

李林致, 郭刚, 廖计华, 等. 丽水-椒江凹陷月桂峰组湖相烃源岩的主控因素与分布预测[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(4): 9-17.

LI Linzhi, GUO Gang, LIAO Jihua, et al. Main constraining factors and distribution prediction of lacustrine hydrocarbon source rocks in Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(4): 9-17.

# 丽水-椒江凹陷月桂峰组湖相烃源岩的 主控因素与分布预测

李林致, 郭刚, 廖计华, 王欣, 李婧婧, 吴斌, 张晓庆

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

**摘要:**月桂峰组是丽水-椒江凹陷的主力烃源岩层系。丽水-椒江凹陷在月桂峰组沉积时期为强断陷期, 构造分割性强, 沉积环境相对封闭, 内部多个次洼的湖相烃源岩发育特征不清。为明确丽水-椒江凹陷内各富烃次洼中月桂峰组烃源岩发育条件及空间展布规律, 进一步指导该区的油气勘探, 利用钻井、岩芯、地球物理、地球化学及古生物等资料, 基于湖盆演化动态全生命周期过程, 提出“早期断层活动速率、中期母岩性质和遮挡条件、晚期火山活动”联合控制丽水-椒江凹陷 4 个次洼优质烃源岩的发育。在地质认识约束下, 基于多属性神经网络深度学习, 对中-深湖相烃源岩的空间展布进行了定量刻画。结合优质烃源岩的发育机制和中-深湖相烃源岩分布范围, 对 4 个主要次洼内烃源岩的发育情况进行综合评价。结果表明, 椒江 A 洼为 I 类富烃次洼, 丽水 A 洼和丽水 C 洼为 II 类富烃次洼, 丽水 B 洼为 III 类生烃次洼。

**关键词:**丽水-椒江凹陷; 月桂峰组; 烃源岩; 控制因素; 综合评价

中图分类号: P744.4; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.056

## 0 引言

丽水-椒江凹陷是东海陆架盆地勘探开发的一个重要地区, 自 20 世纪 70 年代初开始油气勘探以来, 丽水-椒江凹陷已钻数十口探井, 仅发现 1 个小型气田, 尤其是近年来多口探井钻探失利, 致使丽水-椒江凹陷油气勘探陷入困境<sup>[1]</sup>。一个凹陷能否成为富烃凹陷, 其核心问题在于是否发育优质烃源岩<sup>[2]</sup>。因此, 如何深入开展丽水-椒江凹陷优质烃源岩的研究与评价是尽快实现该区油气突破的关键。受构造演化和沉积充填的影响, 丽水-椒江凹陷共发育 3 套烃源岩, 分别为古新统月桂峰组湖相烃源岩、灵峰组陆源海相烃源岩和明月峰组陆源海相及煤系烃源岩。其中, 月桂峰组是丽水-椒江凹陷的主力

烃源岩层系<sup>[3-5]</sup>。然而, 月桂峰组沉积期盆地具有很强的分割性, 呈现“多隆多洼”特征, 内部多个次洼的湖相烃源岩发育特征不清。明确丽水-椒江凹陷内各生烃次洼中月桂峰组烃源岩的发育条件及空间展布规律, 对该区资源潜力的评价和勘探方向的优选影响极大。

前人虽然对丽水-椒江凹陷月桂峰组进行过一些构造-沉积样式、油气源对比、生排烃史等研究, 但均是针对整个凹陷乃至盆地进行整体研究, 尚缺乏对丽水-椒江凹陷内不同富烃次洼中优质烃源岩发育的内在地质因素和空间展布的精细对比与研究。本文利用钻井、岩芯、地球物理、地球化学及古生物等资料, 分析了丽水-椒江凹陷优质烃源岩发育的主控因素, 并对不同次洼的烃源岩发育条件进行比选。同时, 在地质认识约束下, 基于多属性神经网络深度学习, 对优质烃源岩的空间展布进行了定量刻画, 以期为该地区油气勘探实践提供参考。

## 1 区域地质背景

丽水-椒江凹陷位于中国东海陆架盆地西南部,

收稿日期: 2023-03-09

资助项目: 国家科技重大专项“中国近海富烃凹陷优选与有利勘探方向预测”(2016ZX05024-002)

第一作者: 李林致(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海域油气综合地质方面的研究工作。E-mail: lilzh18@cnoc.com.cn

西部紧邻闽浙隆起带,北部与钱塘凹陷相接,东南以雁荡低凸起为界与福州凹陷相隔<sup>[6]</sup>,总面积约17 000 km<sup>2</sup>,呈NE—SW向展布,是在中生代残留盆地基础上拉张断裂形成的新生代“东断西超”半地堑凹陷<sup>[7]</sup>。自下而上发育上白垩统石门潭组,古新

统月桂峰组、灵峰组、明月峰组,始新统瓯江组、温州组、平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组、柳浪组,上新统三潭组和第四系东海群(图1)。其中,古新世沉积的月桂峰组、灵峰组和明月峰组是丽水-椒江凹陷的主要勘探目的层<sup>[7]</sup>。

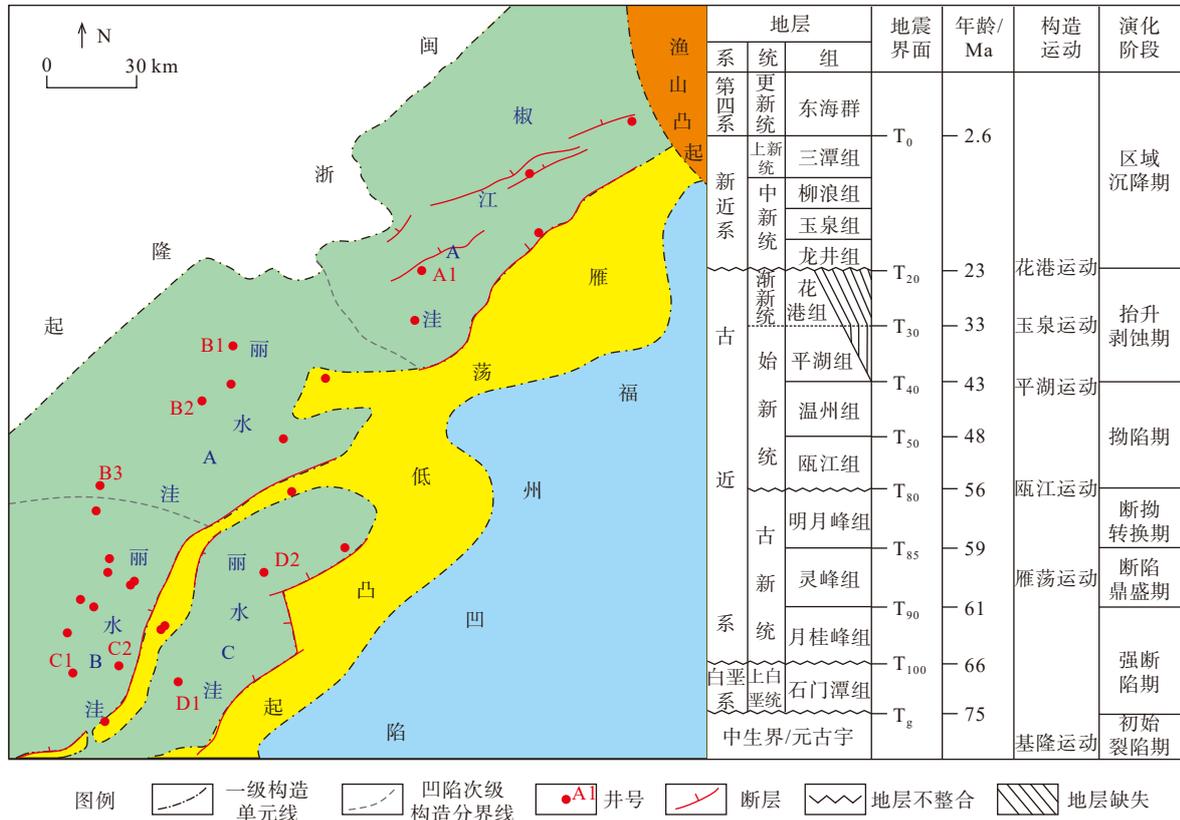


图1 丽水-椒江凹陷区域位置及地层柱状图

Fig.1 Location and stratigraphic histogram of Lishui-Jiaojiang Sag

受区域构造活动的影响,丽水-椒江凹陷自晚白垩世以来主要经历了早期断陷、中期埋藏、晚期抬升剥蚀3个构造演化阶段。其中,早期断陷阶段主要发生在古新世,又进一步分为强断陷、断陷鼎盛、断拗转换3个时期。月桂峰组沉积期为强烈断陷期,凹陷呈多米诺式半地堑结构,主要发育湖泊沉积环境,以大套暗色泥岩、灰色粉砂岩夹细砂岩为主,凹陷内最大厚度达3 km,为主力烃源层段。该时期由于海水尚未侵入,凹陷被内部凸起强烈分割,形成了互不连通的椒江A洼、丽水A洼、丽水B洼和丽水C洼(图1)。灵峰组沉积期为断陷鼎盛期,控洼断裂强烈活动并伴生大量次级断层,洼陷快速沉降,凹陷内最大厚度达3.6 km,受区域海侵的影响,主要呈局限浅海沉积环境,是次要烃源层段。明月峰组沉积期为断拗转换期,断层控制作用减弱,地层披覆沉积于低凸起之上,为局限浅海-三角洲沉

积环境。明月峰组烃源岩现今R<sub>0</sub>主体<0.7%,处于未熟—低熟演化阶段,生烃潜力有限。

## 2 月桂峰组烃源岩发育特征

### 2.1 烃源岩沉积特征

丽水-椒江凹陷目前共有8口井钻揭月桂峰组,其中,椒江A洼1口、丽水A洼3口、丽水B洼3口和丽水C洼1口。钻井在椒江A洼和丽水C洼主要钻遇深灰色泥岩,泥岩厚度为212.2~262 m,泥地比为72%~82%,为相对封闭的中-深湖相沉积环境。钻井在丽水A洼和丽水B洼主要钻遇黄色粉细砂岩和灰色泥岩,泥岩厚度为19.5~264 m,泥地比为9%~70%,为三角洲前缘和滨浅湖沉积相带(图2)。

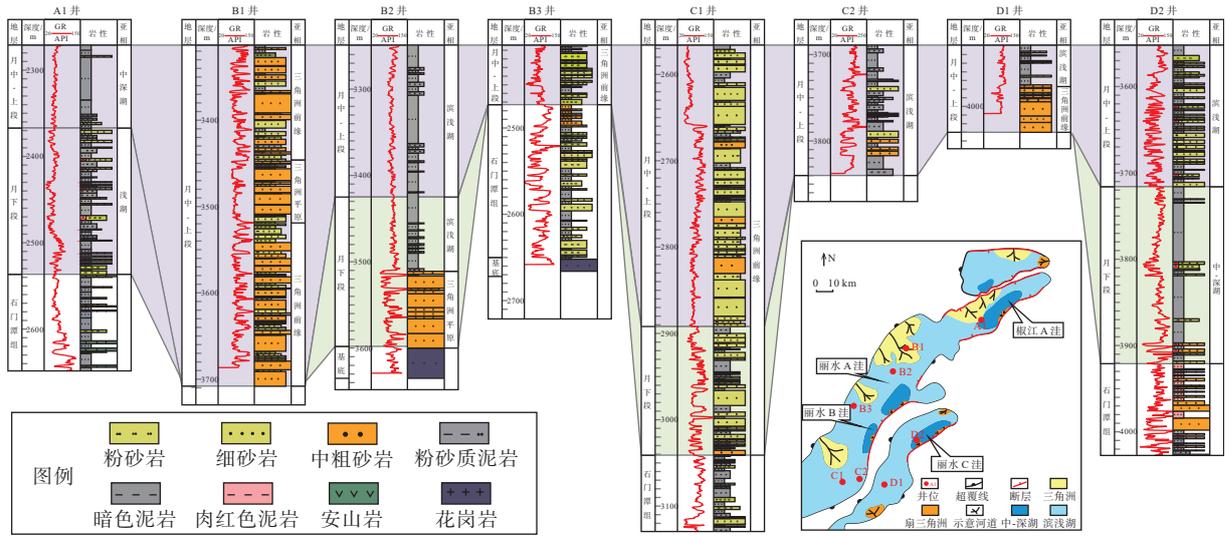


图 2 丽水-椒江凹陷月桂峰组已钻井连井对比

Fig.2 Comparison among multiple wells in the Yueguifeng Formation of Lishui-Jiaojiang Sag

### 2.2 烃源岩地球化学特征

进一步对 4 个次洼的泥岩样品实测数据进行统计分析, 不同次洼的烃源岩发育特征也不尽相同 (图 3)。椒江 A 洼月桂峰组 50% 样品点 TOC 集中在 2.2%~2.7%, 有机质类型主要为 II<sub>1</sub>, 其中, A1 井显示出 4-甲基甾烷含量高、藻类含量高的特点, 干酪根碳同位素分布于-27.2‰~-23.9‰, 向上逐渐变重。丽水 A 洼月桂峰组 50% 样品点 TOC 主要集中在 0.8%~1.2%, 有机质类型主要为 II<sub>2</sub>-III 型, 其中, B2 井月桂峰组底部砂岩抽提物中 4-甲基甾烷含量明显高于上段泥岩, 显示其来自水生藻类贡

献更大、水体咸度更大的烃源岩, 干酪根碳同位素整体偏轻, 分布于-26.08‰~-26.04‰。丽水 B 洼月桂峰组 50% 样品点 TOC 主要集中在 0.7%~1.6%, 有机质类型主要为 II<sub>2</sub>-III 型, 其中, C2 井月桂峰组烃源岩显微组分及生物标志化合物特征显示, 随着地层加深, 水生藻类贡献有逐渐增大的趋势, 干酪根碳同位素分布于-26.7‰~-24.49‰, 自下而上呈波动分布。丽水 C 洼月桂峰组 50% 样品点 TOC 主要集中在 1.2%~2.2%, 有机质类型主要为 II<sub>2</sub>-III 型, 其中, D2 井月桂峰组显微组分显示腐泥组含量 >50%, 干酪根碳同位素分布于-27.8‰~-25.8‰, 向上逐渐变重。

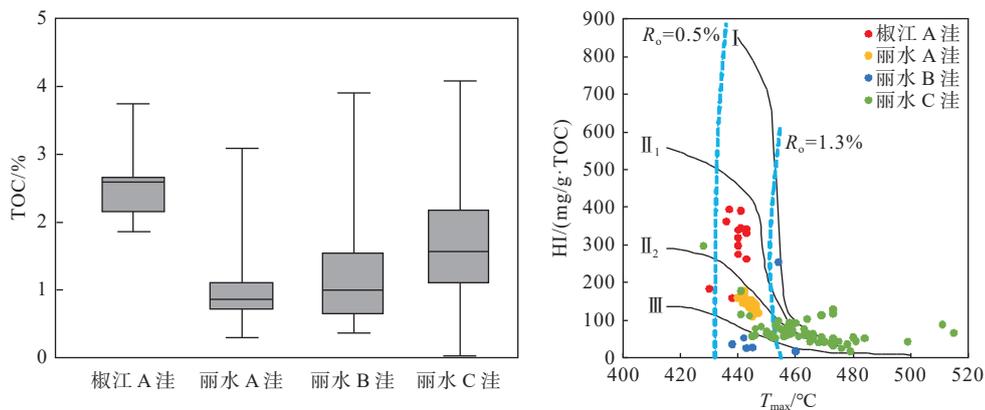


图 3 丽水-椒江凹陷月桂峰组烃源岩质量及类型

Fig.3 Quality and type of the source rock in Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag

基于沉积特征及地球化学数据认为, 椒江 A 洼和丽水 C 洼钻井证实了月桂峰组发育好-很好的中-深湖相烃源岩。而受井点位置约束, 丽水 A 和

丽水 B 洼在月桂峰组仅钻遇到三角洲和滨浅湖相, 但据地球化学数据推测, 其在洼陷深部也应发育中-深湖相烃源岩。

### 3 月桂峰组烃源岩发育控制因素

从前文丽水-椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育背景及地球化学特征可以看出,受钻遇井点位置的制约和不同地质环境的影响,4个次洼内月桂峰组湖相烃源岩发育特征不尽相同;因此,厘清湖相优质烃源岩形成的地质主控因素,对刻画不同次洼的烃源岩特征、指导油气勘探意义重大<sup>[8]</sup>。前人研究表明,沉积盆地烃源岩发育受到有机质富集与保存的双重影响,而二者又受到构造运动及断裂活动<sup>[9]</sup>、古沉积环境<sup>[10]</sup>、有机质来源<sup>[11-14]</sup>、火山活动等众多地质因素的共同控制。笔者由湖盆演化动态全生命周期过程出发,提出“早期断层活动速率、中期母岩性质和遮挡条件、晚期火山活动”“四元”联合控制丽水-椒江凹陷优质烃源岩的发育,并对4个端元

与4个不同次洼烃源岩丰度的关系开展定性-定量研究。

#### 3.1 早期断层活动速率对烃源岩的控制

凹陷的沉降速率的不同对烃源岩品质具有重要影响。高沉降速率有利于深水湖盆和还原条件的形成,促进有机质的聚集、保存以及快速掩埋,利于形成烃源岩发育层段。姜雪等<sup>[9]</sup>提出,在淡水-微咸水的环境下,沉降速率达到100 m/Ma时可发育好烃源岩。丽水-椒江凹陷在月桂峰组沉积时期为强烈断陷期,统计4个洼陷的控洼生长断层活动速率以代表沉降速率,显示沉降速率普遍>100 m/Ma,具备较好烃源岩发育的构造条件。但是平面上受区域断裂的控制,不同次洼内的断层活动速率也不尽相同,由大到小依次为丽水A洼、椒江A洼、丽水B洼和丽水C洼(图4)。

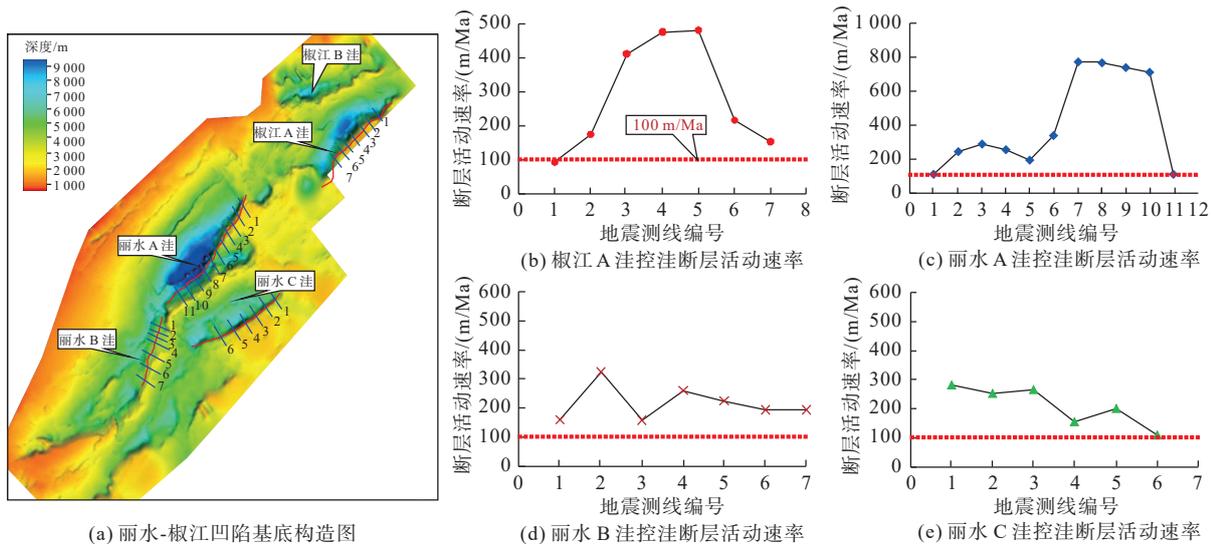


图4 丽水-椒江凹陷月桂峰组不同次凹沉降速率对比

Fig.4 Comparison in sedimentation rate in different sub-sags of the Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag

无定形有机质反映湖底水体的贫氧环境<sup>[15]</sup>。椒江A洼的A1井断层活动速率为100~500 m/Ma,无定形有机质含量为26%~56%,平均33.75%;而丽水C洼的D2井断层活动速率为100~300 m/Ma,无定形有机质含量为4%~50%,平均19.9%,揭示断层活动速率越大,可容空间越大,越有利于形成深湖环境,促进水体分层和有机质的保存。

#### 3.2 中期母岩性质对烃源岩的控制

湖泊古生产力是优质烃源岩形成的必要条件<sup>[16]</sup>。富营养水体是形成高生产力的基础,而湖泊中营养元素的组成和含量与河流流经物源区的母岩类型

密切相关<sup>[17-19]</sup>。

砂岩岩屑组分统计表明,丽水-椒江凹陷存在3大母岩区,丽水A洼由闽浙隆起北部变质岩母岩供源;丽水B洼由闽浙隆起南部喷出岩母岩供源;西南侧椒江A洼、丽水C洼由东北雁荡凸起酸性侵入岩母岩供源(图5)。基于地震资料,从3大母岩区到湖盆识别了多条古沟槽,地震剖面上呈复合“V”“U”型,往次洼延伸区域可见下切充填特征,这些古沟槽为营养物质的输入提供了良好通道。

从生物标志化合物特征来看,椒江A洼具有丰富的4-甲基甾烷,丽水B洼和丽水C洼具有丰富的C<sub>27</sub>规则甾烷,揭示藻类生源丰富;丽水A洼具

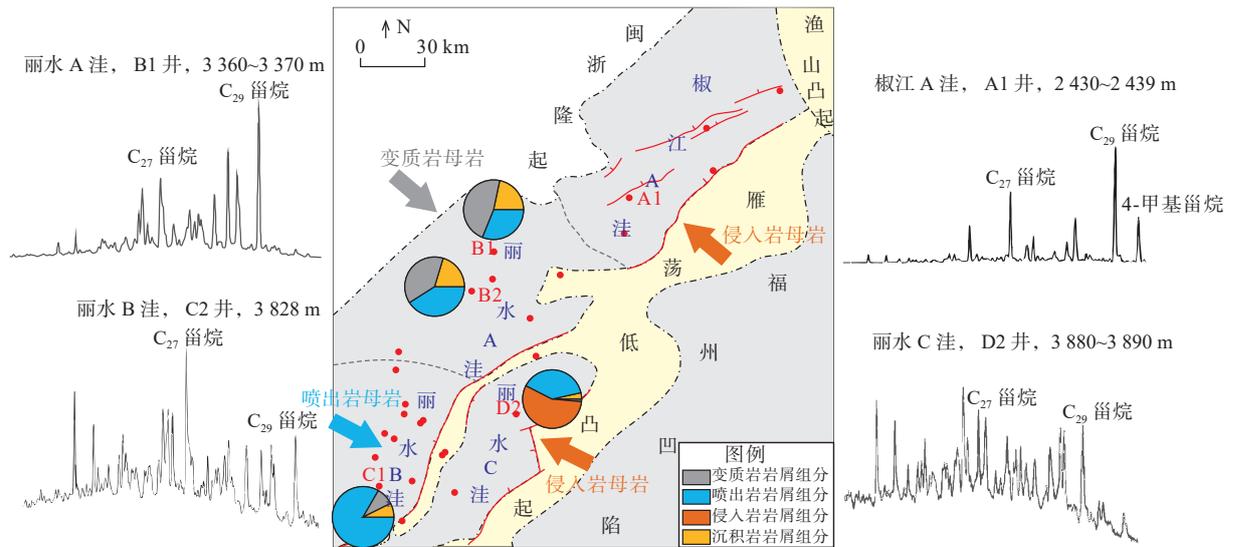


图 5 丽水-椒江凹陷古新统母岩性质及生标特征图

Fig.5 Property and biomarker characteristics of the Paleocene parent rocks in Lishui-Jiaojiang Sag

有丰富的 C<sub>29</sub> 规则甾烷, 揭示陆源有机质丰富(图 5)。椒江 A 洼和丽水 C 洼酸性侵入岩母岩以及丽水 B 洼喷出岩母岩均含有丰富的钠、镁、铝、硅、钙、锰、铁、磷、镍、钴等矿物质, 是生物生长的必要元素, 为藻类富集提供充分的营养<sup>[20]</sup>, 而丽水 A 洼变质岩母岩为湖盆提供的营养物较少, 造成藻类生源有限。

### 3.3 中期遮挡条件对烃源岩的控制

丽水-椒江凹陷月桂峰组沉积时期隆洼相间的构造格局造成沉积体系对外界碎屑物源的输入反应十分敏感<sup>[16]</sup>, 而碎屑物质的输入对烃源岩的发育是一把“双刃剑”<sup>[21]</sup>。物源输入量过大时, 有机质易于被稀释, 质量变差; 而缺乏物源输入量时, 湖盆中的氧化作用增强, 不易于有机质的保存。因此, 只有具有一定物源供给并存在适度遮挡条件的情况下, 有机质的生产和保存条件才能实现有机结合。从丽水-椒江凹陷基底构造(图 4)可以看出, 椒江 A 洼和丽水 C 洼西侧缓坡方向存在同期的椒江 B 洼和丽水 A 洼, 椒江 B 洼和丽水 A 洼吸收屏蔽了西侧闽浙隆起的大量物源, 导致椒江 A 洼和丽水 C 洼主要接受来自东侧陡坡方向的雁荡凸起少量物源, 存在适度的物源输入和遮挡条件, 有利于有机质的富集与保存, 促进发育优质烃源岩; 而丽水 A 洼和丽水 B 洼西侧受来自闽浙隆起物源的直接输入, 发育大型三角洲沉积环境, 缺乏适度的遮挡条件, 不利于烃源岩的发育和保存。

### 3.4 晚期火山活动对烃源岩的控制

火山活动对烃源岩发育的控制主要体现在 2 个方面。首先, 同期的火山活动可以为湖盆水体带来营养物质, 促进有机质的富集。现代火山活动导致藻类勃发的事件目前已在多地被观测到, 例如, 2003 年马利亚纳群岛附近的安纳塔汉火山喷发, 引发了太平洋超过 4.8×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup> 海域的藻类勃发<sup>[22]</sup>; 2010 年 5 月冰岛埃亚菲德拉火山喷发过后, 附近海域表层水的叶绿素含量在 4 mg/m<sup>3</sup> 以上持续了十几天, 而该海域在没有发生火山喷发的年份, 5 月表层海水中叶绿素含量仅约为 1 mg/m<sup>3</sup><sup>[23]</sup>。一般来说, 水生藻类越多同位素越轻, 但若湖泊藻类勃发, 藻类与湖水碳交换导致碳同位素倒转。4 个次洼同位素特征揭示(图 6), 椒江 A 洼具有明显的藻类勃发

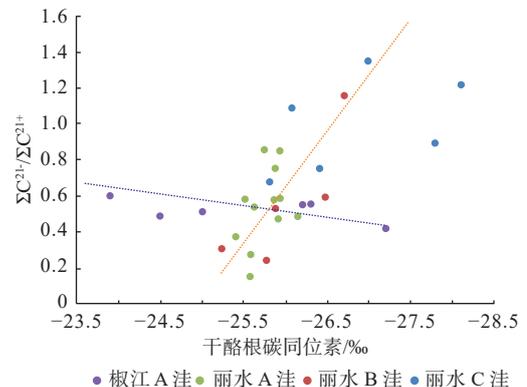


图 6 4 个次洼同位素特征

Fig.6 Isotopic characteristics of four sub-sags

特征,地震剖面上显示4个次洼中仅椒江A洼在月桂峰组沉积时期受到强烈的火山活动(图7),说明椒江A洼藻类勃发的特征可能与其受到火山活动带来的营养物质有关。此外,晚期的火山活动加速了烃源岩的成熟生烃,提升次洼生排烃量。丽水A洼在中新世具有明显的火山喷发现象,埋深2400 m时, $R_o$ 可达到1%;丽水C洼火山不活跃, $R_o$ 达到1%时需埋深>3600 m。

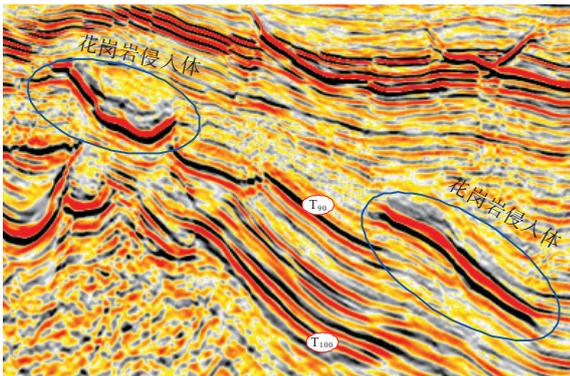


图7 椒江A洼月桂峰组火成岩发育地震剖面  
Fig.7 Seismic profile of igneous rock development in Yueguifeng Formation of Jiaojiang A Sub-sag

#### 4 月桂峰组湖相烃源岩分布

从凹陷的沉积背景来看,丽水-椒江凹陷优质烃源岩主要发育在月桂峰组强断陷期水体相对较深的局部次洼中,属于中-深湖相沉积环境。地震相指由特定的地震反射参数所限定的三维空间的地震反射单元,是特定的沉积相或地质体的地震响应<sup>[24]</sup>。因此,利用丽水-椒江凹陷4个次洼三维地震资料,

识别并刻画中-深湖相的地震相特征与分布,对该区烃源岩的综合评价具有重要意义。

通过精细的井震标定,识别出丽水-椒江凹陷中-深湖相烃源岩表现为低频、连续、中强振幅、平行反射的地震相特征(图8a),这也与珠江口盆地陆丰凹陷、西江凹陷已证实的中-深湖相优质烃源岩地震相特征相似。滨浅湖相表现为中频、中连续、中弱反射特征,扇三角洲相表现为中低频、断续、中弱振幅、席状反射特征。这种不同的地震相特征可以通过地震属性的聚类分析进行空间上的刻画。地震属性种类繁多,为避免聚类过程中出现的多解性与随机性,如何选择最能反映中-深湖相的地震属性组合是准确聚类分析的关键<sup>[25]</sup>。对丽水-椒江凹陷三维地震数据提取反映振幅、频率、相位、波形等多个敏感属性,基于皮尔逊积矩相关系数公式<sup>[26]</sup>计算不同地震属性的相关系数。通常来说,相关系数的绝对值大说明这2种属性中的一种是冗余数据,应考虑剔除;相关系数绝对值小说明2种属性缺乏相关性,也应进行取舍。最终优选出主频(Dominant Frequency)、均方根振幅(RMS Amplitude)、混沌(Chaos)3个地震属性进行地震属性聚类分析。

以椒江A洼为例,聚类分析的结果可以很好地将地震数据中的中-深湖相、滨浅湖相和扇三角洲相进行区分(图8b)。应用Petrel软件中的Geobody模块对中-深湖相的聚类区进行提取,实现对丽水-椒江凹陷4个次洼中-深湖相烃源岩面积和体积的定量雕刻(图9)。

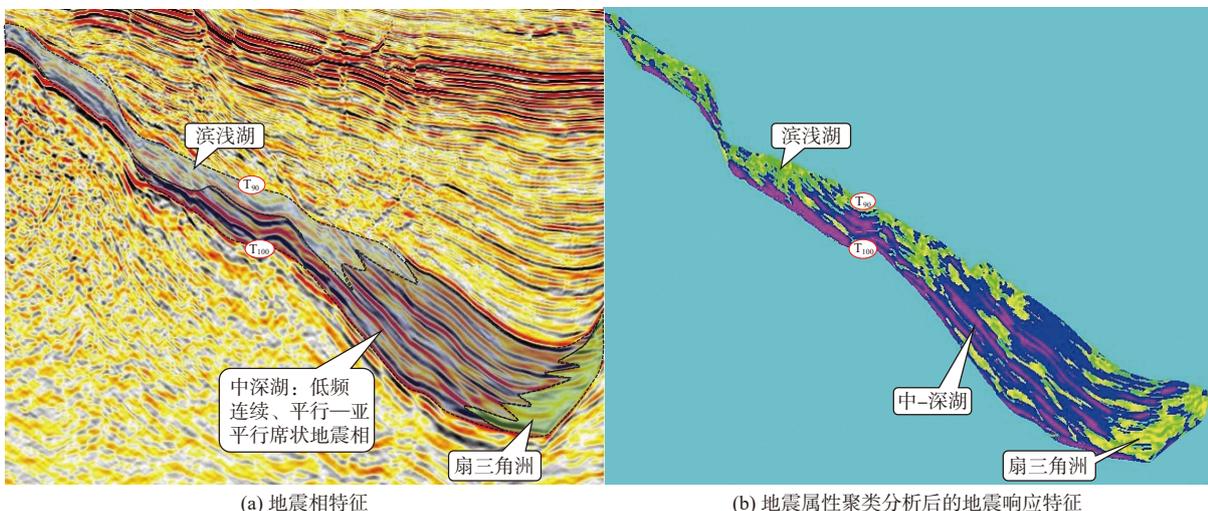
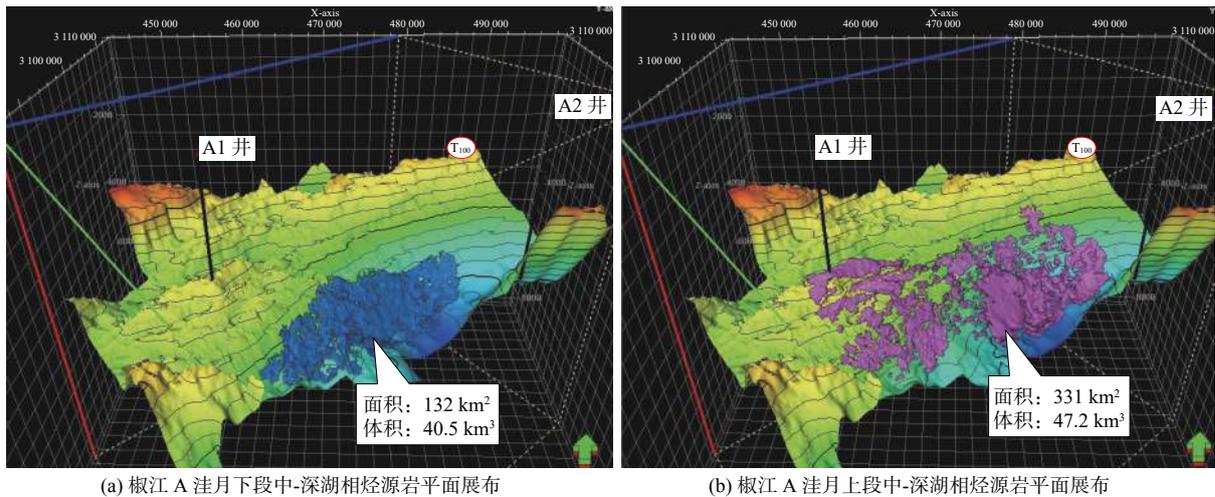


图8 椒江A洼月桂峰组中-深湖相烃源岩识别

Fig.8 Source rock identification of middle-deep lake facies in Yueguifeng Formation in Jiaojiang A Sub-sag



(a) 椒江 A 洼月下段中-深湖相烃源岩平面展布

(b) 椒江 A 洼月上段中-深湖相烃源岩平面展布

图 9 椒江 A 洼月桂峰组中-深湖相烃源岩平面展布

Fig.9 Horizontal view of the source rock of middle-deep lake facies in Yueguifeng Formation of Jiaojiang A Sub-sag

### 5 月桂峰组烃源岩综合评价

优质烃源岩很大程度上控制着凹陷内油气藏的分布<sup>[27]</sup>。在丽水-椒江凹陷月桂峰组烃源岩控制因素研究的基础上, 结合中-深湖分布范围的预测结果, 可以对不同次洼内烃源岩发育情况进行综合评价, 对丽水-椒江凹陷的进一步勘探具有重要意义

(表 1)。椒江 A 洼具备强断层活动、火成岩母岩、适度遮挡地貌、活跃火山活动的有利条件以及最大的中-深湖发育范围, 综合评价为丽水-椒江凹陷中的 I 类富烃次洼; 丽水 A 洼和丽水 C 洼具有一定的中-深湖规模和较好的烃源岩发育条件, 评价为 II 类次富烃次洼; 而丽水 B 洼烃源岩发育地质条件最差, 评价为 III 类生烃次洼。

表 1 丽水-椒江凹陷月桂峰组烃源岩综合评价表

Table 1 Comprehensive evaluation of source rock of Yueguifeng Formation in Lishui Jiaojiang Sag

次洼	中-深湖相面积/km <sup>2</sup>	中-深湖相体积/km <sup>3</sup>	主控因素			烃源岩综合评价	
			断层活动速率/(m/Ma)	母岩性质	遮挡条件		火山活动
椒江 A 洼	294	87.7	100~500	酸性侵入岩	适度遮挡	活跃	I 类富烃次洼
丽水 A 洼	215	85.2	100~750	变质岩	缺乏遮挡	活跃	II 类次富烃次洼
丽水 C 洼	172	暂无三维数据	95~300	酸性侵入岩	适度遮挡	平静	
丽水 B 洼	92	23.5	120~350	喷出岩	缺乏遮挡	平静	III 类生烃次洼

### 6 结论

(1) 月桂峰组是丽水-椒江凹陷的主力烃源岩层系。受构造演化和沉积充填的影响, 月桂峰组沉积期盆地分割性强, 呈现“多隆多洼”的特征, 发育相对封闭的湖泊环境。椒江 A 洼和丽水 C 洼钻井证实月桂峰组发育好—很好的中-深湖相烃源岩。丽水 A 和丽水 B 洼月桂峰组未钻遇中-深湖相地层, 但据地球化学数据推测, 其在洼陷深部也应发育中-深湖相烃源岩。

(2) 丽水-椒江凹陷月桂峰组优质烃源岩的发育

受到构造沉降、沉积充填、湖盆水体条件等因素的控制, 其形成模式可概括为“早期强断层活动、中期火成岩母岩和适度遮挡地貌、晚期活跃火山活动”。

(3) 丽水-椒江凹陷中-深湖相烃源岩表现为低频、连续、中强振幅、平行反射的地震相特征, 通过优选地震属性、聚类分析及空间雕刻, 可以很好地地将地震数据中的中-深湖相烃源岩进行提取, 实现对丽水-椒江凹陷 4 个次洼中-深湖相烃源岩面积和体积的定量识别。

(4) 结合丽水-椒江凹陷月桂峰组优质烃源岩的发育机制和中-深湖相烃源岩分布范围, 对 4 个主要

次洼内烃源岩发育情况进行综合评价,认为椒江 A 洼具有最大的中-深湖相发育范围和最优的烃源岩发育地质条件,综合评价为 I 类富烃次洼,而丽水 A 洼和丽水 C 洼为 II 类次富烃次洼,丽水 B 洼为 III 类生烃次洼。

#### 参考文献:

- [1] 覃军,张迎朝,刘金水,等.东海陆架盆地丽水-椒江凹陷古新统 L 气田成藏过程与主控因素[J].天然气地球科学,2022,33(4):605-617.
- [2] 张功成,梁建设,徐建永,等.中国近海潜在富烃凹陷评价方法与烃源岩识别[J].中国海上油气,2013,25(1):13-19.
- [3] 陈志勇.丽水、椒江凹陷油气潜力分析和勘探突破口的选择[J].中国海上油气(地质),1997,9(6):67-74.
- [4] 张胜利,夏斌.丽水-椒江凹陷构造演化特征与油气聚集[J].天然气地球科学,2005,16(3):324-328.
- [5] 葛和平,陈志勇,方来富,等.丽水凹陷油气成藏期次探讨[J].中国海上油气(地质),2003,15(1):46-52.
- [6] 田杨,叶加仁,雷闯,等.东海陆架盆地丽水-椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育控制因素及形成模式[J].地球科学,2016,41(9):1561-1571.
- [7] 陈春峰,徐春明,周瑞华,等.东海陆架盆地丽水凹陷岩性油气藏发育特征与成藏条件[J].中国海上油气,2013,25(2):30-35.
- [8] 李浩,陆建林,左宗鑫,等.长岭断陷南部断陷层湖相优质烃源岩发育控制因素[J].石油与天然气地质,2015,36(2):209-218.
- [9] 姜雪,吴克强,刘丽芳,等.构造活动对富生油凹陷烃源岩的定量控制:以中国近海古近系为例[J].石油学报,2014,35(3):455-461.
- [10] 刘祥柏,柳广弟,宋泽章,等.渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组烃源岩沉积环境及形成机理[J].天然气地球科学,2022,33(12):2008-2031.
- [11] 姜文亚,柳飒.层序地层格架中优质烃源岩分布与控制因素:以歧口凹陷古近系为例[J].中国石油勘探,2015,20(2):51-58.
- [12] 鹿坤,左银辉,梅冰,等.东濮凹陷古沉积环境及其对有机质丰度的影响[J].地质与勘探,2013,49(3):589-594.
- [13] 任拥军,宋全友.青藏措勤盆地地下白垩统烃源岩中可溶有机质的地球化学特征[J].地质与勘探,2000,36(4):64-68.
- [14] LU K, ZUO Y H, MEI B, et al. Paleo-sedimentary environments in the Dongpu Depression and their impact on organic matter abundance[J]. Geology and Exploration, 2013, 49(3): 589-594.
- [15] 夏佩芬,吴国璋.珠三坳陷湖相烃源岩的无定形有机质[J].中国海上油气(地质),1996,8(6):25-30.
- [16] 赵鹏,彭光荣,吴静,等.珠一坳陷小型次洼文昌组烃源岩发育模式与主控因素[J].沉积学报,2022,40(4):1109-1121.
- [17] 刘传联,徐金鲤,汪品先.藻类勃发:湖相油源岩形成的一种重要机制[J].地质论评,2001,47(2):207-210.
- [18] 李友川.中国近海湖相优质烃源岩形成的主要控制因素[J].中国海上油气,2015,27(3):1-9.
- [19] 谢世文,王宇辰,舒誉,等.珠一坳陷湖盆古环境恢复与优质烃源岩发育模式[J].海洋地质与第四纪地质,2022,42(1):159-169.
- [20] 陈小霞,吴振强,梁世中.藻类对微量元素的生物富集及其机理探讨[J].食品与发酵工业,1999,25(4):58-62.
- [21] HARRIS N B, FREEMAN K H, PANCOST R D, et al. The character and origin of lacustrine source rocks in the Lower Cretaceous synrift section, Congo Basin, west Africa[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(8): 1163-1184.
- [22] LIN I I, HU C, LI Y H. Fertilization potential of volcanic dust in the low-nutrient low-chlorophyll western North Pacific subtropical gyre: satellite evidence and laboratory study[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2011, 25: 1-12.
- [23] ACHTERBERG E P, MOORE C M, HENSON S A, et al. Natural iron fertilization by the Eyjafjallajökull volcanic eruption[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(5): 921-926.
- [24] 龚丽,朱红涛,舒誉,等.珠江口盆地恩平凹陷文昌组层序格架中-深湖相烃源岩空间展布规律及发育模式[J].地球科学:中国地质大学学报,2014,39(5):546-556.
- [25] 郭帅,陈莹,杨海长,等.少井区基于地震属性聚类的沉积相分析方法:以白云凹陷始新统文昌组为例[J].海洋地质前沿,2018,34(5):48-55.
- [26] 肖湘.多种属性敏感性方法的对比研究[D].成都:西南石油大学,2014.
- [27] 刘峰,黄苏卫,张传运,等.海中凹陷涠洲组烃源岩特征及潜力分析[J].海洋石油,2022,42(2):1-6.

## Main constraining factors and distribution prediction of lacustrine hydrocarbon source rocks in Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag

LI Linzhi, GUO Gang, LIAO Jihua, WANG Xin, LI Jingjing, WU Bin, ZHANG Xiaoqing  
(CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** The Yueguifeng Formation is the main source rock of Lishui-Jiaojiang Sag that formed in the period of strong fault filling of the Yueguifeng Formation, with strong tectonic segmentation, relatively enclosed sedimentary environment, and unclear development characteristics of lacustrine source rock in mainly four sub-sags. To clarify the development conditions and spatial distribution of the source rocks of the Yueguifeng Formation in each hydrocarbon-rich sub-sag, and further guide the oil and gas exploration in the area, the data of logging and coring in geophysics, geochemistry, and paleontology were used based on the dynamic life cycle process of the lake basin evolution. We proposed that the four factors, in temporal order, of early-stage fault activity rate, middle-stage parent rock property and the shielding conditions, and late-stage volcanic activity, jointly constrained the development of high-quality source rock in the four major sub-sags. Under the best geological knowledge, based on multi-attribute neural network deep learning, the spatial distribution of middle-deep lacustrine hydrocarbon source rocks was depicted quantitatively. Based on the development mechanism of high-quality source rocks and the distribution range of medium-deep lacustrine source rocks, the development of high-quality source rocks in the four major sub-sags was evaluated comprehensively. The results indicate that Jiaojiang A Sub-sag is a Class I hydrocarbon rich sub-sag, Lishui A and Lishui C Sub-sags are Class II sub-rich hydrocarbon sub-sags, and Lishui B Sub-sag is Class III hydrocarbon-generating sub-sag.

**Key words:** Lishui Jiaojiang Sag; Yueguifeng Formation; source rock; constraining factors; comprehensive evaluation