

引文: 包汉勇, 张莉, 舒逸, 等. 四川盆地东部复兴地区侏罗系东岳庙段页岩热演化史及油气地质意义[J]. 天然气工业, 2025, 45(1): 68-79.
BAO Hanyong, ZHANG Li, SHU Yi, et al. Thermal evolution history of the Jurassic Dongyuemiao shale in the Fuxing area of eastern Sichuan Basin and its petroleum geological significance[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(1): 68-79.

四川盆地东部复兴地区侏罗系东岳庙段页岩热演化史及油气地质意义

包汉勇¹ 张莉² 舒逸² 杨锐³ 余慧¹

1. 中国石化江汉油田分公司油气产能建设管理中心 2. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院
3. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室

摘要: 页岩热演化史与油气生成过程、微观孔隙的形成演化以及油气的富集成藏密切相关, 是准确评价页岩油气资源潜力、揭示成藏富集规律的关键参数。为了准确评价四川盆地东部复兴地区侏罗系东岳庙段页岩热演化史、含油气特征及其与海相页岩气的差异, 结合研究区典型井地质、测井及地球化学资料, 利用 BasinMod 软件模拟了东岳庙段页岩的埋藏史、热演化史和生烃史, 探讨了页岩热演化与油气生成、孔隙演化、成藏富集之间的关系。研究结果表明: ①研究区东岳庙段页岩在侏罗纪中期进入生烃门限, 侏罗纪中晚期达到主生油高峰, 并存在两个生烃高峰, 分别为侏罗纪末期和白垩纪中期; ②第一个生烃高峰期以生油为主, 持续时间长且生烃速率较快, 第二个生烃高峰期以生成凝析油和湿气为主, 持续时间较短且生烃强度较低; ③东岳庙段页岩的平均累计生油强度为 9.5×10^8 t/km², 平均累计生气强度为 2.5×10^8 m³/km²; ④东岳庙段页岩孔隙演化过程可分为 4 个阶段, 分别为早期压实减孔阶段、液态烃滞留堵孔阶段、热裂解有机孔形成阶段和热裂解生湿气阶段; ⑤压实作用和液态烃滞留堵孔是导致页岩原生孔隙快速减少的主要原因, 有机质(主要为固体沥青)与黏土混杂堆积形成的有机黏土复合体是东岳庙段页岩重要的储集空间。结论认为: ①不同构造部位的埋藏史、热演化史和生烃史影响了页岩油气的生成、排放与滞留, 决定了现今页岩油气的含量差异, 抬升剥蚀厚度较小且保存条件较好的地区, 具有较高的油气滞留量, 值得高度关注; ②成果认识坚定了川东地区陆相页岩油气勘探开发信心, 为其他类似地质情况的探区提供了有益借鉴。

关键词: 四川盆地; 复兴地区; 东岳庙段; 生烃能力; 热演化史; 页岩油气; 地质意义

中图分类号: [TE122] **文献标识码:** A **DOI:** 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.01.006

Thermal evolution history of the Jurassic Dongyuemiao shale in the Fuxing area of eastern Sichuan Basin and its petroleum geological significance

BAO Hanyong¹, ZHANG Li², SHU Yi², YANG Rui³, YU Hui¹

(1. Oil and Gas Production Capacity Building Management Center, Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Chongqing 408107, China; 2. Exploration and Production Research Institute, Sinopec Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430070, China; 3. MOE Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences - Wuhan, Wuhan, Hubei 430074, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.1, p.68-79, 1/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The thermal evolution history of shale is closely related to hydrocarbon generation process, micropore formation and evolution, and hydrocarbon accumulation and enrichment, and it is a key parameter for accurately evaluating the resource potential of shale oil and gas and understanding its accumulation and enrichment patterns. In order to accurately evaluate the thermal evolution history and hydrocarbon-bearing characteristics of the Jurassic Dongyuemiao Member shale in the Fuxing area of eastern Sichuan Basin and its difference from marine shale gas, the burial history, thermal evolution history and hydrocarbon generation history of the Dongyuemiao Member shale were simulated by using the BasinMod software, based on the geological, logging and geochemical data of some typical wells in the study area. In addition, the relationships of shale thermal evolution with hydrocarbon generation, pore evolution, and hydrocarbon accumulation and enrichment were discussed. The following results are obtained. First, the Dongyuemiao Member shale in the study area reached the hydrocarbon generation threshold in the middle Jurassic period and entered the main oil generation peak in the middle to late Jurassic, with two distinct hydrocarbon generation peaks occurring at the end of the Jurassic and in the middle Cretaceous, respectively. Second, the first hydrocarbon generation peak is primarily characterized by oil generation, with a long duration and high hydrocarbon generation rate, while the second peak is dominated by the generation of condensate oil and wet gas, with a short duration and low hydrocarbon generation intensity. Third, the average cumulative oil generation intensity of the Dongyuemiao Member shale is 9.5×10^8 t/km², and the average cumulative gas generation intensity is 2.5×10^8 m³/km². Fourth, the pore evolution process in the Dongyuemiao Member shale can be divided into four stages: early compaction and pore reduction, liquid hydrocarbon retention causing pore blockage, organic pore formation by thermal cracking, and wet gas generation through thermal cracking. Fifth, the compaction and the liquid hydrocarbon retention causing pore blockage are the main reasons for the rapid reduction in primary shale pores, while the organic-clay complex composed of organic matter (mainly solid bitumen) and clay through mixing and accumulation constitutes the important reservoir space in the Dongyuemiao Member shale. In conclusion, the burial history, thermal history and hydrocarbon generation history at different structural positions influence the generation, expulsion, and retention of shale oil and gas, and control the difference in the current content of shale oil and gas. The areas with relatively minor uplift and denudation and favorable preservation conditions have a large amount of retained oil and gas, so they are worth more concerns. What's more, the research results strengthen the confidence in the exploration and development of continental shale oil and gas in the eastern Sichuan Basin, and provide a valuable reference for the exploration areas with the similar geological conditions.

Keywords: Sichuan Basin; Fuxing area; Dongyuemiao Member; Hydrocarbon generation potential; Thermal evolution history; Shale oil and gas; Geological significance

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“构造抬升—降温阶段海相深层页岩气赋存状态动态演化过程”(编号: 42172157)、中国石化股份有限公司科研项目“川东地区重点层系页岩气成藏条件与评价技术研究”(编号: P23077)。

作者简介: 包汉勇, 1981 年生, 研究员, 博士; 主要从事油气勘探开发研究与管理。地址: (408107) 重庆市涪陵区太白大道中国石化涪陵页岩气基地。ORCID: 0000-0002-4657-9375。E-mail: baohy.jhyt@sinopec.com

0 引言

页岩油气藏是典型的自生自储、原位滞留、连续聚集的非常规油气藏。不同类型页岩的产烃能力和产烃量与热演化程度密切相关,通常有机质热演化程度越高,页岩的生烃量越大,滞留在页岩层系的油气量也相应增加^[1-2]。特别是达到高成熟度后,早期滞留在页岩中的液态烃会发生热裂解,形成大量天然气,这些天然气在页岩层系有效聚集,可以形成具备商业价值的页岩气田。此外,随着有机质热演化程度的加深,页岩中形成了大量微纳米尺度的有机质孔隙,这些孔隙是页岩油气的重要赋存空间和运移通道,进而影响了油气在页岩中的富集规律^[3-5]。因此,页岩层系的热演化史与油气生成、孔隙的形成以及成藏富集过程密不可分,成为页岩油气地质研究的核心内容。

侏罗系东岳庙段页岩是四川盆地及其周缘地区页岩油气勘探与开发的重点层位,被认为是推动中国“陆相页岩油气革命”的关键地层^[6-7]。该地层具有分布广泛、埋深适中、资源潜力大的特点。近年来,国内加大了对四川盆地侏罗系东岳庙段页岩的勘探开发力度,多口钻井取得了良好的油气显示和重要勘探成果。例如,2010年,中国石化江汉油田分公司在建111井侏罗系东岳庙段进行了直井水力加砂压裂测试,获得工业气流 $3\,131\text{ m}^3/\text{d}$;2018年,风险探井FY-10井获日产天然气 $5.58\times 10^4\text{ m}^3$ 、日产油 17.6 m^3 ,标志着复兴地区东岳庙段陆相页岩油气勘探的重大突破^[7-8]。后续评价结果显示,仅四川盆地东部(下文简称川东)万州复向斜侏罗系页岩油资源量达到 $10.5\times 10^8\text{ t}$ 、页岩气资源量为 $1.5\times 10^{12}\text{ m}^3$,进一步证实了侏罗系东岳庙段页岩巨大的油气资源潜力^[9-11]。已有研究发现,侏罗系东岳庙段富有机质页岩主要形成于半深湖—深湖的强还原环境^[10,12-13],受湖盆多物源供给和沉积中心的横向迁移影响,优质岩相页岩的时空分布具有较强的非均质性^[14]。此外,东岳庙段页岩中发育多种孔隙类型,与黏土矿物相关的孔隙占主导,有机孔相对较少。对比海相页岩,陆相东岳庙段页岩具有更强的储层非均质性、更高的黏土矿物含量、更显著的储层塑性以及更复杂的流体性质,对该套地层的生烃过程以及孔隙形成与演化会产生重要的影响。

前人针对海相或海陆过渡相页岩的热演化史已有大量研究报道^[15-18],但关于陆相页岩的研究相对较少。为此,本文以川东复兴地区侏罗系东岳庙段页岩

岩为研究对象,结合前人研究及典型钻井、测井和地球化学资料,利用 BasinMod 盆地模拟软件中的生烃动力学模型,结合页岩的基本地质特征,模拟了东岳庙段页岩的埋藏史、热演化史及生烃史,探讨热演化过程与油气生成、孔隙演化及富集规律的关系,为川东复兴地区侏罗系页岩生烃潜力和优选甜点区提供了重要参考依据。

1 地质概况

研究区位于四川盆地东部的复兴地区(图1),该地区在构造上位于川东高陡断褶带的万州复向斜。研究区内构造受齐岳山断裂的影响,褶皱强烈,整体呈北东向展布。川东地区经历了印支、燕山和喜马拉雅3期构造运动,形成了一系列北东—南西向延伸的大型复背斜和复向斜构造,向斜两翼陡峭,轴部狭长。背斜核部多出露三叠系地层,向斜区则主要出露侏罗系地层^[6,19-21]。四川盆地在早中侏罗世经历了4次湖侵,自下而上形成了自流井组珍珠冲段、东岳庙段、大安寨段和凉高山组二段4套富有机质页岩。本次研究目的层为东岳庙段页岩,该套地层主要为一套滨浅湖介壳滩—半深湖相沉积,厚度为 $50\sim 70\text{ m}$,岩性为灰黑色页岩,夹不同产状和厚度的介壳石灰岩纹层或薄夹层,反映了沉积时期水体经历的多次变化,导致该套页岩强非均质性特征^[14,19]。研究区内以侏罗系为目的层的井位位于万州复向斜中的拔山寺向斜,该向斜区内目的层埋深为 $2\,000\sim 3\,000\text{ m}$,地层倾角一般小于 5° ^[8,22]。

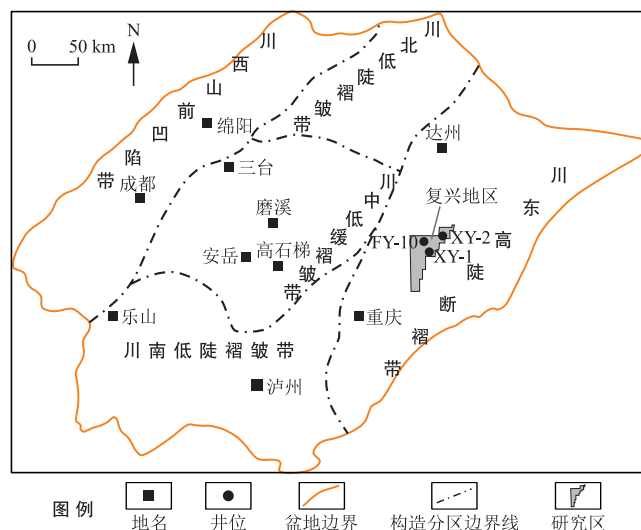


图1 四川盆地构造分区及研究区位置图

2 有机地球化学特征

2.1 有机质丰度

有机质为油气生成提供了物质基础,其含量的高低对页岩的生烃潜力、储集性以及油气富集规律有重要的控制作用^[23]。业内常用来评价页岩有机质丰度的指标包括总有机碳含量(TOC)、氯仿沥青“ A ”含量、热解游离烃含量(S_1)以及生烃潜力(S_1+S_2)等。本研究分别采用 Rapid CS cube 碳硫分析仪和岩石热解评价仪(OGE-V)测得了 190 块页岩样品的 TOC 和 128 个岩石热解值,分析了东岳庙段页岩的有机质丰度特征。结果显示,研究区目的层页岩 TOC 范围较广,为 0.12%~4.04%,均值为 1.42%,其低有机质丰度页岩($TOC < 1\%$)、中有机质丰度页岩($1\% \leq TOC \leq 2\%$)和高有机质丰度页岩($> 2\%$)分别占比为 27.5%、58.3%和 14.2%。不同井间 TOC 特征存在一定差异,但均值较接近。如 XY-1 井东岳庙段页岩 TOC 为 0.12%~3.91%,均值为 1.39%;FY-10 井 TOC 较为集中,为 1.00%~1.50%,均值为 1.31%;XY-2 井的 TOC 分布范围较广,为 0.51%~3.72%,均值为 1.57%。东岳庙段页岩生烃潜力(S_1+S_2)为 0.36~5.76 mg/g,均值为 1.55 mg/g, S_1+S_2 值小于 2.00 mg/g 和位于 2.00~6.00 mg/g 部分占比分别为 79.10%和 20.90%。进一步统计结果表明,东一亚段(①—②层) S_1+S_2 均值 2.05 mg/g,为中等烃源岩。东二亚段(⑤层) S_1+S_2 均值 1.56 mg/g,属于差烃源岩。东三亚段(⑥—⑦层) S_1+S_2 均值 0.79 mg/g,属于差烃源岩。图 2 展示了研究区 FY-10 井东岳庙段页岩 TOC 在各层的差异,其他两口井的页岩 TOC 与 FY-10 井的分布规律较为相似。随着深度增加, TOC 呈现出先明显增加后逐渐下降的趋势,即东一亚段页岩 TOC 最高,东二亚段次之,东三亚段最低。进一步比较各层的 TOC 发现东一亚段④层有机质丰度最高,3 口钻井的平均值分别为 2.63%、1.96%和 2.27%,其次为东一亚段③层,而东三亚段⑦层的 TOC 值最低。

2.2 有机质类型

有机质类型也是评价烃源岩生烃能力的重要地化指标之一,不同的有机质类型会导致热演化阶段的生烃产物和生烃能力存在明显的差别,这主要与不同类型有机质的显微组分和化学组构的差异有关^[1]。研究区页岩样品的干酪根显微组分结果显示,东岳庙段页岩显微组分主要为镜质组(包括结构镜

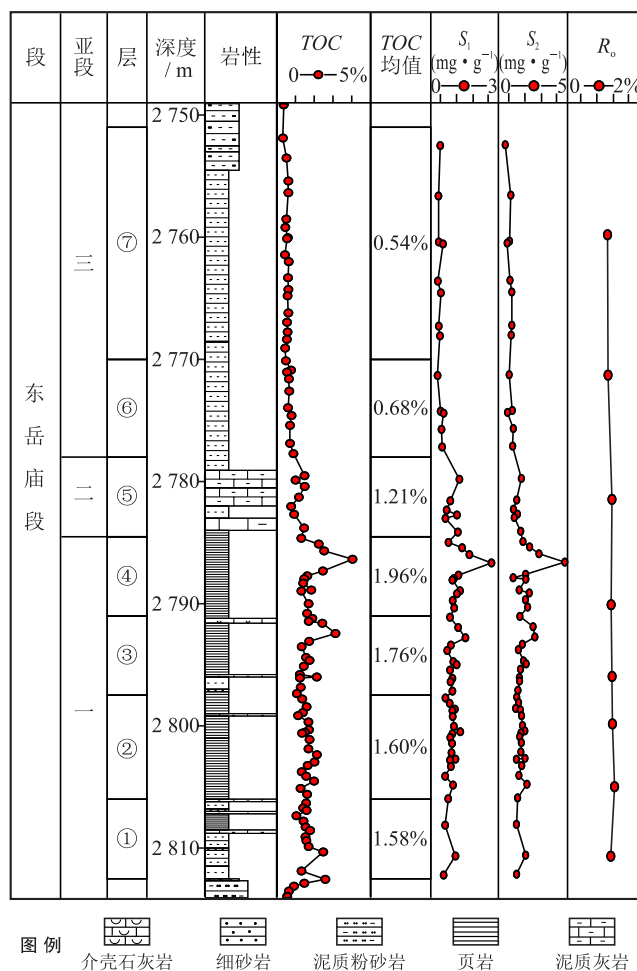


图 2 FY-10 井东岳庙段页岩地化特征纵向分布图

质体和正常镜质体)和惰性组(主要为丝质体)以及少量的次生组分(包括贫氢次生组分和富氢次生组分),其中镜质组平均相对含量约 65%,惰性组平均相对含量约 25%,贫氢次生组分平均相对含量约 10%(图 3)。页岩干酪根样品的碳同位素结果同样发现绝大部分东岳庙段页岩样品的干酪根类型属于偏腐殖混合型(II_1)和偏腐泥混合型(II_2),极个别样品属于腐泥型^[24],且随着埋藏深度增加干酪根碳同位素逐渐变重,进一步表明研究区东岳庙段页岩主要为 II_1 和 II_2 型。

2.3 热演化程度

研究区 3 口典型井页岩样品的镜质体反射率(R_0)结果显示东岳庙段页岩整体上处于成熟—高成熟阶段,主要产物为凝析油和湿气,其中 XY-1 井页岩 R_0 为 1.21%~1.73%,均值 1.46%;XY-2 井东岳庙段页岩 R_0 为 1.06%~1.42%,均值 1.31%;FY-10 井东岳庙段页岩 R_0 为 1.52%~1.58%,均值 1.56%。此外,岩石热解峰温(T_{max})也能反映有机质的热演化程度,研究区 FY-10 井东岳庙段页岩 T_{max} 为 450~480℃,

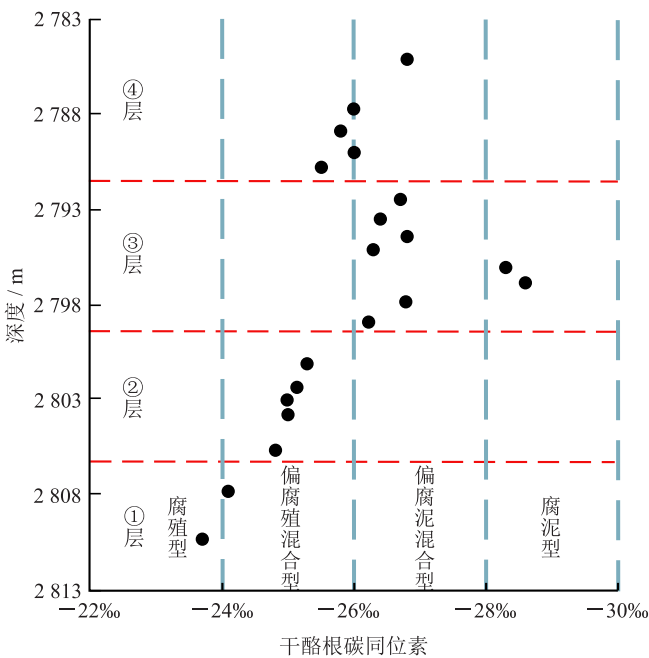


图 3 FY-10 井东岳庙段页岩干酪根碳同位素特征图

均值 470 ℃；而 XY-1 井和 XY-2 井东岳庙段页岩 $T_{\max}$ 为 450 ~ 499 ℃，均值 482 ℃，均反映了东岳庙段页岩达到了成熟—高成熟热演化阶段。由此可知，东岳庙段页岩的大部分干酪根已转化为石油，只残留少量可继续生烃的有机质，此时岩石热解 S_2 峰面积很小，会导致 $T_{\max}$ 的有效性受到影响^[25]。这也解释了岩石热解（ $T_{\max}$ ）与氢指数（HI）交会图大部分实验数据点较为集中，已无法根据 $T_{\max}$ 与氢指数交会图有效区分干酪根的类型，同样也说明研究区东岳庙段页岩处于相对较高的热演化程度，与镜质体反射率的认识一致。

3 模型选择与参数确定

3.1 埋藏史模型与关键参数确定

埋藏史重建的基本原理主要基于回剥法（也称为反演法）。埋藏史重建通常采用地层骨架厚度不变压实模型进行模拟分析，该模型基本假设是地层的横

向宽度和长度保持不变，随着地层埋藏深度增加，地层仅是纵向厚度变小，且这一变化是由孔隙度减小所导致。因此，建立适合研究区的孔—深关系方程，对于精确模拟埋藏史至关重要。目前较为常用的孔—深关系模型有基于指数模型（Exponential）、倒数模型（Reciprocal）和 Baldwin and Butler 模型。其中，指数模型源自北海中央裂陷的钻井资料，倒数模型则修正了指数模型在浅埋深时的不足。Baldwin and Butler 模型考虑了地层岩性的变化和地层压实的非线性过程，但其精确度依赖于大量数据和多个参数的校准，计算过程较为复杂。本次研究主要采用 BasinMod 盆地模拟软件中提供的倒数模型（Reciprocal），兼顾考虑不同岩性的差异，可用如下公式表示：

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{1}{\varphi_0} + kH \tag{1}$$

式中 H 表示埋藏深度，m； φ 、 φ_0 分别表示某埋藏深度处和原始孔隙度； k 表示压实因子。

从上述原理可知，埋藏史模拟过程中的关键参数包括：①现今地层厚度。主要通过钻井分层数据获取。②地层剥蚀厚度。前人利用磷灰石裂变径迹^[26-27]、镜质体反射率^[28]、声波时差—深度回归法^[29]、古地温梯度法^[30]认为四川盆地自燕山晚期以来的总剥蚀厚度为 2 400 ~ 3 610 m；在参考前人研究基础上，本文采用岩石热声发射法测定了目的层最大古地温，岩石热声发射测定古地温的原理见本文参考文献[31]，根据地温梯度和现今地层温度得到研究区的总剥蚀厚度为 2 400 ~ 2 900 m，该剥蚀厚度与前人认识基本一致^[30,32-33]。③地层年龄。据前人针对研究区及邻区地层磷灰石裂变径迹热演化史模拟和古地温梯度法等结果，万州复向斜地区在燕山晚期以来经历了多期抬升，地层最大埋藏开始抬升时间为距今 115 ~ 120 Ma^[27,33-34]，本次研究选取距研究区最近的样品结果作为地层达到最大埋深后开始抬升的时间。④地层岩性数据。在确定压实模型基础上，结合地层沉积特征，对各段的混合岩性分段计算，作为边界条件参与计算。具体相关参数见表 1。

表 1 复兴地区东岳庙段页岩埋藏史模拟关键参数表

井号	现今地层厚度 /m	最高古地温 /℃	现今地层温度 /℃	剥蚀厚度 /m	最大埋深的时间 /Ma
FY-10	61.5	165.6	78.0	2 460	115 ¹⁾
XY-1	66.5	166.1	80.0	2 540	115 ¹⁾
XY-2	59.0	162.3	73.4	2 930	115 ¹⁾

注：1) 数据据本文参考文献 [27,33-34]。

3.2 热演化史模拟

热演化史模拟能够重建地层在埋藏过程中所经历的热流和温度演化历史,常见的热演化史模拟方法包括地球热力学法和结合地球热力学与地球化学的“结合法”反演技术^[35]。相比之下,“结合法”能够弥补地球热力学的不足,基于当前的地温特征反推地层的热史和地温史,并经过实际资料(如镜质体反射率等)的校正与检验,使得模拟结果更加可靠。“结合法”热演化史模拟的一般流程包括:①确定现今热流;②利用假定的古今热流关系因子确定古热流;③确定古地温;④用古温度计检验古地温,确定最佳古今热流关系因子;⑤用最佳古今热流关系因子确定古热流和古地温。基于此,本研究采用“结合法”开展热史模拟分析。此外,根据前人关于研究区构造演化、动力学背景及热场等方面的研究成果,本次研究主要使用 BasinMod 软件中的稳态导热模型来探讨研究区的热史演化,恢复其古热流值,并利用实测的镜质体反射率进行校验^[36]。Lerche 等^[37]提出了古今热流线性变换规律,可用以下公式表示:

$$Q(T) = Q_0(1 + \beta T) \quad (2)$$

式中 T 表示该点埋藏过程中某时刻的地质年代, Ma; $Q(T)$ 表示 T 时刻的古热流值, mW/m^2 ; Q_0 表示现今热流值, mW/m^2 ; β 表示热流关系因子, Ma^{-1} 。

前人研究发现,自晚白垩世以来,研究区及其周边地区经历了强烈的隆升和剥蚀,导致热流降低速

度加快^[38-40]。快速剥蚀区域的热流降低速率更为显著,整体来看,研究区及周边地区呈现出克拉通盆地中低热流特征。研究区热流值自晚二叠世的最大古热流($70 \sim 85 \text{ mW/m}^2$)逐渐降低至现今相对较低的热流值($< 55 \text{ mW/m}^2$)^[30,41]。

热史模拟的关键参数或资料包括:①地层岩性特征,通过钻井录井资料获得;②地层厚度,依据钻井的分层数据获取;③地层剥蚀厚度,参考埋藏史结果;④页岩地球化学参数,参考实测结果;⑤古地表温度,取值 20°C ;⑥热演化史数据,研究区侏罗纪以来的热流史参考了前人的研究成果^[40-42]。图4展示了研究区模拟地温和成熟度与单井实测温度及镜质体反射率的拟合效果较好,表明本文采用的模拟方法在恢复研究区热史方面的可靠性高。拟合现今热流值约 40 mW/m^2 ,与前人关于古热流演化规律认识相符^[32,43-44]。

3.3 生烃史模拟

在地层埋藏史和有机质热成熟度史的基础上,生烃史模拟能够预测油气生成的时间,并定量评价油气生成量及其空间分布,广泛应用于油气资源评估^[1,45]。本研究采用 Sweeney 等^[46]提出的 EASY% R_o 模型来完成有机质生烃动力学的分析,该模型基于镜质体反射率的变化,通过热解动力学模型预测烃源岩在不同温度条件下的成熟度变化。该模型的动力学基础是假设烃源岩的有机质分解由多个并行反应组成,

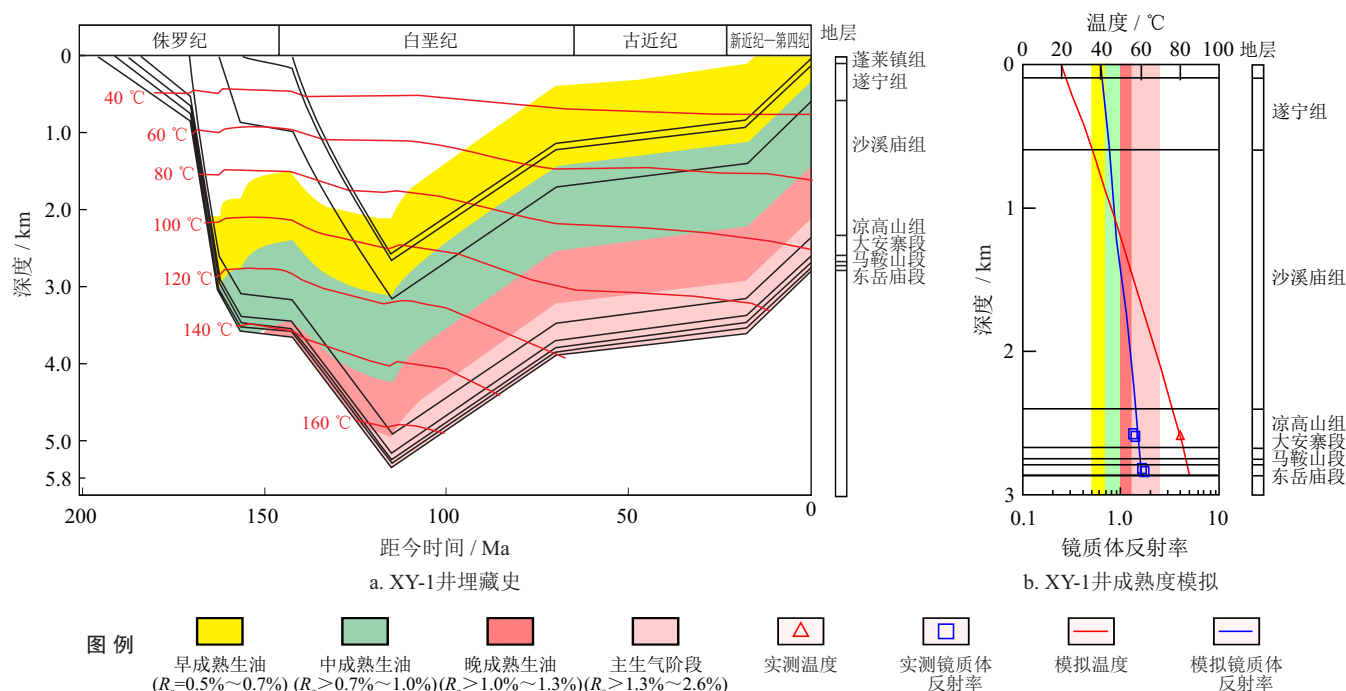


图4 XY-1井东岳庙段埋藏史与成熟度模拟图

每个反应具有不同的活化能和频率因子。图 4 显示的模拟成熟度变化趋势与实测 R_o 值基本一致，表明 EASY% 成熟史模型适用于研究区的烃源岩生烃史模拟。

4 模拟结果

4.1 东岳庙段页岩成熟度与热演化史

从图 4 中埋藏史图可知，复兴地区侏罗系东岳庙段页岩经历了早期持续的埋藏与晚期的 3 次抬升剥蚀过程。目前，该套页岩地层已全部进入了高成熟阶段，对应的 R_o 为 1.3%~2.0%。在侏罗纪中期（距今 165.6~166.0 Ma），东岳庙段底部页岩的埋藏深度超过 2 000 m，地层温度约为 100 ℃，此时东岳庙段页岩开始进入生烃门限。在侏罗纪中晚期，东岳庙段页岩开始进入主生油高峰期，这一阶段也是东岳庙段页岩继浅埋藏低熟生物气阶段后的关键生烃阶段（表 2）。随着地层持续深埋，东岳庙段页岩逐渐进入中成熟阶段，此时 R_o 为 0.7%~1.3%，生成了大量液态烃。到白垩纪中期，研究区侏罗系东岳庙段底部页岩的埋藏深度达到最大值（约为 5 500 m），地层温度约为 170 ℃，此时东岳庙段页岩的 R_o 约为 1.6%。这一时期，东岳庙段页岩中的有机质大量生烃，表明该套页岩已进入高成熟阶段，生成的产物主要为凝析油和湿气。在地层达到最大埋藏深度后，受燕山运动和喜马拉雅运动的影响，地层经历了 3 次（快—慢—快）抬升剥蚀过程，累积剥蚀厚度为 2 400~2 900 m。随之，侏罗系地层温度和热流值逐渐降低，东岳庙段页岩的生烃过程停止，直至地层抬升到现今的埋藏深度，此时地层 R_o 稳定在 1.6% 左右。

表 2 东岳庙段页岩成熟度演化史及生烃史特征表

井名	烃源岩成熟阶段距今时间 /Ma			开始生烃	生烃高峰
	$R_o=0.5\%$	$R_o=0.7\%$	$R_o=1.3\%$	距今时间 / Ma	距今时间 / Ma
XY-1	166.0	162.2	123.8	167.1	161.2
FY-10	165.6	162.0	122.1	167.3	160.5
XY-2	165.8	161.9	116.1	167.2	159.8

4.2 东岳庙段页岩生烃史

表 2 展示了研究区 3 口典型井的东岳庙段页岩生烃史模拟结果和生烃时间。研究区开始生烃时间相对相近（距今 167.0 Ma），但生烃高峰期存在一

定差异。XY-1 井东岳庙段页岩从距今 167.1 Ma 开始生烃，在距今 161.2 Ma 达到生烃速率高峰，最大单位质量 TOC 生油率和最大单位质量 TOC 生烃率分别为 59.6 (mg/g)/Ma 和 11.0 (mg/g)/Ma。在 114.5 Ma，该井出现次生气峰（主要产物为天然气），此阶段的生气量相对较少，现今烃源岩底部转化率达到 100%。FY-10 井东岳庙段页岩自距今 167.3 Ma 开始少量生烃，并在距今 160.5 Ma 达到生烃速率的最大值，该最大值略低于 XY-1 井，对应的单位质量 TOC 生油率和单位质量 TOC 生烃率分别为 52.2 (mg/g)/Ma 和 9.7 (mg/g)/Ma。该井同样在白垩纪中期（距今 112 Ma）出现了另外一个生气峰值，现今侏罗系东岳庙段页岩的转化率同样达到 100%。与其他两口典型井类似，XY-2 井的整体生烃演化史特征基本相同，但最大生烃速率低于另外两口井，该井在距今 159.8 Ma 达到生烃高峰，对应的单位质量 TOC 生油率和单位质量 TOC 生烃率分别为 46.5 (mg/g)/Ma 和 8.7 (mg/g)/Ma，这可能与该井相对较低的热演化程度有关。不同于其他两口井，XY-2 井在白垩纪中期未出现显著的生气峰值。

研究区侏罗系东岳庙段页岩主要存在两次生烃高峰（图 5），其中侏罗纪末期（距今 160 Ma）是主要的生烃阶段，生油强度为 2.9×10^8 t/km²，生气强度为 0.5×10^8 m³/km²，在白垩纪中期（距今 115 Ma）为次一级生烃高峰，本次主要以生湿气为主且多出现在埋藏深度更大的地区。随着燕山运动末期和喜马拉雅运动的地层抬升及剥蚀作用，地层温度和热流降低，导致有机质热裂解成烃的过程受阻。再加上地层剥蚀、孔隙扩容及孔隙流体冷凝收缩等综合作用，东岳庙段页岩的压实排烃和微裂缝排烃动力逐渐减弱，生烃作用最终停止。研究区东岳庙段页岩的平均累计生油强度为 9.5×10^8 t/km²，平均累计生气强度为 2.5×10^8 m³/km²。

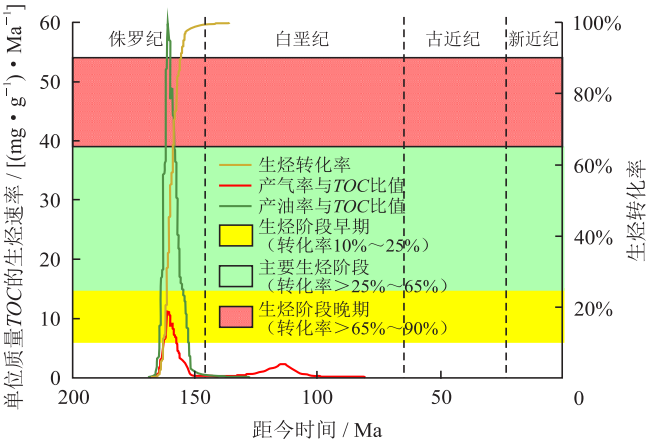


图 5 XY-1 井东岳庙段页岩生烃演化史图

5 讨论

5.1 页岩热演化史与页岩油气形成

近 10 年来,已有学者通过生烃热模拟实验探讨不同类型页岩热演化过程中页岩油气形成规律。实验结果表明,页岩中甲烷的最大产率来自干酪根的降解气和原油裂解气,甚至两者在形成时间和对页岩气的贡献上形成接力成气过程^[47]。滞留在页岩层系的液态石油在高一过成熟阶段发生裂解,是高一过成熟页岩气规模生成和成藏的主力气源母质^[47-48]。尤其是处于高一过成熟阶段 I 型和 II 型干酪根,滞留液态烃生成的热裂解气量是干酪根降解气和原油裂解气的 2 倍^[47]。部分学者认为,页岩在排烃后仍存在大量可溶沥青,这部分可溶沥青可能与干酪根和不可溶沥青相互作用,成为高一过成熟阶段主要的页岩生气源^[48]。因此,页岩气是晚期干酪根裂解、滞留液态烃裂解等的混合天然气,其产烃速率和产物类型的占比等还受到黏土矿物类型、黏土—有机黏土复合体、实验升温速率及放射性无机矿物等因素的影响^[49]。

研究区侏罗系东岳庙段页岩地层整体达到成熟—高成熟热演化阶段,实测的镜质体反射率为 1.4%~1.7%,处于凝析油—湿气生成阶段,这也是该套页岩较海相五峰组—龙马溪组过成熟页岩(R_o 为 2.0%~3.0%,处于生干气阶段)含气量差的重要原因之一。研究区典型井的模拟结果显示,侏罗系东岳庙段页岩在中侏罗世之前的生物气生成阶段后,主要有两个生烃高峰。第 1 个生烃高峰出现在侏罗纪末期(距今 160 Ma),此时地层的温度和埋藏深度较大,页岩进入生油高峰,并形成了一定量天然气,该阶段以持续时间长和生烃速率较快为特征。第 2 个高峰在白垩纪中期(距今 115 Ma),此时地层持续快速深埋,地层温度进一步增加,有机质热演化达到高成熟阶段,以生成凝析油和湿气为主,该阶段生烃强度较低,但持续时间更短。

尽管侏罗系东岳庙段页岩经历了持续深埋和多期生烃过程,在白垩纪中期达到最大古埋藏深度后,早期形成的页岩气不断调整甚至被破坏。特别是燕山运动末期和喜山期,地层经历了 3 次(快—慢—快)抬升剥蚀过程,地层温度和热流值逐渐降低,东岳庙段页岩的生烃过程停止(图 4、6)。从白垩纪中期至今的漫长地质历史期间,侏罗系页岩地层未再生产或补充天然气,早期形成的页岩气遭受了持续的

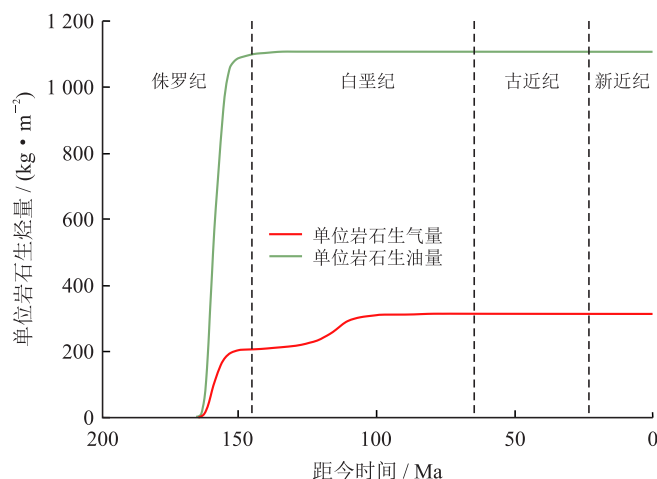


图 6 XY-1 井东岳庙段单位质量页岩生烃量演化史图

调整与破坏,这不利于侏罗系页岩油气的聚集与成藏。据此可知,燕山期的最大古埋藏深度控制了侏罗系东岳庙段页岩的总生烃量和页岩油气资源潜力,而晚燕山—喜马拉雅期的多期次抬升过程及其抬升剥蚀厚度幅度则是影响现今页岩油气量差异的关键因素之一。因此,复兴地区不同构造部位的埋藏史、热史和生烃史对页岩层系的油气生排滞量产生影响,并控制了现今页岩油气的含量及其差异;尤其是抬升剥蚀厚度相对较小、保持条件相对较好的地区应是页岩油气滞留量较高的区域,值得重点关注。

5.2 东岳庙段页岩孔隙形成与演化

作为源储一体型资源,页岩油气孔隙(尤其是有机孔)的形成与演化与有机质热演化过程密切相关^[3,50]。随着有机质进入成熟阶段,干酪根的降解及生排烃过程形成了大量纳米尺度的有机孔隙,但对不同演化阶段的有机孔隙形成的演化规律,不同学者的看法尚不统一。Pommer 等^[51]对 Eagle Ford 页岩研究发现,当 R_o 值在 1.2% 左右时,页岩开始形成大量纳米尺度有机质孔隙;部分学者认为页岩孔隙形成具有显著的多阶段性特征,在成熟生油阶段以前,压实作用、液态烃和固体沥青的形成是页岩孔隙度降低的主要原因;当页岩进入二次裂解阶段($R_o > 1.2\%$),有机孔大量形成,而当有机质达到过成熟阶段,上覆地层的压实作用会进一步导致孔隙度缓慢降低。基于前人对页岩孔隙演化模式的认识,结合复兴地区侏罗系东岳庙段页岩的埋藏史、热演化史、生烃史以及现今的地球化学特征,建立了侏罗系东岳庙段页岩的孔隙演化模型(图 7)。

从图中可以看出,研究区侏罗系东岳庙段页岩的孔隙演化过程可划分为 4 个主要阶段:

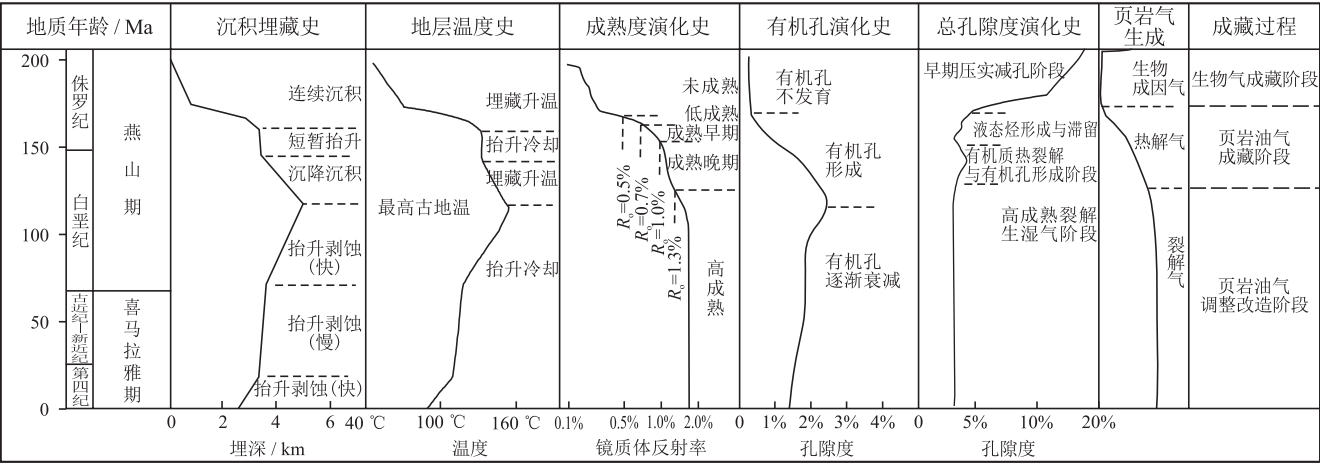


图 7 侏罗系页岩孔隙演化与成藏过程模式图

第一阶段（早期压实减孔阶段）：在该阶段页岩埋藏深度较浅，地层温度低，页岩孔隙度受上覆地层的压实作用和胶结作用等影响，页岩颗粒间压实迅速且孔隙流体被大量排出，页岩大量原生孔隙空间被破坏或充填，基质孔隙度迅速降低，此时页岩孔隙主要以无机矿物孔隙为主，属于残留的原生孔隙。随着压实作用的减弱，孔隙整体逐渐降低，但速率减缓。该阶段大孔和中孔迅速减少，而微孔变化不明显或小幅增加，可能是部分大孔或中孔转化为微孔。

第二阶段（液态烃形成与滞留堵孔阶段）：随着埋藏深度和温度增加，页岩有机质热演化程度开始增强并进入生油窗，在有机质干酪根生烃作用的影响下，页岩有机质开始形成液态烃并滞留在残留原生孔隙，造成孔隙快速降低。特别是在生烃高峰阶段，页岩形成了大量的液态烃原位滞留，堵塞页岩孔隙，同时也使得页岩含油饱和度显著增高。同时，在该阶段黏土矿物间会发生转化，蒙脱石向伊利石转化过程中会脱去层间水和结构水，导致矿物晶格发生塌陷，黏土矿物出现一定程度的收缩，形成与黏土矿物有关的微纳米孔隙，这些孔隙在研究区侏罗系东岳庙段页岩中较为常见，这也与该套页岩富含黏土矿物有关^[7]。随着黏土矿物转化程度增强，东岳庙段页岩会形成一些基质孔隙和页理缝。对比黑色富有机质页岩、含介壳有机质页岩以及介壳灰岩等不同岩相页岩会发现，除了介壳灰岩相的黏土矿物的收缩缝相对不发育，其他岩相均可以观察到少量黏土矿物相关的微裂缝。此外，随着有机酸的形成，页岩孔隙中流体介质条件发生的变化，有机酸与部分不稳定矿物发生反应，促使长石和灰质矿物发生不同程度溶解形成少量次生溶蚀孔隙。部分矿物在蚀变过程中（例如长石向绿泥石蚀变），会形成沿着黏土矿

物解理方向的狭缝形孔隙，长度可以达到数微米。

第三阶段（有机质热裂解与有机孔形成阶段）：在有机质热演化程度增强并大量生排烃，此时页岩的孔隙度快速增加，表明随着液态烃的排出，有机质孔隙体积减小，同时大量的微纳米级有机质孔隙开始形成，此时的孔隙度增加主要与有机孔的形成有关。

第四阶段（热裂解生湿气阶段）：在高成熟阶段（镜质体反射率约为 1.7%），热裂解生湿气后期则以滞留油裂解生气为主，页岩中有机质的二次裂解形成大量气态烃，伴随大量气泡状有机孔的出现，有机孔的占比呈现上升趋势，而与黏土矿物相关的无机孔隙则进一步缓慢降低。研究区侏罗系东岳庙段页岩有机质（主要为固体沥青）与黏土往往混杂堆积形成有机黏土复合体^[7,24]，有机黏土复合体可见大量不规则、椭圆形或蜂窝状孔隙（图 8），成为东岳庙段页岩重要储集空间，对页岩油气的富集起到了重要贡献。

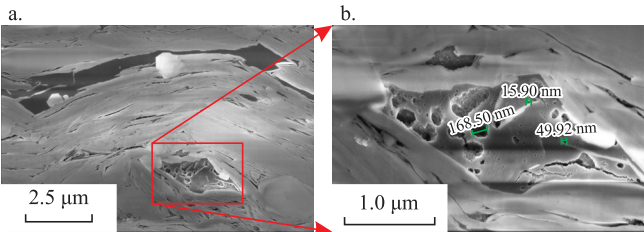


图 8 FY-10 井东岳庙段页岩有机黏土复合体 SEM 图

5.3 东岳庙段页岩油气成藏富集过程

根据上述侏罗系页岩的孔隙演化模型，结合页岩“三史”模拟结果和现今页岩地质基本特征，研究区侏罗系东岳庙段的成藏富集过程可划分为以下 3 个阶段。

5.3.1 早期浅埋藏生物气成藏阶段

在侏罗纪时期,研究区整体处于浅湖一半深湖沉积环境,东岳庙段下部沉积时期,湖盆处于扩张体系早期,气候偏干旱、水体盐度高、水平面相对较低,有机质在页岩中得到良好保存,形成富有机质的页岩层段^[10]。在东岳庙段上部沉积时期,随着大量淡水注入使得湖平面上升,形成半深湖环境,气候趋于潮湿、水体盐度降低,导致有机质含量显著减少。这些富有机质的页岩不仅是侏罗系东岳庙段成烃的物质基础,也是页岩油气的重要储集体。至侏罗纪中期,研究区东岳庙段页岩的埋藏深度不超过 2 000 m (对应的镜质体反射率小于 0.5%),低温条件下的厌氧微生物的生物化学作用使得部分有机质发生选择性分解并形成少量的生物成因气,但受漫长地质历史的改造影响,这部分气体储集遭到破坏。

5.3.2 页岩油气成藏阶段

从侏罗纪中期开始,研究区东岳庙段底部页岩的埋藏深度超过 2 000 m,地层温度约为 100 ℃,此时页岩开始进入生烃门限。在温度、时间和黏土矿物转化等多重因素的影响下,有机质干酪根发生结构变化,开始形成大量液态烃和气体烃,并逐渐出现第一个生烃高峰。此时,液态烃可能堵塞孔隙喉道,天然气则主要以吸附态形式赋存在页岩有机质、黏土等矿物表面。随着埋藏深度进一步增加直至最大埋藏深度,页岩生烃量持续上升,天然气含量的大量增加导致部分天然气向外运移,直至整套页岩普遍含气。同时,生烃作用可能产生微裂隙,使天然气以吸附态和游离态的形式存于原生或次生孔隙及裂缝中。如果部分运移的油气进入有效的圈闭并得以保存,则可能形成常规气藏。

5.3.3 页岩油气调整改造阶段

侏罗纪页岩在中白垩世达到最大埋藏深度后,东岳庙段页岩的成熟度达到 1.7% 左右。随后,受燕山末期和喜山运动影响,研究区普遍遭受了多期次的抬升剥蚀(累计剥蚀厚度约 2 400 ~ 2 900 m),使得东岳庙段页岩地层温度和热流值逐渐降低,页岩的生烃作用停止。在抬升改造过程中,早期形成的油气发生了二次运移和调整,特别是喜山期的构造活动显著影响了页岩气的保存条件,部分页岩气运移至浅层甚至遭到破坏散失。此外,多期次的抬升剥蚀作用改变了地层的温压环境和页岩的孔隙特征,可能导致页岩孔隙结构发生弹性回弹,改变气体在孔隙系统中的赋存状态,主要表现为游离气与吸附

气之间的相互转化。在页岩封盖条件不变的情况下,游离气与吸附气之间的转化主要受不同深度范围内温度和压力的影响。因此,现今研究区的侏罗系东岳庙段页岩油气是在侏罗纪末期至白垩纪形成后,经历燕山末期和喜马拉雅期的大规模、多期次抬升剥蚀的综合效应,当前的构造特征和封盖条件对页岩油气的保存起着重要的控制作用。

6 结论

1) 侏罗系东岳庙段页岩油气的生成呈现阶段性,在侏罗纪中期进入生烃门限,共有两个生烃高峰,分别出现在侏罗纪末期和白垩纪中期,第 1 个高峰以生油为主,持续时间长、生烃速率较快为特征;第 2 个高峰以生成凝析油和湿气为主,具有生烃强度较低,持续时间短的特征。在白垩纪中期埋藏深度达到最大值约为 5 500 m,随后受燕山运动和喜马拉雅运动的影响,地层温度和热流值逐渐降低,东岳庙段页岩的生烃过程停止。研究区东岳庙段页岩平均累计生油强度为 9.5×10^8 t/km²,平均累计生气强度为 2.5×10^8 m³/km²。

2) 侏罗系东岳庙段页岩孔隙的演化可划分为 4 个阶段:早期压实减孔阶段、液态烃滞留堵孔阶段、热裂解有机孔形成阶段和热裂解生湿气阶段。其中,压实作用和液态烃滞留堵孔是导致页岩原生孔隙快速降低最主要原因,而有机质(主要为固体沥青)与黏土混杂堆积形成有机黏土复合体,是东岳庙段页岩最重要储集空间。

3) 侏罗系东岳庙段页岩油气成藏与富集过程可划分为 3 个阶段:早期浅埋藏生物气成藏阶段、页岩油气成藏阶段和页岩油气调整改造阶段。不同构造部位的埋藏史、热史和生烃史对页岩层系的油气生排滞量产生了影响,并控制了现今页岩油气的含量及其差异。相对较小的抬升剥蚀厚度和较好的保存条件的区域是页岩油气滞留量相对较高的区域,值得深入关注。

参 考 文 献

- [1] 秦建中,申宝剑,陶国亮,等. 优质烃源岩成烃生物与生烃能力动态评价[J]. 石油实验地质, 2014, 36(4): 465-472.
QIN Jianzhong, SHEN Baojian, TAO Guoliang, et al. Hydrocarbon-forming organisms and dynamic evaluation of hydrocarbon generation capacity in excellent source rocks[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(4): 465-472.

- [2] 缪九军, 吴小奇, 宋晓波, 等. 海相碳酸盐岩烃源岩有效性探讨——以川西坳陷中三叠统雷口坡组为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(2): 241-250.
- MIAO Jiujun, WU Xiaoqi, SONG Xiaobo, et al. Effectiveness of marine carbonate source rocks: A case study of Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(2): 241-250.
- [3] 罗文彬, 马中良, 郑伦举, 等. 海相页岩成岩—成烃过程中孔隙结构的演变——来自热模拟实验的启示[J]. 石油学报, 2020, 41(5): 540-552.
- LUO Wenbin, MA Zhongliang, ZHENG Lunju, et al. Evolution of pore structure during diagenesis and hydrocarbon generation of marine shale: The inspiration from thermal simulation experiments[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(5): 540-552.
- [4] YANG Rui, HAO Fang, HE Sheng, et al. Experimental investigations on the geometry and connectivity of pore space in organic-rich Wufeng and Longmaxi shales[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 84: 225-242.
- [5] YANG Rui, HU Qinhong, HE Sheng, et al. Wettability and connectivity of overmature shales in the Fuling gas field, Sichuan Basin (China)[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(3): 653-689.
- [6] 胡德高, 舒志国, 郭战峰, 等. 川东复兴地区侏罗系(涪页10HF井)发现国内首个页岩凝析气藏[J]. 中国地质, 2021, 48(6): 1980-1981.
- HU Degao, SHU Zhiguo, GUO Zhanfeng, et al. Discovery of the first shale condensate gas reservoir in Jurassic strata in the Fuxin area, eastern Sichuan[J]. Geology in China, 2021, 48(6): 1980-1981.
- [7] 舒志国, 周林, 李雄, 等. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 212-223.
- SHU Zhiguo, ZHOU Lin, LI Xiong, et al. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 212-223.
- [8] 舒志国, 舒逸, 陈绵琨, 等. 陆相页岩岩相非均质性及储层孔隙发育特征: 以四川盆地自流井组东岳庙段页岩为例[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 1-15.
- SHU Zhiguo, SHU Yi, CHEN Miankun, et al. Lithofacies heterogeneity and reservoir pore development characteristics of continental shale: A case study of the Dongyuemiao shale of the Ziliujing Formation in the Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 1-15.
- [9] 张宇, 赵培荣, 刘士林, 等. 中国石化“十四五”主要勘探进展与发展战略[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(1): 14-31.
- ZHANG Yu, ZHAO Peirong, LIU Shilin, et al. Main exploration progress and development strategy of Sinopec during the 14th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(1): 14-31.
- [10] 王必金, 鲜本忠, 彭伟, 等. 天文旋回约束下的页岩岩相分布与有机质富集——以四川盆地复兴地区东岳庙段为例[J/OL]. 沉积学报: 1-14. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.120>.
- WANG Bijin, XIAN Benzong, PENG Wei, et al. Lithofacies distribution and organic matter enrichment of shale under the constraint of astronomical cycles: A case study of the Dongyuemiao member in the Fuxing area, Sichuan Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-14. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.120>.
- [11] 何文渊, 白雪峰, 蒙启安, 等. 四川盆地陆相页岩油成藏地质特征与重大发现[J]. 石油学报, 2022, 43(7): 885-898.
- HE Wenyan, BAI Xuefeng, MENG Qi'an, et al. Accumulation geological characteristics and major discoveries of lacustrine shale oil in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(7): 885-898.
- [12] 胡宗全, 刘忠宝, 李倩文, 等. 基于变尺度岩相组合的陆相页岩源—储耦合机理探讨——以四川盆地侏罗系页岩层段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 893-909.
- HU Zongquan, LIU Zhongbao, LI Qianwen, et al. Exploring source rock—reservoir coupling mechanisms in lacustrine shales based on varying-scale lithofacies assemblages: A case study of the Jurassic shale intervals in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 893-909.
- [13] 何江林, 陈正辉, 董大忠, 等. 川东地区东岳庙段沉积环境演化及其页岩油气富集主控因素分析[J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(3): 385-397.
- HE Jianglin, CHEN Zhenghui, DONG Dazhong, et al. The evolution of sedimentary environments of Dongyuemiao Member and key factors for enrichment of shale oil and gas, northeastern Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(3): 385-397.
- [14] 舒逸, 郑有恒, 包汉勇, 等. 四川盆地复兴地区下侏罗统页岩油气富集高产主控因素[J]. 世界石油工业, 2023, 30(5): 26-38.
- SHU Yi, ZHENG Youheng, BAO Hanyong, et al. Main controlling factors for high yield and enrichment of shale oil and gas in the Lower Jurassic in the Fuxing area of Sichuan Basin[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(5): 26-38.
- [15] 戴海亮, 沈斌, 李开开, 等. 地质条件约束下川北二叠系大隆组富有机质页岩热模拟生烃过程及特征研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, 56(3): 382-392.
- DAI Hailiang, SHEN Bin, LI Kaikai, et al. Characteristics and hydrocarbon-generating process of the organic-rich shale of Permian Dalong Formation in North Sichuan: Pyrolysis experiments with geological constraint[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2020, 56(3): 382-392.
- [16] 马中良, 郑伦举, 徐旭辉, 等. 富有机质页岩有机孔隙形成与演化的热模拟实验[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 23-30.
- MA Zhongliang, ZHENG Lunju, XU Xuhui, et al. Thermal simulation experiment on the formation and evolution of organic pores in organic-rich shale[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(1): 23-30.
- [17] 王宁, 李荣西, 王香增, 等. 海陆过渡相页岩气形成热模拟实验研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 189-197.
- WANG Ning, LI Rongxi, WANG Xiangzeng, et al. Pyrolytic

- study on the gas-generating process of transitional shale[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(1): 189-197.
- [18] 崔景伟, 朱如凯, 崔京钢. 页岩孔隙演化及其与残留烃量的关系: 来自地质过程约束下模拟实验的证据[J]. *地质学报*, 2013, 87(5): 730-736.
- CUI Jingwei, ZHU Rukai, CUI Jinggang. Relationship of porous evolution and residual hydrocarbon: Evidence from modeling experiment with geological constrains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(5): 730-736.
- [19] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 湖相页岩油气富集主控因素与勘探潜力——以四川盆地涪陵地区侏罗系为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 113-120.
- HU Dongfeng, WEI Zhihong, LIU Ruobing, et al. Enrichment control factors and exploration potential of lacustrine shale oil and gas: A case study of Jurassic in the Fuling area of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 113-120.
- [20] 刘超, 包汉勇, 梁榜, 等. 鄂西渝东地区东岳庙段沉积及储层特征[C]//2015 全国沉积学大会论文集. 武汉: 中国地质学会, 2015: 304-305.
- LIU Chao, BAO Hanyong, LIANG Bang, et al. Sedimentary and reservoir characteristics of Dongyuemiao member, West Hubei and East Chongqing area[C]//Proceedings of the 2015 National Congress on Sedimentology. Wuhan: Chinese Geological Society, 2015: 304-305.
- [21] 刘鑫, 邱楠生, 冯乾乾, 等. 碳酸盐岩团簇同位素约束下的川东地区二叠系热演化[J]. *地质学报*, 2023, 97(8): 2676-2689.
- LIU Xin, QIU Nansheng, FENG Qianqian, et al. Thermal evolution of the Permian in the eastern Sichuan Basin under the constraint of carbonate clumped isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2676-2689.
- [22] 魏志红, 刘若冰, 魏祥峰, 等. 四川盆地复兴地区陆相页岩油气勘探评价与认识[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(1): 111-119.
- WEI Zhihong, LIU Ruobing, WEI Xiangfeng, et al. Exploration evaluation and recognition of continental shale oil and gas in Fuxing area, Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 111-119.
- [23] 申宝剑, 秦建中, 冯丹, 等. 烃源岩有机碳含量与生排油效率动态评价[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(4): 505-510.
- SHEN Baojian, QIN Jianzhong, FENG Dan, et al. Dynamic assessment of organic carbon content and hydrocarbon generation and expulsion efficiency in source rocks[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(4): 505-510.
- [24] 刘忠宝, 胡宗全, 刘光祥, 等. 高成熟陆相页岩油气源—储特征及富集层段评价方法——以川东复兴地区侏罗系东岳庙段为例[J]. *天然气工业*, 2022, 42(10): 11-24.
- LIU Zhongbao, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Source-reservoir features and favorable enrichment interval evaluation methods of high mature continental shale: A case study of the Jurassic Dongyuemiao member in the Fuxing area, eastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(10): 11-24.
- [25] 张谦, 金之钧, 朱如凯, 等. 岩石热解方法应用于页岩油气研究需注意的几个问题[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 1020-1032.
- ZHANG Qian, JIN Zhijun, ZHU Rukai, et al. Remarkable issues of rock-eval pyrolysis in the assessment of shale oil/gas[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 1020-1032.
- [26] 秦建中, 王杰, 邱楠生, 等. 反演南方海相层系热史动态演化的新温标——磷灰石、锆石 (U-Th)/He 年龄和封闭温度[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 277-287.
- QIN Jianzhong, WANG Jie, QIU Nansheng, et al. New paleo-geothermometers for the inversion of dynamic thermal evolution history of marine sequences in South China—(U-Th)/He age and closure temperature of apatite and zircon[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 277-287.
- [27] 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等. 湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形: 来自裂变径迹和平衡剖面的证据[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, 35(2): 161-174.
- MEI Lianfu, LIU Zhaoqian, TANG Jiguang, et al. Mesozoic intra-continental progressive deformation in western Hunan—Hubei—eastern Sichuan provinces of China: Evidence from apatite fission track and balanced cross-section[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(2): 161-174.
- [28] 罗启后, 王世谦. 四川盆地中西部三叠系重点含气层系天然气富集条件研究[J]. *天然气工业*, 1996, 16(增刊 1): 40-54.
- LUO Qihou, WANG Shiqian. Research on natural gas enrichment conditions of the main coal-bearing strata of Triassic in the central-west part of Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 1996, 16(S1): 40-54.
- [29] 陈义才, 蒋裕强, 郭贵安, 等. 川中地区上三叠统香溪群烃源岩热演化史模拟[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(2): 57-60.
- CHEN Yicai, JIANG Yuqiang, GUO Gui'an, et al. Simulation of the source rock thermal evolution history of Xiangxi group of Upper Triassic in central Sichuan area[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(2): 57-60.
- [30] 朱传庆, 徐明, 单竞男, 等. 利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1268-1277.
- ZHU Chuanqing, XU Ming, SHAN Jingnan, et al. Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan Basin: Constrained by the paleothermal records[J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1268-1277.
- [31] 张建坤, 何生, 易积正, 等. 岩石热声发射和盆模技术研究中扬子区西部下古生界海相页岩最高古地温和热成熟史[J]. *石油学报*, 2014, 35(1): 58-67.
- ZHANG Jiankun, HE Sheng, YI Jizheng, et al. Rock thermo-acoustic emission and basin modeling technologies applied to the study of maximum paleotemperatures and thermal maturity histories of Lower Paleozoic marine shales in the western middle Yangtze area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(1): 58-67.
- [32] 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4): 1052-1060.
- XU Ming, ZHU Chuanqing, TIAN Yuntao, et al. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature

- in the Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 1052-1060.
- [33] 王平, 刘少峰, 郜瑯琨, 等. 川东弧形带三维构造扩展的 AFT 记录[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1662-1673.
WANG Ping, LIU Shaofeng, GAO Tangjun, et al. Cretaceous transportation of eastern Sichuan arcuate fold belt in three dimensions: Insights from AFT analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(5): 1662-1673.
- [34] 李双建, 肖开华, 汪新伟, 等. 南方志留系碎屑矿物热年代学分析及其地质意义[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1068-1076.
LI Shuangjian, XIAO Kaihua, WANG Xinwei, et al. Thermochronology of detrital minerals in the Silurian strata from southern China and its geological implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1068-1076.
- [35] 胡圣标, 张容燕, 周礼成. 油气盆地地热史恢复方法[J]. 勘探家, 1998, 3(4): 52-54.
HU Shengbiao, ZHANG Rongyan, ZHOU Licheng. Reconstruction of geothermal history in hydrocarbon basins[J]. Petroleum Explorationist, 1998, 3(4): 52-54.
- [36] SUGGATE R P. Relations between depth of burial, vitrinite reflectance and geothermal gradient[J]. Journal of Petroleum Geology, 1998, 21(1): 5-32.
- [37] LERCHE I, YARZAB R F, KENDALL C G S C. Determination of paleoheat flux from vitrinite reflectance data[J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(11): 1704-1717.
- [38] 邓宾, 刘树根, 刘顺, 等. 四川盆地地表剥蚀量恢复及其意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 675-686.
DENG Bin, LIU Shugen, LIU Shun, et al. Restoration of exhumation thickness and its significance in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 675-686.
- [39] 胡圣标, 何丽娟, 朱传庆, 等. 海相盆地地热史恢复方法体系[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 607-613.
HU Shengbiao, HE Lijuan, ZHU Chuanqing, et al. Method system of thermal reconstruction for marine basins[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(5): 607-613.
- [40] 饶松, 胡迪, 胡圣标, 等. 叠合盆地深层构造—热演化研究方法: 以四川盆地为例[J]. 地质科学, 2019, 54(1): 159-175.
RAO Song, HU Di, HU Shengbiao, et al. Tectono-thermal reconstruction methods for deep zone in superimposed basins: A case study from Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(1): 159-175.
- [41] 卢庆治, 马永生, 郭彤楼, 等. 鄂西—渝东地区热史恢复及烃源岩成烃史[J]. 地质科学, 2007, 42(1): 189-198.
LU Qingzhi, MA Yongsheng, GUO Tonglou, et al. Thermal history and hydrocarbon generation history in western Hubei—eastern Chongqing area[J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(1): 189-198.
- [42] JIANG Qiang, QIU Nansheng, ZHU Chuanqing. Heat flow study of the Emeishan large igneous province region: Implications for the geodynamics of the Emeishan mantle plume[J]. Tectonophysics, 2018, 724/725: 11-27.
- [43] 饶松, 杨轶南, 胡圣标, 等. 川西南地区下寒武统筇竹寺组页岩热演化史及页岩气成藏意义[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 4319-4335.
RAO Song, YANG Yinan, HU Shengbiao, et al. Thermal evolution history and shale gas accumulation significance of Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Southwest Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2022, 47(11): 4319-4335.
- [44] 田云涛, 朱传庆, 徐明, 等. 晚白垩世以来川东北地区的剥蚀历史——多类低温热年代学数据综合剖面的制约[J]. 地球物理学报, 2011, 54(3): 807-816.
TIAN Yuntao, ZHU Chuanqing, XU Ming, et al. Post-Early Cretaceous denudation history of the northeastern Sichuan Basin: Constraints from low-temperature thermochronology profiles[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(3): 807-816.
- [45] 蒋启贵, 王延斌, 秦建中, 等. 中国南方海相烃源岩生烃过程动力学研究[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 174-180.
JIANG Qigui, WANG Yanbin, QIN Jianzhong, et al. Kinetics of the hydrocarbon generation process of marine source rocks in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 174-180.
- [46] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [47] 赵文智, 王兆云, 张水昌, 等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(2): 1-7.
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, ZHANG Shuichang, et al. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1-7.
- [48] 张莉, 熊永强, 陈媛, 等. 中国典型海相富有机质页岩的生气机理[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1092-1106.
ZHANG Li, XIONG Yongqiang, CHEN Yuan, et al. Mechanisms of shale gas generation from typically organic-rich marine shales[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1092-1106.
- [49] YANG Shengyu, HORSFIELD B. Some predicted effects of minerals on the generation of petroleum in nature[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(8): 6677-6687.
- [50] 卢龙飞, 刘伟新, 魏志红, 等. 四川盆地志留系页岩成岩特征及其对孔隙发育与保存的控制[J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 73-87.
LU Longfei, LIU Weixin, WEI Zhihong, et al. Diagenesis of the Silurian shale, Sichuan Basin: Focus on pore development and preservation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(1): 73-87.
- [51] POMMER M, MILLIKEN K. Pore types and pore-size distributions across thermal maturity, Eagle Ford Formation, southern Texas[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(9): 1713-1744.

(修改回稿日期 2024-10-18 编辑 韩建)



本文互动