰性组(%)	Ti	有机质类型
渝参 7 井	O ₃ w~S ₁ l	80~96 89.2 (5)	0	1~10 5 (5)	2~10 5.8 (5)	62.5~92.5 79.7 (5)	I 型、II ₁ 型
渝参 6 井	O ₃ w~S ₁ l	94~98 96.24 (17)	0	1~3 2.0 (17)	1~3 1.76 (17)	88.75~96.25 92.97 (17)	I 型
酉地 2 井	O ₃ w~S ₁ l	95~98 96.75 (7)	0	1~3 1.63 (7)	1~3 1.63 (7)	90.50~96.25 93.91 (7)	I 型
渝参 8 井	O ₃ w~S ₁ l	80~95 88.15 (13)	0	2~8 5.0 (13)	2~15 6.85 (13)	61.25~90.5 77.56 (13)	I 型、II ₁ 型
酉浅 1 井	O ₃ w~S ₁ l	95~99 96.8 (10)	0	1~5 3.2 (10)	0	87.75~98.25 94.4 (10)	I 型

综合两项有机质类型判别指标, 认为研究区内五峰组 - 龙马溪组页岩有机质类型属于 I 和 II₁ 型。

3.3. 有机质成熟度

对于烃源岩热演化程度, 据张义纲等“七五”研究成果, 当成熟度(R_o)>4.0%时, 干酪根已全部芳构化(石墨化), 不再有天然气生成; 陈正辅等“八五”期间对生油岩的高温模拟实验显示, 当 R_o >3.5%时, 生气量大幅度减小, 而模拟温度超过 600°C 时, 相当于 R_o =4.0%时, 装样玻璃管内出现黑色焦碳类物质, 反映生气作用基本终结。渝参 7 井 5 块岩心样品实测的成熟度数据表明, 本井五峰组 - 龙马溪组黑色页岩演化程度总体较高, 成熟度一般为 1.97%~2.25%, 平均为 2.14%(图 8), 表明该套页岩热演化程度基本处于过成熟演化阶段, 页岩已达到生气高峰期, 有利于页岩气的充分生成, 但页岩现今生烃能力有限。

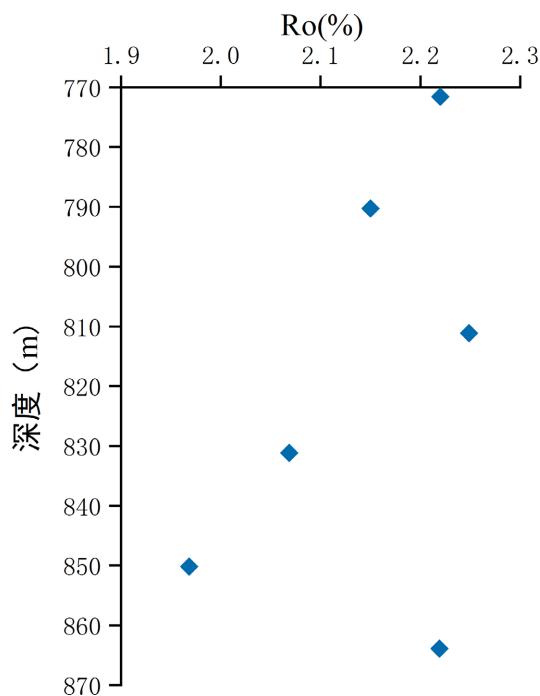


Figure 8. Variation of maturity with depth in shale samples of the Wufeng-Longmaxi Formation from Well Yu Can 7

图 8. 渝参 7 井五峰组 - 龙马溪组页岩样品成熟度随深度变化图

渝东南地区五峰组-龙马溪组页岩成熟度总体变化不大,主要分布在1.6%~3.2%之间。与相邻地区钻井及剖面样品对比,渝参7井五峰组-龙马溪组页岩有机质成熟度与邻井五峰组-龙马溪组页岩成熟度相近,与总体变化特征相适应(图9)。

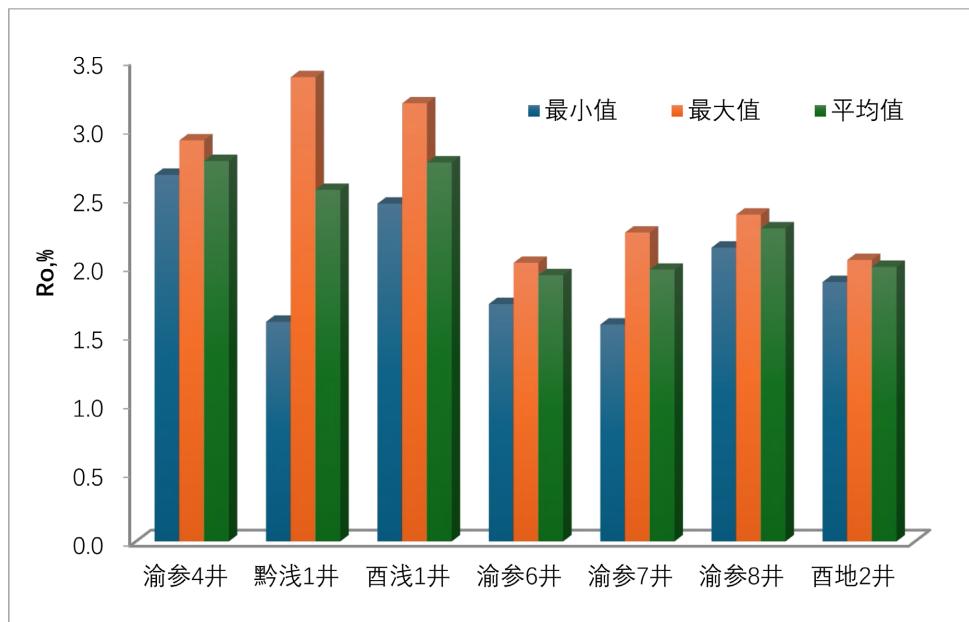


Figure 9. Histogram of maturity distribution in shale samples of the upper Ordovician-Lower Silurian from Well Yu Can 7 and adjacent wells (locations of other reference wells are shown in Figure 2)

图9. 渝参7井与邻井上奥陶统-下志留统页岩样品成熟度分布直方图(其他参考井位置见图2)

4. 结论

本研究以渝东南地区渝参7井为重点研究对象,对上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组烃源岩开展了一系列系统的地球化学分析,旨在精细评价其生烃潜力、明确有机质特征与热演化历史。通过高密度取样与实验测试,综合分析了有机质丰度、类型和成熟度等关键参数,主要获得以下几点结论。

研究揭示渝参7井烃源岩的有机碳含量整体变化范围较大,纵向非均质性显著。具体表现为五峰组页岩的有机质丰度明显高于上覆的龙马溪组,其平均TOC值达到2.17%,且超过半数的样品TOC含量大于2%,表明五峰组具备良好的原始生烃物质基础,生烃潜力显著优于龙马溪组。尽管岩石热解显示的现今残余生烃潜量极低,但通过理论公式推算,其原始生烃潜力较大,属于中等-好的烃源岩范畴。

多项地球化学指标一致确认该套烃源岩的有机质类型优良。干酪根稳定碳同位素组成表现出轻碳同位素特征,同时干酪根显微组分中以腐泥组占绝对优势,类型指数(Ti)计算结果明确指示有机质类型为以I型为主、II1型为辅,反映了其生烃母质主要来源于藻类等低等水生生物,非常利于油气的生成。

再者,渝参7井五峰组-龙马溪组烃源岩已经处于高-过成熟的热演化阶段,该套页岩的生烃高峰期已过,现今的生烃能力有限,当前生成的烃类以干气为主;这一热演化程度与区域背景相符,意味着页岩气勘探需要重点关注早期生成天然气的保存条件。

通过与邻井的对比发现,渝参7井所揭示的烃源岩品质在区域上虽非最优,但其下部的五峰组依然展示了可观的生烃潜力。综合来看,渝东南地区五峰组-龙马溪组烃源岩具有“下部优质、类型优良、演化度高”的鲜明特征。因此,未来的勘探工作应优先聚焦于五峰组优质页岩段的空间展布,并深入评价其埋藏史、热史以及构造保存条件对页岩气富集与成藏的关键控制作用。

参考文献

- [1] 武瑾, 梁峰, 齐文, 等. 渝东北地区龙马溪组页岩储层微观孔隙结构特征[J]. 成都理工大学学报(自科版), 2016, 43(3): 308-319.
- [2] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.
- [3] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438-444.
- [4] 韩月卿, 姜志远, 冯国奇, 等. 川东南五峰-龙马溪组页岩储层孔隙结构特征及影响因素[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(3): 298-309.
- [5] 李大华, 陆朝晖, 周军平, 等. 页岩气分析测试技术及地质评价方法与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版, 2022.
- [6] Liu, J., Yao, Y., Liu, D., Pan, Z. and Cai, Y. (2017) Comparison of Three Key Marine Shale Reservoirs in the South-eastern Margin of the Sichuan Basin, SW China. *Minerals*, **7**, 179. <https://doi.org/10.3390/min7100179>
- [7] He, B., Xie, L., Liu, X., Liu, J. and Elsworth, D. (2025) Mechanistic Controls on Permeability Evolution in Thermally-Upgraded Low-Maturity Oil Shales: Application of Machine Learning Outputs. *Unconventional Resources*, **6**, Article ID: 100133. <https://doi.org/10.1016/j.uncre.2024.100133>
- [8] Li, L., Liu, J., Wang, W., Zhao, P. and Lu, Y. (2023) Variational Reservoir Characteristics of the Wufeng-Longmaxi Formation from Different Sedimentary Region and Its Implications in Southeastern Sichuan Basin, China. *ACS Omega*, **8**, 20684-20696. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01235>
- [9] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, 86(7): 1132-1142.