



椒江凹陷下古新统月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩综合识别与分布预测

郭 刚, 廖计华, 徐建永, 吴 斌, 李林致, 王 欣, 李 峰, 李婧婧

Comprehensive recognition and distribution prediction of semi-deep and deep lacustrine source rock of the Lower Paleocene Yueguifeng Formation in Jiaojiang Sag

GUO Gang, LIAO Jihua, XU Jianyong, WU Bin, LI Linzhi, WANG Xin, LI Feng, and LI Jingjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023052302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海陆架盆地丽水凹陷热演化模拟及现今地温场特征

Thermal evolution modeling and present geothermal field of the Lishui Sag of East China Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 124-134

南黄海盆地二叠系地震—沉积相分析及烃源岩分布预测

Seismic and sedimentary facies analysis and prediction of favorable Permian source rocks in the South Yellow Sea basin

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(3): 96-106

渤海海域沙南凹陷烃源岩TOC测井预测模型优选及应用

Optimization of TOC well logging prediction models and their application to source rock evaluation in the Shanan Sag of Bohai Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 182-191

中国近海断拗转换期煤系烃源岩特征——以西湖凹陷平湖组烃源岩为例

Coal-bearing source rocks formed in the transitional stage from faulting to depression nearshore China——A case from the Pinghu Formation in the Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 102-114

幕式裂陷控洼背景下的烃源岩分布及岩浆改造——以珠一坳陷番禺4洼为例

Source rock distribution pattern in an episodic rifting sag and later stage magmatic reformation: A case from Panyu 4 sag, Zhu I Depression

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 151-160

珠江口盆地惠州凹陷恩平组源岩特征及勘探潜力

A NEW SOURCE ROCK IN HUIZHOU SAG OF PEARL RIVER MOUTH BASIN AND ITS EXPLORATION POTENTIAL

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(2): 149-159



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郭刚, 廖计华, 徐建永, 等. 椒江凹陷下古新统月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩综合识别与分布预测 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 199-209.

GUO Gang, LIAO Jihua, XU Jianyong, et al. Comprehensive recognition and distribution prediction of semi-deep and deep lacustrine source rock of the Lower Paleocene Yueguifeng Formation in Jiaojiang Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 199-209.

椒江凹陷下古新统月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩综合识别与分布预测

郭刚, 廖计华, 徐建永, 吴斌, 李林致, 王欣, 李峰, 李婧婧

中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要: 椒江凹陷是东海盆地已证实生烃但未获商业发现的低勘探程度区, 落实其主力烃源岩层月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩发育情况及规模是下步油气勘探亟待解决的首要问题。基于新采集的三维地震、钻井、古生物及有机地球化学数据, 综合断陷作用、古地貌背景、物源区母岩岩性、有机质丰度和类型等四方面开展椒江东洼月桂峰组湖相优质烃源岩精细识别, 并通过地震相类比分析, 定量预测其平面分布及规模。结果表明: 强烈断陷作用、适度遮挡的古地貌背景、洼陷周缘火成岩母岩区共同控制了椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩的发育; 其整体为好—优质烃源岩, 以 II₁-II₂ 型干酪根为主, 有机质来源以低等水生生物为主且有陆生高等植物的贡献。受凹陷结构控制, 椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩主要发育在洼陷中心及陡坡带一侧。典型地震相表现为低频连续强振幅平行反射, 基于多属性神经网络深度学习技术, 预测椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩最大面积为 294 km²、总体积为 109 km³。综合认为, 椒江东洼具有良好的油气资源潜力与勘探前景。

关键词: 湖相烃源岩; 发育条件; 分布预测; 月桂峰组; 椒江凹陷; 东海盆地

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023052302

Comprehensive recognition and distribution prediction of semi-deep and deep lacustrine source rock of the Lower Paleocene Yueguifeng Formation in Jiaojiang Sag

GUO Gang, LIAO Jihua, XU Jianyong, WU Bin, LI Linzhi, WANG Xin, LI Feng, LI Jingjing

CNOOC Research Institute company limited, Beijing 100028, China

Abstract: The Jiaojiang Sag is a low-level exploration area in the East China Sea Basin where hydrocarbon generation has been confirmed but no commercial discoveries yet have been made. Implementation of the development and scale of semi-deep lake-deep lake facies source rocks in the Yueguifeng Formation, the main source rock, is an urgent issue in the next step of oil and gas exploration. Based on the newly acquired 3D seismic, drilling, paleontological and organic geochemical data, the lake facies of the Yueguifeng Formation in the Jiaojiang Dong Subsag was developed in four aspects of rifting, paleogeomorphic background, source area parental rock lithology, and organic matter abundance and type. High-quality source rocks are precisely identified, and their planar distribution and scale are quantitatively predicted through seismic facies analogy analysis. Results show that the development of semi-deep lake to deep lake source rocks in the Yueguifeng Formation in Jiaojiang Dong Subsag is jointly controlled by strong faulting, moderately hilly palaeogeomorphic setting, and the igneous provenance area. As a whole, it is a good to excellent quality source rock, mainly composed of type II₁-II₂ kerogen. The organic matter is mainly composed of lower aquatic organisms with partly contributions from higher terrestrial plants, and the typical seismic facies shows low frequency continuous strong amplitude parallel reflection. Controlled by the sag structure, the semi-deep lake to deep lake source rocks of the Yueguifeng Formation in Jiaojiang Dong Subsag are mainly developed in the central area and on one side of the steep slope belt of Jiaojiang Dong Subsag. The typical seismic phase is characterized by low-frequency continuous strong amplitude parallel reflection. Using multi-attribute neural network deep-learning technology, we predicted that the maximum area and total volume of the semi-deep lake to deep lake source rock of the Yueguifeng Formation in the subsag are 294 km² and 109 km³, respectively. Overall, we believed that Jiaojiang Dong Subsag has good potential for oil and gas resources and exploration prospect.

Key words: lacustrine source rock; developmental conditions; distribution prediction; Yueguifeng Formation; Jiaojiang Sag; East China Sea Basin

资助项目: 中海油重大科技项目“中国近海新区新领域勘探技术”(KJGG2021-0300)

作者简介: 郭刚 (1976—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋油气勘探地质研究工作, E-mail: guok@sina.com

收稿日期: 2023-05-23; 改回日期: 2023-09-04. 张现荣编辑

中国近海盆地或凹陷油气分布极不均衡,既有富烃凹陷,又有油气勘探发现较少甚至没有商业发现的“贫烃凹陷”^[1-2]。随着中国近海富烃凹陷勘探程度的日益提高,拓展新区、新领域业已成为实现储量替代或油气勘探突破的必然趋势与重要途径之一^[3]。近年来,中国海油在南海北部的开平凹陷、阳江凹陷、顺德凹陷等多个以始新统半深湖—深湖相泥岩为主力烃源岩的新凹陷相继获得勘探突破^[3-4],充分展示了新凹陷良好的勘探价值与资源前景。一个凹陷能否成为富烃凹陷,其核心问题在于是否发育规模性的优质烃源岩^[5-6]。然而,中国近海剩余的新凹陷普遍面积较小,勘探程度低,勘探潜力不明朗。因此,落实其优质烃源岩发育分布及规模是亟待解决的首要问题,具有重要油气勘探现实意义。

东海陆架盆地椒江凹陷自 1986 年勘探至今,共钻探了 5 口井,其中 1 口见油层,1 口见油气显示;虽具备生烃潜力,但未获商业发现,尚处于勘探早期阶段。近 40 年来,国内外学者主要基于有机地球化学、盆地数值模拟及区域地质研究对椒江凹陷烃源岩开展了诸多富有成效的研究^[7-10],普遍认为下古新统月桂峰组湖相烃源岩为椒江凹陷主力供烃层系,进而开展了月桂峰组烃源岩特征及生排烃史分析,并探讨了其发育背景、主控因素及形成模式^[9,11]。

然而,受限于仅 1 口井钻揭月桂峰组、仅有稀疏的二维地震数据且品质较差,严重制约了对椒江凹陷月桂峰组湖相烃源岩的认识。本次研究基于新采集的三维地震、钻井、古生物及有机地球化学数据,遵循地质与地球物理紧密结合的整体思路,从断陷作用、古地貌背景、物源区母岩岩性、有机质丰度和类型等 4 方面开展椒江凹陷月桂峰组湖相优质烃源岩综合判识,并通过地震相类比分析,定量预测其平面分布及规模,以期椒江凹陷下步油气勘探部署提供决策依据,并为中国近海其他低勘探程度区湖相烃源岩判识与预测提供借鉴。

1 区域地质概况

椒江凹陷位于东海陆架盆地台北坳陷中西部^[12-13](图 1a),西邻闽浙隆起区,东以雁荡凸起与福州凹陷相隔,南北分别与丽水凹陷和钱塘凹陷相接,是在中生代残留盆地基础上发展形成的新生代地堑—半地堑区,整体呈 NE-SW 向展布,面积约 3 500 km²,现今水深小于 100 m。椒江凹陷内部具有两洼夹一凸的构造格局(图 1b),由东至西可划分出椒江东洼、金华低凸起和椒江西洼 3 个次级构造单元,其中椒江东洼面积约 2 400 km²,基底最大埋深为 9 200 m,椒江西洼面积约为 1 100 km²、基底最大埋

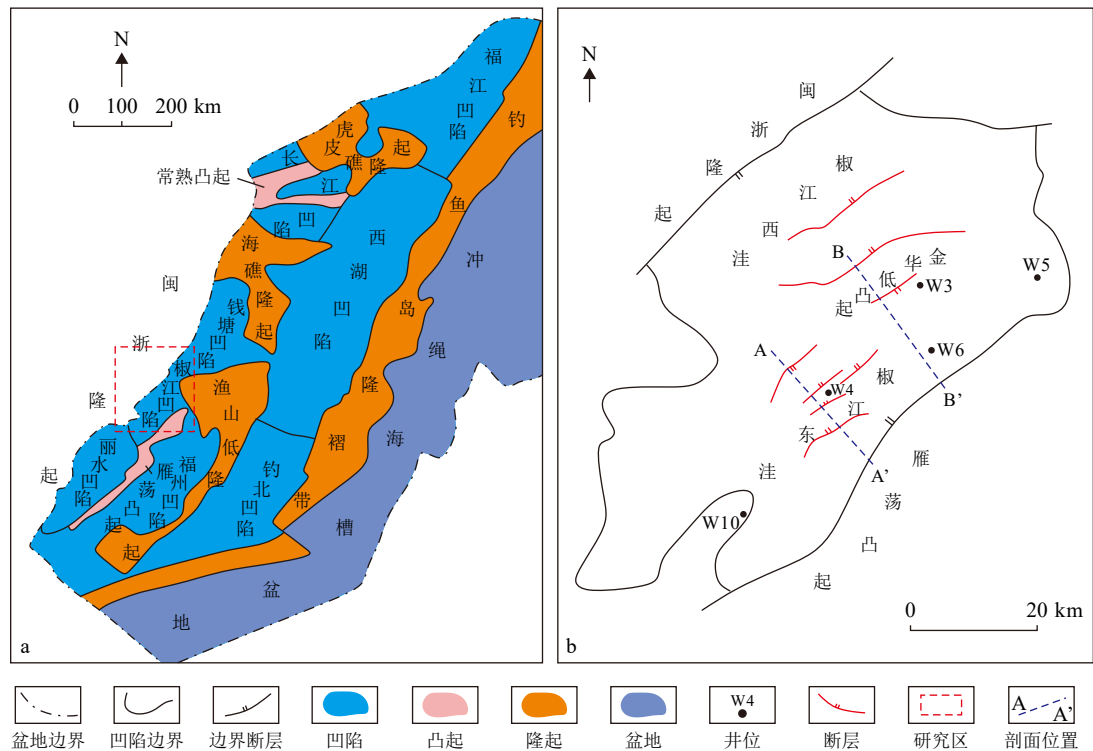


图 1 椒江凹陷区域构造位置及凹陷结构

Fig.1 Tectonic background and structure of the Jiaojiang Sag

深为 6 800 m。

区域研究表明, 椒江凹陷构造演化经历了 4 个阶段^[13]: 晚白垩世—古新世裂陷期(T_g — T_{80})、始新世拗陷期(T_{80} — T_{40})、始新世末—渐新世抬升剥蚀期(T_{40} — T_{20})和新近纪—第四纪区域沉降期(T_{20} —现今)(图 2), 对应的沉积充填则经历了由陆相到海相的演变^[14-15]。裂陷期依次充填了上白垩统石门潭组陆相河流沉积、下古新统月桂峰组陆相三角洲-湖泊沉积、中—上古新统灵峰组和明月峰组三角洲-滨浅海相沉积; 拗陷期依次充填了始新统瓯江组和温州组三角洲-滨浅海相沉积; 受始新世末期的玉泉运动和渐新世末期的花港运动影响, 区域上整体缺失了始新统平湖组和渐新统花港组; 新近纪—第四纪大范围沉积了滨-浅海相或海陆过渡相的中新统龙井组、玉泉组、柳浪组以及上新统三潭组和更

新统东海群。

2021 年中海油新采集处理了覆盖椒江凹陷椒江东洼的 1 000 km² 三维地震数据, 且已钻 5 口井均位于金华低凸起和椒江东洼内, 故本次研究以椒江东洼作为主要研究区。

2 洼陷结构与层序地层格架

基于井震联合标定及区域断裂、层序界面综合解释, 构建了椒江东洼月桂峰组构造-层序地层格架(T_{100} — T_{90})(图 3)。在早古新世受区域拉张应力作用, 椒江东洼发育一系列 NE-SW 向正断层, 控制形成了整体呈狭长型的地堑-半地堑结构单元, 控洼主断层椒东断裂位于洼陷东侧; 其中椒江东洼南部呈现“双断”特征, 为地堑-半地堑复合型结构, 地层厚

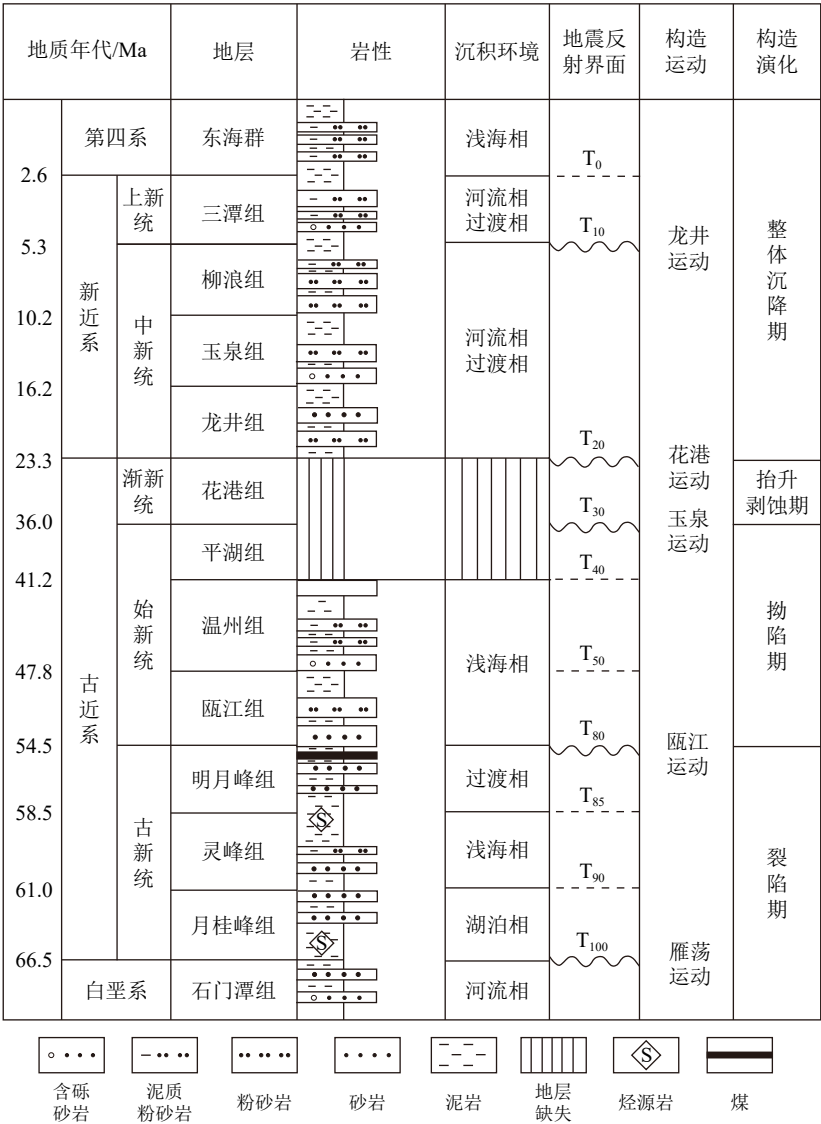


图 2 丽水-椒江凹陷地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Lishui-Jiaojiang Sag

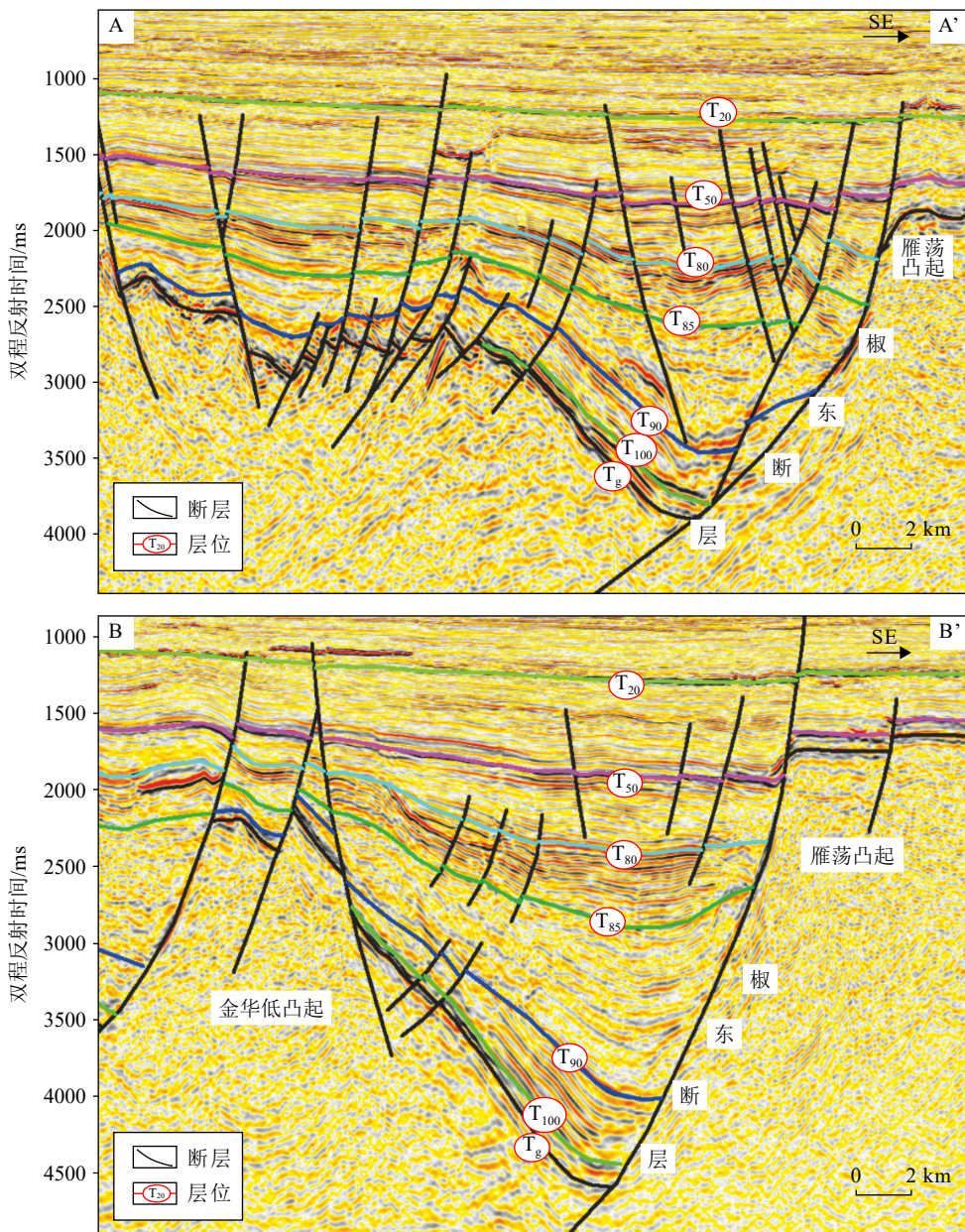


图 3 椒江东洼洼陷结构特征

AA'、BB'剖面位置见图 1。

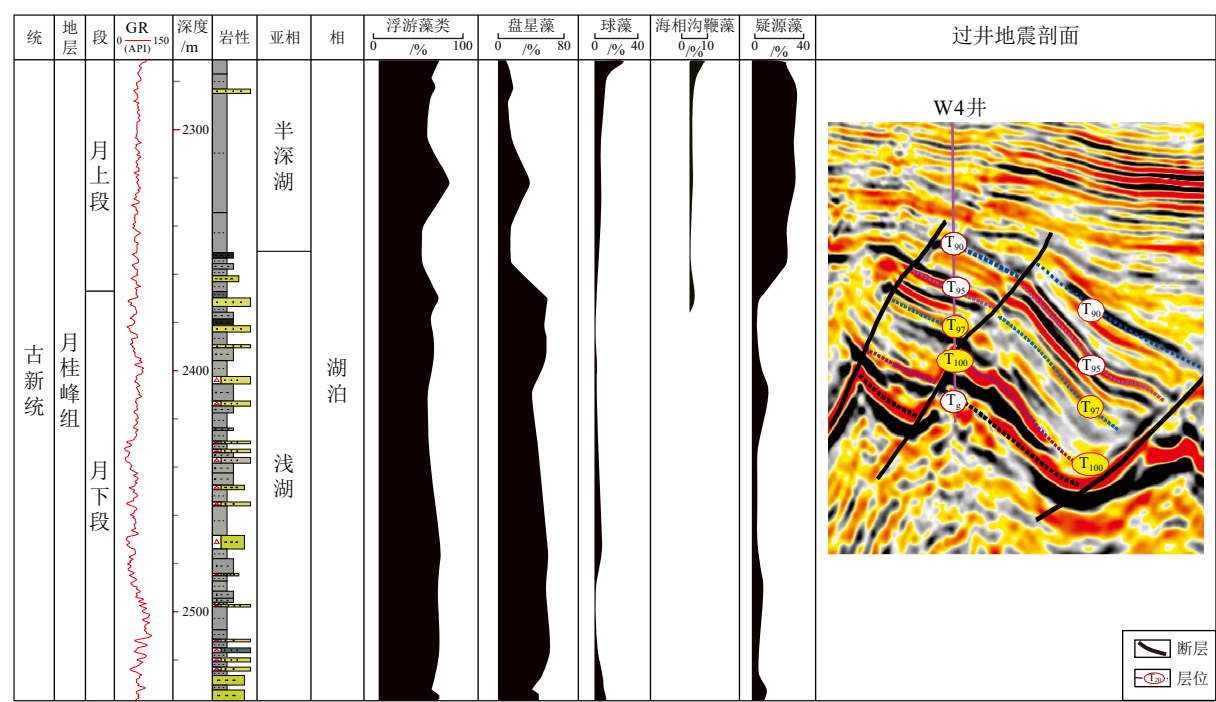
Fig.3 Structural characteristics of Jiaojiang Dong Subsag

See Fig.1 for the location of AA' and BB' profiles.

度中心位于椒东断裂下降盘(图 3 中 AA'剖面);椒江东洼北部则转变为“东断西超”箕状断陷结构,局部出现“双断”控制的地堑结构,地层整体成明显楔状特征(图 3 中 BB'剖面)。月桂峰组在椒江东洼及金华低凸起广泛分布,仅发育单一的沉积厚度中心,紧邻椒东断裂下降盘分布,且整体展布与椒东断裂走向一致,表现出强烈的断控特征;月桂峰组最大沉积厚度为 1 200 m,向西侧缓坡方向逐渐超覆减薄并披覆至金华低凸起之上。

截至目前,椒江东洼仅 W4 井揭示了月桂峰组,

根据其岩性组合、古生物、测井曲线及地震波组特征可细分为月桂峰组下段(T₁₀₀—T₉₅)和月桂峰组上段(T₉₅—T₉₀)(图 4)。月桂峰组下段(2 370~2 537 m)以棕黑色、深褐色和灰色泥岩夹薄粉细砂岩为主,泥岩岩屑呈椭球状、片状,泥地比为 74.2%,单砂层厚度均小于 5 m,无钙质,含有丰富的淡水绿藻类化石盘星藻,GR 测井曲线呈指状或小型漏斗状组合,过井地震相下部为低频弱振幅较连续反射,上部为中频强振幅平行连续反射,推测整体为浅湖相沉积;月桂峰组上段(2 268~2 370 m)以厚层褐黑色、



断陷作用、古地貌背景、物源区母岩岩性等半深湖—深湖相烃源岩发育影响因素的综合分析,是认识椒江凹陷月桂峰组湖相烃源岩发育规律并开展分布预测的基础。

3.1 有机质丰度和类型

有机质丰度和类型是衡量烃源岩生烃潜力的重要指标。W4井月桂峰组下段泥岩 TOC 为 1.86%~2.65%, 均值为 2.31%, S_1+S_2 为 3.20~9.46 mg/g, 均值为 7.46 mg/g, 整体为好—很好烃源岩(图 5a); 氢指数为 159~344 mg/g.TOC, 以 II_1-II_2 型干酪根为主, 偏 II_2 型(图 5b)。W4井月桂峰组上段泥岩 TOC 为 2.13%~3.75%, 均值为 2.82%, S_1+S_2 为 5.04~15.29 mg/g, 均值为 9.76 mg/g, 整体为很好—优质烃源岩; 氢指数为 192~398 mg/g.TOC, 以 II_1-II_2 型干酪根为主, 偏 II_1 型。无论是月桂峰组下段和月桂峰组上段, 干酪根显微组分中腐泥组占比均超 50%, 镜质组占比约 30%, 说明有机质来源是以低等水生生物为主且有陆生高等植物的贡献。

在 W4 井月桂峰组 $m/z=217$ 质量色谱图上检测到丰富的甾类化合物, 除 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷外, 还存在 4-甲基甾烷(图 6)。高丰度的 4-甲基甾烷被作为藻类勃发的重要指标之一, 在珠江口盆地文昌组和北部湾盆地流沙港组二段被作为半深湖—深湖相烃源岩的典型生物标志化合物而被大量报

道^[18, 27-28]。进一步分析表明, 从月桂峰组下段至月桂峰组上段, C_{27}/C_{29} 比值增大、4-甲基甾烷含量明显增加, 4-甲基甾烷/ C_{29} 参数与 TOC 含量正相关且均呈现上升趋势(图 6), 反映了月桂峰组上段较月桂峰组下段水生藻类对有机质贡献更大, 并占据绝对优势。结合上述 W4 井岩性组合及测井相特征, 推测 W4 井区月桂峰组下段泥岩为浅湖相好-很好烃源岩, 月桂峰组上段泥岩为半深湖—深湖相很好—优质烃源岩, 而深洼区半深湖—深湖相烃源岩规模应更大、品质应更优。

3.2 断陷作用强度

强烈断陷有利于形成半深湖—深湖相沉积环境, 从而利于形成稳定的水体分层、优越的有机质保存条件和优质湖相烃源岩^[16-18]。统计表明, 中国近海及东部陆上发育优质湖相烃源岩的富烃凹陷在烃源岩发育期控凹断层活动速率均大于 1 00 m/Ma, 基底总沉降速率均大于 200 m/Ma^[6]。本次利用断层活动速率法和回剥法, 分别开展了椒江东洼月桂峰组沉积期椒东断裂活动速率分析和基底沉降速率分析。研究表明, 椒东断裂月桂峰组沉积期断层活动速率为 154~481 m/Ma, 平均为 287 m/Ma(图 7a), 基底总沉降速率最大为 587 m/Ma, W4 井点位置基底总沉降速率为 239 m/Ma。进一步统计发现, W4 井月桂峰组湖相泥岩 Pr/Ph 比值为 1.51~2.32(图 7b),

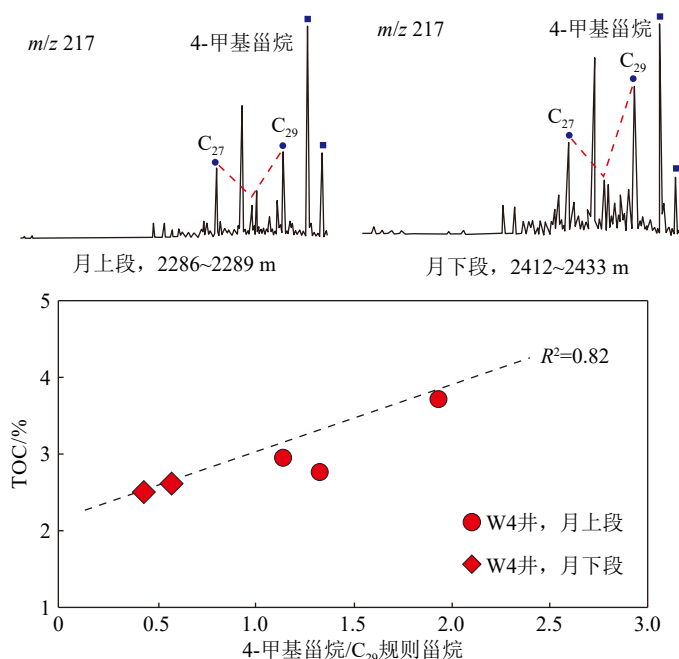


图 6 椒江东洼 W4 井月桂峰组烃源岩质谱图和 4-甲基甾烷/ C_{29} 与 TOC 相关性图

Fig.6 Mass spectrum of source rock in Yueguifeng Formation of Well W4 in Jiaojang Dong Subsag and correlation between 4-methylsterane/ C_{29} and TOC

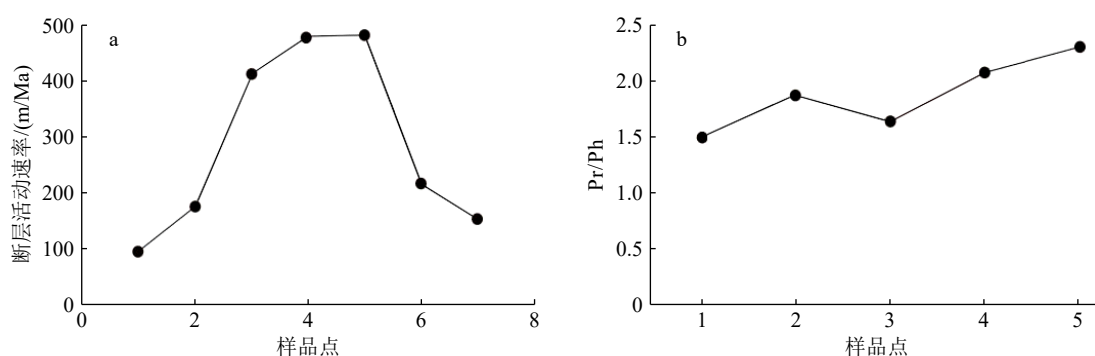


图7 椒东断裂月桂峰组沉积期断层活动速率(a)与W4井Pr/Ph值统计(b)

Fig.7 Fault activity rate of the Jiaodong Fault during the deposition period of Yueguifeng Formation (a), and Pr/Ph value statistics of Well W4 (b)

平均为 1.89, $V/(V+Ni)$ 比值为 0.45~0.65, 平均为 0.52, 指示为弱氧化—弱还原性水体环境; 考虑到月桂峰组沉积期 W4 井区位于椒江东洼沉积中心边缘, 其沉积水体深度相较于洼陷中心更浅、水体还原性更弱。据此分析, 受控于强烈断陷作用, 椒江东洼在月桂峰组沉积期可容纳空间增长速率大于沉积物供给速率, 洼陷整体处于欠补偿状态, 有利于半深湖—深湖相优质烃源岩的发育。

3.3 古地貌背景

在强烈断陷期, 受“隆高洼深”的古地貌背景控制, 断陷湖盆陡坡带以季节性近源短程河流或阵发性水流为主, 陆源粗碎屑经极短距离搬运甚至直接入湖, 在凹陷边缘堆积形成厚度大、规模小、延伸短且零散分布的扇三角洲或近岸水下扇, 而断陷湖盆缓坡带因地形相对平缓, 易形成规模较大、延伸较远的辫状河三角洲或三角洲。对于处在盆地边缘的小型湖盆, 在发育“沉砂池”等适度遮挡陆源碎屑的古地貌背景下, 更利于凹陷中发育细粒泥质沉积物和形成优质湖相烃源岩^[6, 18]。例如渤海湾盆地秦南凹陷北洼^[6], 因邻近燕山褶皱带大型物源区而接受了大量陆源粗碎屑堆积, 导致湖相烃源岩分布十分局限, 油气勘探成效不理想; 而与之形成鲜明对比的是, 秦南凹陷南洼因远离盆外主物源区, 来自燕山褶皱带的粗碎屑物源被北洼提前卸载, 钻井揭示了沙三段、沙一段两套优质湖相烃源岩, 勘探发现了大型油气田。

在月桂峰组沉积期, 椒江凹陷西北部为整个东海陆架盆地的边缘, 紧邻闽浙隆起大型物源区, 而该时期椒江西洼和金华低凸起共同为椒江东洼构筑了一道天然屏障, 可以截留或阻挡大量来自闽浙隆起的由北西向注入的陆源粗碎屑。此外, 金华低凸起因规模小, 能够为椒江东洼缓坡带提供的陆源

碎屑十分有限, 而椒江东洼陡坡带主要发育零散分布的小型扇三角洲或近岸水下扇, 向洼陷中心延伸较短; 据此推测, 因椒江西洼和金华低凸起对闽浙隆起物源的适度遮挡效应, 椒江东洼月桂峰组具备发育规模性细粒泥质沉积物的古地貌背景, 为半深湖—深湖相优质烃源岩的发育创造了有利条件。

3.4 物源区母岩岩性

营养盐是湖泊生产力的核心和物质基础^[5-6, 19], 而河流和火山活动是中国近海湖盆浮游藻类生长所需营养物质的主要来源。研究表明, 河流流经的火成岩母岩区含有丰富的生物生长所需的 Ca、Mg、Fe、P 等常量元素及 Cu、Mn、Ni 等微量元素^[20]。结合区域构造背景、钻井及地震反射特征, 椒江东洼在月桂峰组沉积期存在 3 个物源区, 即东部的雁荡凸起北段、北部的金华低凸起和西部的闽浙隆起区。

位于雁荡凸起中段的 WZ33-1-1、FZ2-1-1 和 MYF-1 井揭示基底岩性均为花岗岩, 其中 MYF-1 井基底花岗岩 K-Ar 法同位素定年为 113 Ma^[21]; 雁荡凸起北段基底岩性目前无钻井直接揭示, 而马国庆等^[22]基于丽水-椒江凹陷基底重磁异常特征研究, 指出雁荡凸起北段基底主要为白垩纪; 高顺莉等^[23]基于紧邻椒东断裂下降盘的 W6 井上古新统明月峰组碎屑锆石研究, 指出其具有典型岩浆岩特征, U-Pb 锆石年龄集中在 140~90 Ma、主峰值年龄为 110~114 Ma, 据此推测, 雁荡凸起北段基底应与其中段相似, 主要为白垩纪火成岩。对于北部的金华低凸起, W3 井揭示基底岩性为花岗岩, 目前无定年数据, 据基底重磁异常特征推测为白垩纪^[22]。对于西部的闽浙隆起区, 现今东部沿海所出露的主要为变质岩、侵入岩和火山岩, 其中侵入岩几乎均为早白垩世—晚白垩世形成的花岗岩, 锆石年龄为 102.5~86 Ma^[15, 24-25], 中生代火山岩以酸性火山岩为

主,而变质岩被中生代火山岩覆盖,仅在少数地方出露。W4 井揭示月桂峰组重矿物组合为赤褐铁矿(51.4%)+锆石(30.6%)+白钛矿(5.6%)+磁铁矿(4.9%)+石榴石(3.5%),ZTR 指数为 87,岩浆锆石含量占比高且磨圆度中等(2 514~2 523 m),U-Pb 年龄测试峰值为 111 Ma^[26],指示母岩主要为中生界中酸性火成岩,存在变质岩母岩的贡献,并以较长距离搬运为主。由于 W4 井区位于椒江东洼缓坡一侧,东部雁荡凸起的陆源碎屑无法横跨椒江东洼搬运至此,其月桂峰组的主要母岩区应为西部闽浙隆起带。

丽水-椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育期处于半湿润—湿润亚热带型气候^[11]。在该气候背景下,有利于雁荡凸起北段、金华低凸起及闽浙隆起的中生代中酸性火成岩母岩区的化学风化作用并释放出大量营养元素,不仅能为椒江东洼沉积分散体系的发育提供物质基础,而且陆源碎屑中所携带的陆生有机质和营养元素被搬运到湖泊中聚集形成富营养水体,从而为水生浮游藻类的繁盛创造良好条件,有利于月桂峰组半深湖—深湖相优质烃源岩的发育。

4 半深湖—深湖相烃源岩识别与分布预测

椒江凹陷 W4 井钻井揭示月桂峰组上段半深湖—深湖相主要表现为低频强振幅连续平行的地震反射特征。对中国近海钻遇半深湖—深湖相地震

特征进行研究发现,珠江口盆地文昌组和北部湾盆地流沙港组半深湖—深湖相沉积在地震剖面上也表现为低频连续强振幅平行反射^[18,28]。因此,采用地震相的类比分析,发现椒江东洼深洼区月桂峰组典型地震响应特征表现为明显的低频连续强振幅平行反射(图 8),而靠近缓坡带则主要为中高频差连续弱振幅反射,到了椒东断裂下降盘则变为杂乱弱振幅反射或空白反射,指示了沉积相带从缓坡带到陡坡带发育滨浅湖—半深湖—深湖—扇三角洲/近岸水下扇的组合特征;进一步基于地震正演模拟分析,由不同泥质含量背景下的月桂峰组地震正演模拟结果可知,当泥质含量为 90% 时,洼陷内表现为典型低频连续强振幅平行反射地震响应,地震主频为 17 Hz,与其实地地震反射特征十分吻合,从而验证了椒江东洼洼陷内月桂峰组发育规模性半深湖—深湖相沉积。

综上所述,强烈断陷作用、适度遮挡的古地貌背景、洼陷周缘火成岩母岩区共同控制了椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩的发育;其整体为好—优质烃源岩,以 II₁-II₂ 型干酪根为主,有机质来源以低等水生生物为主且有陆生高等植物的贡献,典型地震相表现为低频连续强振幅平行反射特征;受凹陷结构控制,椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩主要发育在洼陷中心及陡坡带一侧。

基于新三维地震数据,利用 Petrel 软件平台提供的多属性神经网络深度学习模块,对椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩空间展布及规模开展精细刻画。在层序格架与沉积相模式约束下,将

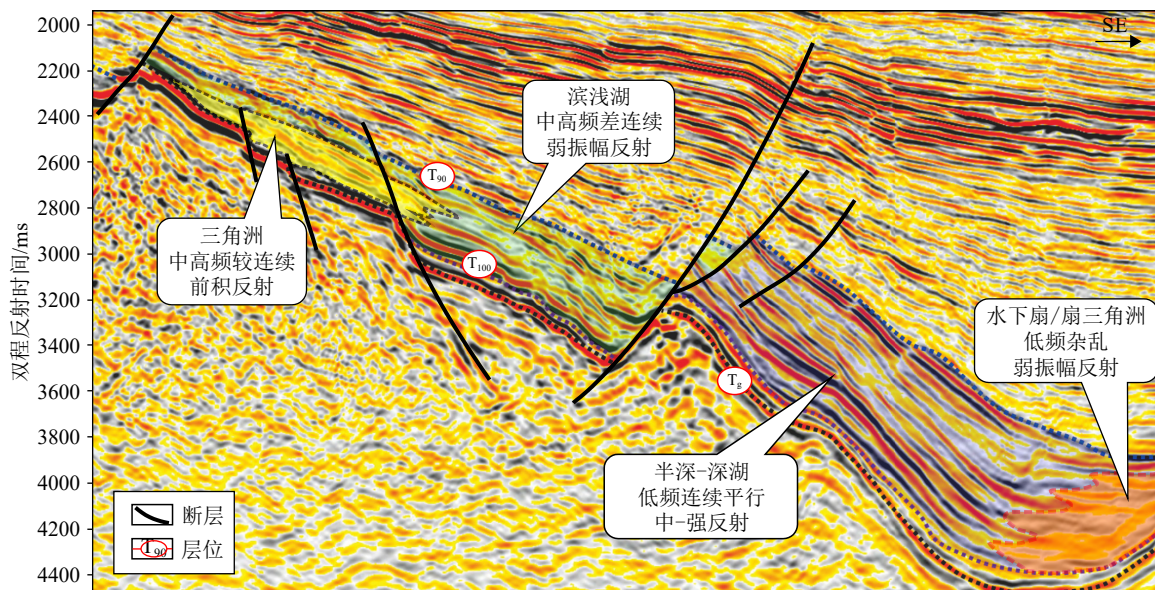


图 8 椒江东洼月桂峰组典型地震相-沉积相组合

Fig.8 Typical combination of seismic facies and sedimentary facies of Yueguifeng Formation in Jiaojiang Dong Subsag

深洼区月桂峰组低频连续强振幅平行反射设置为半深湖—深湖相的种子点, 基于种子点的多种地震属性聚类分析(图 9), 优选出能有效识别半深湖—深湖相的敏感地震属性; 通过神经网络对敏感地震属性的深度学习及自动追踪识别, 可以实现在三维空间内对半深湖—深湖相烃源岩的面积、体积进行定量预测。

从椒江东洼多属性神经网络深度学习结果来看, 该方法可以有效地将半深湖—深湖相进行空间识别。基于机器学习的预测结果(图 10), 椒江东洼月桂峰组下段半深湖—深湖相面积为 116 km²、体积为 49 km³; 月桂峰组上段半深湖—深湖相面积为 294 km², 体积为 60 km³; 由此可知, 椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩最大面积为 294 km², 总体积为 109 km³。前人生烃模拟研究认为^[7, 10], 椒江东

洼深洼区月桂峰组湖相烃源岩整体处于成熟—高成熟阶段, 生烃能力强, 且生油率大于生气率, 主要生烃时期在古新世晚期至始新世。综合认为, 椒江东洼月桂峰组发育规模性半深湖—深湖相烃源岩, 生烃潜力强, 具有良好的油气资源潜力与勘探前景。

5 结论

(1) 强烈断陷作用、适度遮挡的古地貌背景、洼陷周缘火成岩母岩区共同控制了椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩的发育; 其整体为好—优质烃源岩, 以 II₁-II₂ 型干酪根为主, 有机质来源以低等水生生物为主且有陆生高等植物的贡献, 典型地震相表现为低频连续强振幅平行反射特征; 受凹陷结构控制, 椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源

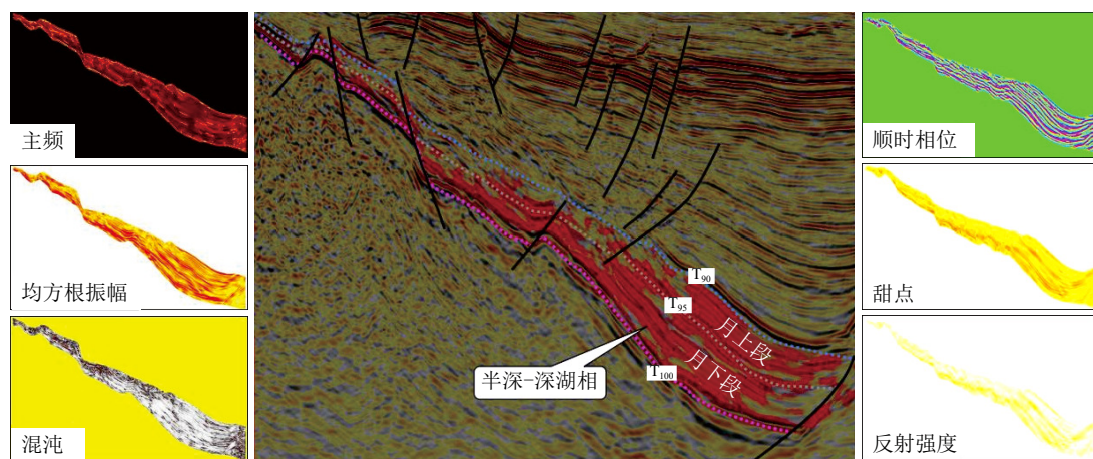


图 9 基于神经网络深度学习的椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相自动识别

Fig.9 Automatic recognition of semi-deep and deep lake facies in the Yueguifeng Formation of Jiaojiang Dong Subsalt by neural network deep learning

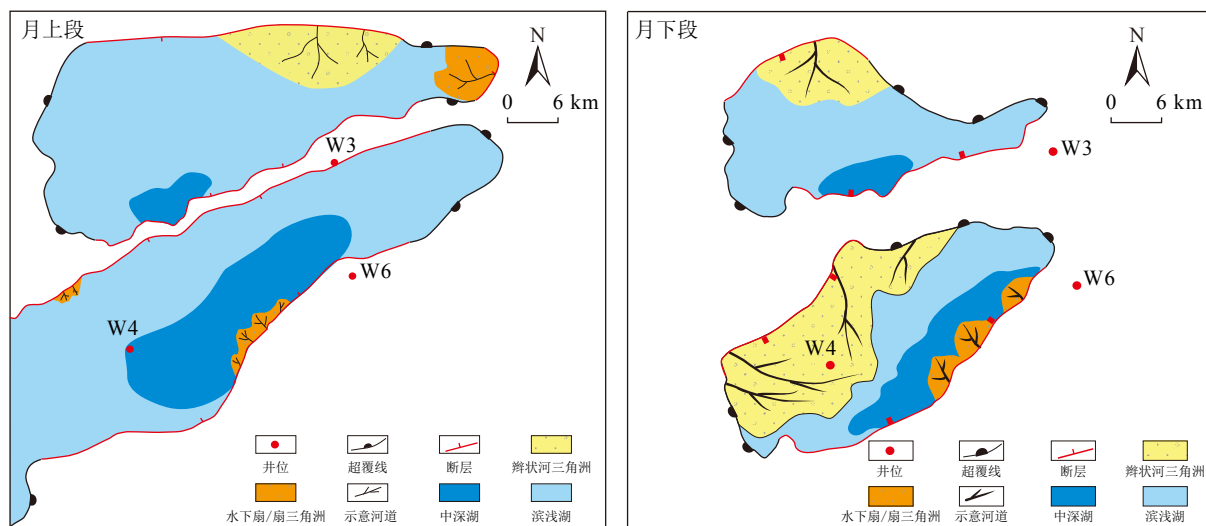


图 10 椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩分布与规模预测

Fig.10 Distribution and scale prediction of semi-deep and deep lake facies source rock in Yueguifeng Formation in Jiaojiang Dong Subsalt

岩主要发育在洼陷中心及陡坡带一侧。

(2) 基于多属性神经网络深度学习技术, 预测椒江东洼月桂峰组下段半深湖—深湖相烃源岩面积为 116 km², 体积为 49 km³, 月桂峰组上段半深湖—深湖相烃源岩面积为 294 km², 体积为 60 km³。由此可知, 椒江东洼月桂峰组半深湖—深湖相烃源岩最大面积为 294 km², 总体积为 109 km³。综合认为, 椒江东洼具有良好的油气资源潜力与勘探前景。

参考文献 (References)

- [1] 龚再升, 王国纯. 中国近海油气资源潜力新认识 [J]. 中国海上油气 (地质), 1997, 11(1): 1-12. [GONG Zaisheng, WANG Guochun. New thoughts upon petroleum resources potential in offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1997, 11(1): 1-12.]
- [2] 邓运华. 试论中国近海两个拗陷带油气地质差异性 [J]. 石油学报, 2009, 30(1): 1-8. [DENG Yunhua. Analysis on differences of petroleum type and geological conditions between two depression belts in China offshore[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 1-8.]
- [3] 徐长贵. 中国近海油气勘探新进展与勘探突破方向 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(1): 9-16. [XU Changgui. New progress and breakthrough directions of oil and gas exploration in China offshore area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(1): 9-16.]
- [4] 彭光荣, 张向涛, 许新明, 等. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识 [J]. 中国石油勘探, 2019, 24(3): 267-279. [PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, XU Xinming, et al. Important discoveries and understandings of oil and gas exploration in Yangjiang Sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(3): 267-279.]
- [5] 刘池洋, 赵俊峰, 马艳萍, 等. 富烃凹陷特征及其形成研究现状与问题 [J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 75-88. [LIU Chiyang, ZHAO Junfeng, MA Yanping, et al. The advances and problems in the study of the characteristics and formation of hydrocarbon-rich sag[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 75-88.]
- [6] 米立军, 张功成, 刘志峰, 等. 中国近海富油凹陷湖相优质烃源岩发育机制 [J]. 石油学报, 2023, 44(3): 405-419, 509. [MI Lijun, ZHANG Gongcheng, LIU Zhifeng, et al. Discussion on the development mechanism of lacustrine high-quality source rocks in oil-rich sags in offshore China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(3): 405-419, 509.]
- [7] 全志刚, 赵志刚, 杨树春, 等. 低勘探程度盆地烃源岩热演化及排烃史研究: 以东海椒江凹陷为例 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 319-324, 329. [TONG Zhigang, ZHAO Zhigang, YANG Shuchun, et al. Research on thermal evolution and hydrocarbon expulsion history of source rocks in low-exploration basins: a case study on Jiaojiang Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 319-324, 329.]
- [8] 殷世艳, 何生, 雷闯, 等. 东海陆架盆地丽水—椒江凹陷月桂峰组烃源岩特征及生排烃史 [J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(8): 35-41, 65. [YIN Shiyan, HE Sheng, LEI Chuang, et al. Characteristics and hydrocarbon generation-expulsion history of Yueguifeng Formation source rock in Lishui-Jiaojiang depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(8): 35-41, 65.]
- [9] 陈晓东, 蒋一鸣, 漆滨汶, 等. 东海丽水凹陷古新统非典型湖相烃源岩及油气特征 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(4): 25-38. [CHEN Xiaodong, JIANG Yiming, QI Binwen, et al. An atypical lacustrine source rock and its petroleum characteristics in the Lishui sag of the East China Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(4): 25-38.]
- [10] 雷闯, 殷世艳, 叶加仁, 等. 东海盆地椒江凹陷古新统烃源岩地球化学特征及生烃历史 [J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3575-3587. [LEI Chuang, YIN Shiyan, YE Jiaren, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation history of paleocene source rocks in Jiaojiang Sag, East China Sea basin[J]. Earth Science, 2021, 46(10): 3575-3587.]
- [11] 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. [TIAN Yang, YE Jiaren, LEI Chuang, et al. Development controlling factors and forming model for source rock of Yueguifeng formation in Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea continental shelf basin[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1561-1571.]
- [12] 王毅, 姜亮, 杨伟利. 丽水—椒江凹陷断裂构造运动学 [J]. 地质科学, 2000, 35(4): 441-448. [WANG Yi, JIANG Liang, YANG Weili. Kinematical analysis on faults in the Lishui-Jiaojiang Sag[J]. Scientia Geologica Sinica, 2000, 35(4): 441-448.]
- [13] 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. [ZHANG Shengli, XIA Bin. Characters of tectonic evolution of the Lishui-Jiaojiang Sag and oil accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 324-328.]
- [14] 田兵, 李小燕, 庞国印, 等. 叠合断陷盆地沉积体系分析: 以东海丽水—椒江凹陷为例 [J]. 沉积学报, 2012, 30(4): 696-705. [TIAN Bing, LI Xiaoyan, PANG Guoyin, et al. Sedimentary systems of the superimposed rift-subsidence basin: taking Lishui-Jiaojiang Sag of the East China Sea as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(4): 696-705.]
- [15] 侯国伟, 刘金水, 蔡坤, 等. 东海丽水凹陷古新统源-汇系统及控砂模式 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(2): 65-74. [HOU Guowei, LIU Jinshui, CAI Kun, et al. Source-to-sink system and sand-controlling model of paleocene in Lishui Sag, East China Sea basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(2): 65-74.]
- [16] 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. [JIANG Xue, WU Keqiang, LIU Lifang, et al. Quantitative control of tectonic activity for source rocks in rich oil kitchen sags: a case study of Paleogene in China offshore[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(3): 455-461.]
- [17] 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. [LI Youchuan. Main controlling factors for the development of high quality lacustrine hydrocarbon source rocks in offshore China[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(3): 1-9.]
- [18] 吴克强, 刘志峰, 王升兰, 等. 珠一坳陷北部洼陷带始新统半深—深湖相烃源岩综合判识 [J]. 中国海上油气, 2015, 27(3): 10-15, 24. [WU Keqiong, LIU Zhifeng, WANG Shenglan, et al. Composite recognition of Eocene semi-deep and deep lacustrine facies source rocks

- in northern subsags belt of Zhu I depression, Pearl River Mouth basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(3): 10-15,24.]
- [19] 李国山,王永标,卢宗盛,等. 古近纪湖相烃源岩形成的地球生物学过程[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 57(5): 976-987. [LI Guoshan, WANG Yongbiao, LU Zongsheng, et al. Geobiological processes of the formation of lacustrine source rock in Paleogene[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(5): 976-987.]
- [20] 鄢明才,迟清华,顾铁新,等. 中国火成岩化学元素的丰度与分布[J]. *地球化学*, 1996, 25(3): 409-424. [YAN Mingcai, CHI Qinghua, GU Tiexin, et al. Abundance and distribution of chemical elements of igneous rocks in China[J]. *Geochemica*, 1996, 25(3): 409-424.]
- [21] 杨传胜,李刚,杨长清,等. 东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时空分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(3): 125-133. [YANG Chuangsheng, LI Gang, YANG Changqing, et al. Temporal and spatial distribution of the igneous rocks in the East China Sea shelf basin and its adjacent regions[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(3): 125-133.]
- [22] 马国庆,明彦伯,黄大年. 基于重磁异常的新生代丽水—椒江凹陷基底分布特征研究[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2018, 48(5): 1493-1500. [MA Guoqing, MING Yanbo, HUANG Danian. Distribution characteristics study of cenozoic basement of Lishui-Jiaojiang sag based on gravity and magnetic anomalies[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2018, 48(5): 1493-1500.]
- [23] 高顺莉,赵洪,王建强,等. 东海陆架盆地椒江凹陷锆石 U-Pb 定年及意义[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 311-318. [GAO Shunli, ZHAO Hong, WANG Jianqiang, et al. Zircon U-Pb dating and its significance in Jiaojiang Sag, East China Sea Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 311-318.]
- [24] 王德滋,赵广涛,邱检生. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约[J]. *高校地质学报*, 1995, 1(2): 13-21. [WANG Dezi, ZHAO Guangtao, QIU Jiansheng. The tectonic constraint on the late mesozoic a-type granitoids in Eastern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1995, 1(2): 13-21.]
- [25] 邱检生,刘亮,李真. 浙江黄岩望海岗石英正长岩的锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学及其对岩石成因的制约[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1557-1572. [QIU Jiansheng, LIU Liang, LI Zhen. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of quartz syenite from Wanghaigang pluton in Huangyan County, Zhejiang Province and their implications for petrogenesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1557-1572.]
- [26] 湛君明,唐友军,刘彬,等. 丽水-椒江凹陷月桂峰组沉积物源性质及其物源方向: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学和重矿物成分的证据[J/OL]. *地球科学*, 2022. (2022-08-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220822.1614.006.html>. [ZHAN Junming, TANG Youjun, LIU Bin, et al. Provenance and provenance of the Yueguifeng Formation sediments in Lishui-Jiaojiang[J/OL]. *Earth Science*, 2022. (2022-08-22). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220822.1614.006.html>.]
- [27] 傅宁. 论 4-甲基 C₃₀ 甾烷丰度与烃源岩质量的关系: 基于北部湾盆地勘探实践[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(5): 11-20. [FU Ning. On relationship between abundance of 4-methyl-C₃₀-sterane and source rock quality: a case study of exploration practices in Benbuwan Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(5): 11-20.]
- [28] 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. [ZHANG Gongcheng, LIANG Jianshe, XU Jianyong, et al. An evaluation method of potential hydrocarbon-rich sags and their source rock identification offshore China[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(1): 13-19.]