



东海盆地丽水凹陷古新世构造迁移及其对烃源岩发育的影响

廖计华, 张晓庆, 苏圣民, 王 柯, 耿名扬, 李林致

Tectonic migration and its impact on the development of source rocks in the Paleogene Lishui Sag, East China Sea Basin

LIAO Jihua, ZHANG Xiaoqing, SU Shengmin, WANG Ke, GENG Mingyang, and LI Linzhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024090301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

东海陆架盆地椒江凹陷月桂峰组湖相烃源岩特征及发育主控因素

Characteristics and main controlling factors of lacustrine source rocks of Yueguifeng Formation in the Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(4): 134-144

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

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

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

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 199-209

东海丽水凹陷西次凹明月峰组海底扇沉积特征及沉积模式

Sedimentary features and depositional model of the submarine fan of Mingyuefeng Formation in the Western Lishui Sag, East China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 22-30

东海陆架盆地西湖凹陷孔雀亭区油气来源及运移方向

Source and migration direction of oil and gas in Kongqueting area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 156-165

珠江口盆地开平凹陷古近系构造特征及构造演化分析

Paleogene tectonic evolution of Kaiping Sag, Pearl River Mouth Basin

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 106-118



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

廖计华, 张晓庆, 苏圣民, 等. 东海盆地丽水凹陷古新世构造迁移及其对烃源岩发育的影响 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 146-157.

LIAO Jihua, ZHANG Xiaoqing, SU Shengmin, et al. Tectonic migration and its impact on the development of source rocks in the Paleogene Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 146-157.

东海盆地丽水凹陷古新世构造迁移及其对烃源岩发育的影响

廖计华, 张晓庆, 苏圣民, 王柯, 耿名扬, 李林致

中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

摘要: 构造迁移是断陷盆地幕式演化中重要的地质过程, 其对优质烃源岩发育与分布具有显著控制。基于最新采集的三维地震、钻井及有机地球化学数据, 综合构造-地层格架、控凹主断层活动性、沉积沉降中心时空展布特征, 首次揭示东海盆地丽水凹陷古新世构造迁移规律, 并探讨构造迁移成因及其对烃源岩和生烃潜力的影响。研究表明: 丽水凹陷古新世断陷-沉积中心发生了“自东向西”迁移, 区域沉积沉降中心在古新世早期位于丽水东次凹, 古新世中期迁移至丽水西次凹, 古新世晚期继承性发育; 古新世构造迁移是东海盆地由大陆边缘拗陷向泛裂陷演化过程中引起主要活动断裂及沉积沉降中心向西迁移的结果。受构造迁移影响, 丽水东次凹月桂峰组湖相烃源岩规模较大, 品质较好, 排烃强度较大, 而丽水西次凹发育规模较小, 且发育成熟度较高的月桂峰组湖相烃源岩, 并叠加灵峰组规模较大且高成熟度的陆源海相烃源岩; 丽水东次凹应以月桂峰组烃源灶为主的含油气系统进行勘探, 以找油为主, 而丽水西次凹应综合考虑月桂峰组或灵峰组两套烃源灶, 油气兼生, 以气为主。

关键词: 构造迁移; 烃源岩; 月桂峰组; 丽水凹陷; 东海盆地

中图分类号: P736, P618

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024090301

Tectonic migration and its impact on the development of source rocks in the Paleogene Lishui Sag, East China Sea Basin

LIAO Jihua, ZHANG Xiaoqing, SU Shengmin, WANG Ke, GENG Mingyang, LI Linzhi

CNOOC Research Institute Limited, Beijing 100028, China

Abstract: Tectonic migration is an important geological phenomenon in the episodic evolution process of faulted basins, which significantly influences the development and distribution of high-quality source rocks. Based on the most recent compilation of 3D seismic, drilling, and organic geochemical information, combined with tectonic-stratigraphic framework, the activity of major faults, as well as the spatial-temporal distribution of sedimentary-subsidence centers, we revealed for the first time the migration patterns of the Paleogene structures in the Lishui Sag of the East China Sea Basin. Furthermore, we investigated the genetic mechanisms governing tectonic migration and its implications on source rock formations and the potential for hydrocarbon generation. Results indicate that the depression and sedimentary center of the Lishui Sag underwent a westward migration during the Paleocene. The fault depression-deposition center of Lishui Sag migrated from east to west in the Paleocene. The regional sedimentation center was located in the Lishui East Sub-Sag in the early Paleocene, migrated to the Lishui West Sub-Sag in the middle Paleocene, and developed inheritedly in the late Paleocene. The phenomenon of tectonic migration occurs as the result of the westward movement of major active faults and sedimentary-subsidence centers, which is driven by the transformation of the East China Sea Basin from a depression along the continental margin to wide-developed rift. Affected by tectonic migration, the lacustrine source rocks of the Yueguifeng Formation exhibit variations in scale, quality, and hydrocarbon expulsion intensity between the East and West Subsags. The East Subsag features larger scale source rocks of superior quality and higher hydrocarbon expulsion intensity, whereas the West Subsag contains smaller scale source rocks with increased maturity. Additionally, the West Subsag is characterized by the presence of terrestrial marine source rocks of the Lingfeng Formation, which are larger in scale and exhibit higher maturity levels. Therefore, the primary emphasis of the exploration in East Subsag should be directed towards the oil and gas system originating from the hydrocarbon source kitchens of the Yueguifeng Formation, with a predominant focus on oil exploration. Conversely, exploration activities in the West Subsag should encompass a comprehensive evaluation of the two source rock formations, namely the Yueguifeng Formation and the Lingfeng Formation, with a particular

资助项目: 中国海洋石油集团有限公司十四五重大项目“中国近海新区新领域勘探技术”(KJGG2021-0300)

作者简介: 廖计华(1984—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋油气勘探地质研究, E-mail: liaojh2@cnooc.com.cn

收稿日期: 2024-09-03; 改回日期: 2024-09-19. 周立君编辑

emphasis on both oil and gas reservoirs, with gas as a key focal point.

Key words: tectonic migration; source rocks; Yueguifeng Formation; Lishui Sag; East China Sea Basin

构造迁移是指在一定的地球动力环境中, 岩石圈或地壳在特定区域或阶段的构造活动及其相关的各种地质、地球物理、地球化学作用沿一定方向依次有规律的位移^[1-2]。系统查明盆地或凹陷构造迁移特征, 对于深入认识构造-沉积演化规律、系统评价潜在富烃凹陷及优选有利勘探方向至关重要。国内外大量学者针对不同类型盆地构造迁移的特征、成因机制及其动力学过程开展了大量富有成效的研究^[3-4], 并深入探讨了构造迁移对含油气盆地形成与演化、优质烃源岩发育、有利圈闭及油气藏分布等的影响^[5-9]。

中国近海含油气盆地以中生代—新生代断陷盆地为主, 构造迁移往往是多幕裂陷过程中不同裂陷幕的重要转换标志^[10], 并对优质烃源灶及油气资源的分布具有重要控制。例如, 渤海湾盆地东部古近纪叠加太平洋板块俯冲方向变化及郯庐断裂走滑效应, 渤东凹陷和庙西凹陷地层构成、控凹断层活动性以及沉积沉降中心发生从东向西、从南向北的构造迁移^[11]; 东海盆地西湖凹陷晚始新世应力场从前平湖组沉积期的 NW-SE 向转为平湖组沉积期的 NWW-SEE 向, 进而控制沉积中心从凹陷北部迁移至中部^[12]; 珠江口盆地陆丰凹陷古近纪裂陷 I 幕为陆丰南次洼的主裂陷幕、裂陷 II 幕为陆丰北次洼的主裂陷幕, 沉积沉降中心具有从南向北的迁移特征^[13]; 北部湾盆地古新世裂陷期构造应力场发生了顺时针旋转, 控制各凹陷沉积沉降中心具有波浪式定向性、汇聚型偏对称性等迁移特征^[16]。

东海盆地丽水凹陷是中国海油在东海海域寻求储量替代或勘探突破的重要新领域之一。自 1984 年勘探至今, 丽水凹陷相继钻探了 24 口井, 在 1997 年发现丽水 36-1 气田以后未再有商业发现。近 40 年来, 前人主要针对丽水凹陷构造特征及演化、沉积充填与源汇系统、烃源岩及生排烃史等方面开展了大量卓有成效的研究^[14-21], 而关于丽水凹陷构造迁移规律尚未见报道, 对于其构造迁移的成因机制及对油气成藏的影响尚未有详尽阐述。笔者此次基于新采集的三维地震、钻井、古生物及有机地球化学数据, 综合构造-地层格架、控凹断层活动性及垂向演化、沉积沉降中心时空展布等地质信息, 首次揭示丽水凹陷古新世构造及洼陷迁移规律, 探讨丽水凹陷构造迁移的区域动力学背景及成因机制, 并讨论了构造迁移对烃源岩及生烃潜力的

影响, 以期对深化丽水凹陷构造-沉积演化过程认识及油气勘探实践能有所裨益。

1 区域地质概况

东海陆架盆地处于西太平洋板块、印-澳板块与欧亚板块的汇聚地带, 是以晚白垩世—新生代充填为主的中生代—新生代叠合型含油气盆地^[22-23], 整体呈 NNE 向展布, 总面积约 $4.28 \times 10^5 \text{ km}^2$; 盆内隆坳相间配置, 具有明显的“东西分带、南北分块”构造格局。丽水凹陷位于台北坳陷西南缘(图 1), 西邻闽浙隆起区, 东以雁荡凸起与福州凹陷相隔, 南北分别与台西盆地、椒江凹陷相接, 整体呈 NE-SW 走向, 为“东断西超”的脊状断陷^[14, 17], 可划分为丽水西次凹、丽水东次凹和灵峰低凸起等次级构造单元, 总面积约 13000 km^2 , 最大沉积厚度约 11000 m , 现今水深小于 100 m 。

丽水凹陷构造演化从早到晚经历了 4 个阶段^[15-17, 23]: 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—第四纪整体沉降期(T_{20} 至现今), 对应的沉积充填则经历了由陆相到海相的演变(图 2)。钻井及区域地层对比揭示, 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(图 2)。

受构造演化与沉积充填控制, 丽水凹陷古新世断陷期发育了三套两类烃源岩, 分别为月桂峰组湖相烃源岩、灵峰组及明月峰组陆源海相烃源岩。月桂峰组下一中段以棕黑色、深褐色和灰色泥岩夹薄层粉细砂岩为主, 含有丰富的淡水绿藻类化石盘星藻, 月桂峰组上段为浅灰色、灰色、暗灰色、黑灰色泥岩与浅灰色细—中粒砂岩不等厚互层, 泥岩总有机碳含量(TOC)为 $0.53\% \sim 4.08\%$ 、平均为 1.74% , 生烃潜量(S_1+S_2)为 $0.13 \sim 15.29 \text{ mg/g}$ 、平均为 2.70 mg/g , 总体为中等—很好烃源岩, 有机质类型以 II_1-II_2 型

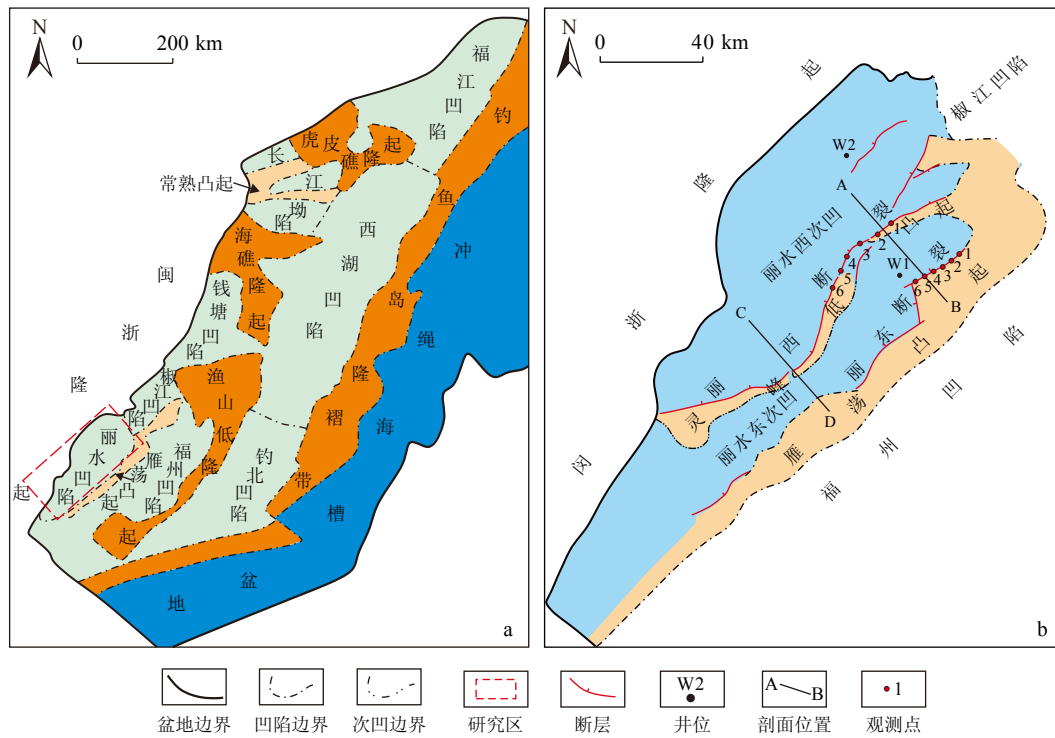


图1 丽水凹陷区域构造位置及凹陷结构

AB和CD为图3中剖面位置,1—6为图5中观测点位置。

Fig.1 Tectonic location and structure of the Lishui Sag

AB and CD indicate the seismic profiles in Fig.3, 1—6 indicate the measured point in Fig.5.

为主。灵峰组以巨厚的灰色、暗灰色、黑灰色泥岩、粉砂质泥岩为主,夹薄层浅灰色含钙粉砂岩、细砂岩和少量薄层钙质细砂岩,泥岩总有机碳含量为0.50%~4.12%,平均为1.25%,生烃潜力为0.07~9.10 mg/g,平均为1.83 mg/g,以中等烃源岩为主,有机质类型以Ⅲ型为主,含少量Ⅱ₂型。明月峰组具有典型的“粗-细-粗”沉积旋回,下部主要为浅灰色—褐灰色钙质粉砂岩和细砂岩,上部为浅灰色、灰白色含砾粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩与灰色、褐灰色泥岩呈不等厚互层,总有机碳含量0.51%~5.97%、平均1.07%,生烃潜力为0.23~16.50mg/g,平均为1.75 mg/g,以中等烃源岩为主,有机质类型以Ⅲ型为主。明月峰组陆源海相烃源岩现今镜质体反射率(R_0)主体在0.7%以下,处于未熟—低熟演化阶段,生烃潜力有限。前人基于有机地球化学、生排烃数值模拟及区域地质研究,普遍认为下古新统月桂峰组湖相烃源岩为丽水凹陷主力烃源岩^[18-20];而油气来源分析表明,丽水36-1气田的天然气和凝析油来源于灵峰组烃源岩,或由灵峰组及月桂峰组烃源岩共同供源^[25-26],因此灵峰组为丽水凹陷另一套重要烃源岩。

丽水凹陷油气显示及油气层主要位于古新统,

始新统中下部瓯江组、温州组可见油气显示,区域上主要发育3套储盖组合^[20]:下部组合以月桂峰组扇三角洲和辫状河三角洲砂岩为储集层,以灵峰组厚层浅海相泥岩为良好区域盖层;中部组合以灵峰组上段三角洲砂岩、明月峰组下段三角洲及海底扇砂岩为储集层,以明月峰组中段浅海相泥岩为区域盖层;上部组合以明月峰组上段和瓯江组三角洲-滨海相砂岩为储集层,以温州组中下部泥岩为区域盖层,以明月峰组上部和瓯江组泥岩为局部盖层。

2 丽水凹陷构造迁移特征

2.1 构造-地层格架特征

本次研究基于二维、三维地震数据,通过井震联合标定及地震精细解释,对丽水凹陷古新统关键地层界面和主要控凹断裂开展综合识别与区域追踪,构建了丽水凹陷古新统构造-地层格架(图3)。

在垂向上,古新统不同层系几何形态及地震波组特征存在明显差异。古新统下部月桂峰组主要分布于洼陷内,而在丽水东次凹和丽水西次凹斜坡区均可见明显削截;其整体呈楔形,受边界断层控

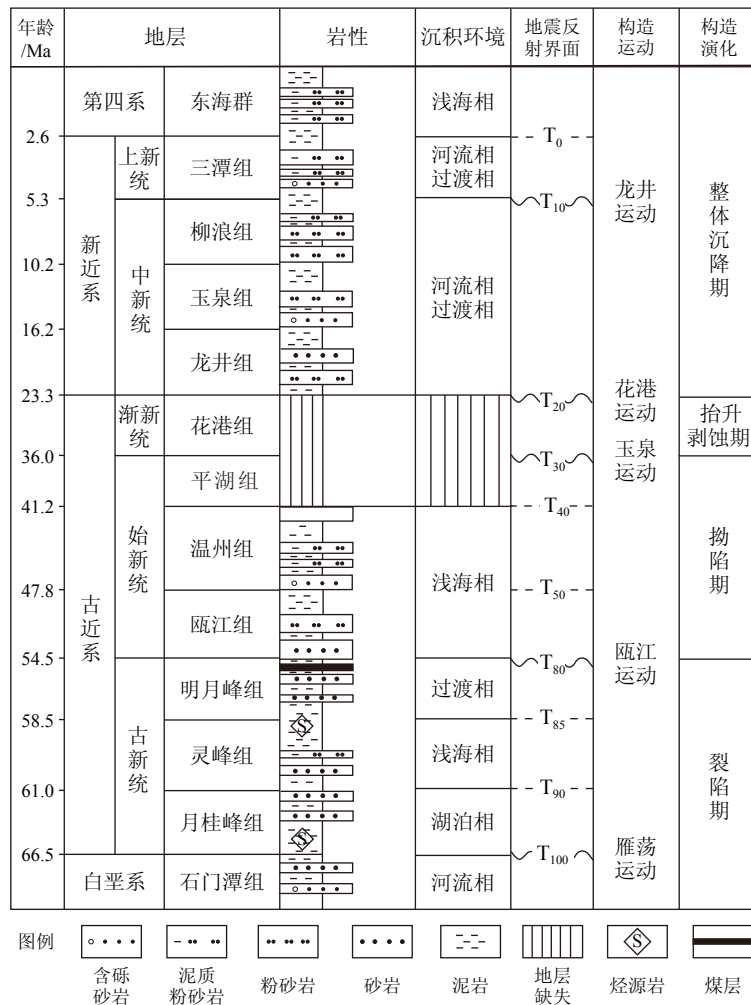


图 2 丽水凹陷地层综合柱状图^[24]

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of the Lishui Sag^[24]

制作用明显,同时洼内次级断裂使得楔形充填结构复杂,洼陷内地震相主要呈现出低频、连续、强反射或中—低频、中等—好连续性、中等振幅反射特征。中古新统灵峰组为整个丽水凹陷内最厚的一套沉积层,在控凹断裂强烈控制下,形成巨厚的楔形沉积,覆盖范围较月桂峰组有所增大,在丽水东次凹和丽水西次凹斜坡区也见明显削截,地震相主要为中—低频、中等—好连续性、中—弱振幅反射。而古新统上部明月峰组整体呈碟形,断控作用明显减弱,地层超覆于灵峰低凸起之上,断拗转换及均一化特征明显,丽水西次凹和丽水东次凹相互连通形成统一凹陷,地震相主要呈现中—高频、较好连续性、变振幅反射特征。

从横向上看,古新统(T₁₀₀—T₈₀)丽水东次凹和丽水西次凹均受控于东侧边界主断层控制的“东断西超”箕状断陷(图 3),其中丽水西次凹基底最大埋深 11 300 m,古新统最大厚度 8 300 m,呈“薄月桂峰组、厚灵峰组”充填结构(图 4a、b);而丽水东次凹

基底最大埋深 7 400 m,古新统最大厚度 4 400 m,地层充填结构与丽水西次凹明显不同,呈现出“厚月桂峰组、薄灵峰组”充填结构(图 4a、b)。由此可知,在月桂峰组沉积期,丽水西次凹和丽水东次凹独立发育,二者断陷作用强度基本相当,丽水东次凹断陷强度略大于丽水西次凹;而到了灵峰组沉积期,丽水西次凹断陷作用强度明显大于丽水东次凹,沉积了巨厚的灵峰组,沉积沉降中心已迁移至丽水西次凹;至明月峰组沉积期,丽水西次凹和丽水东次凹相互连通形成统一凹陷,沉积沉降中心继承性发育并位于丽水西次凹。

2.2 控凹断层发育与演化特征

丽水凹陷内发育两条主控断裂,分别为丽西断裂和丽东断裂,其差异性活动控制了丽水西次凹和丽水东次凹古新世的构造演化过程。

丽西断裂是丽水西次凹和灵峰低凸起的边界断裂,平面延伸距离约 140 km,整体呈“S”形展布,

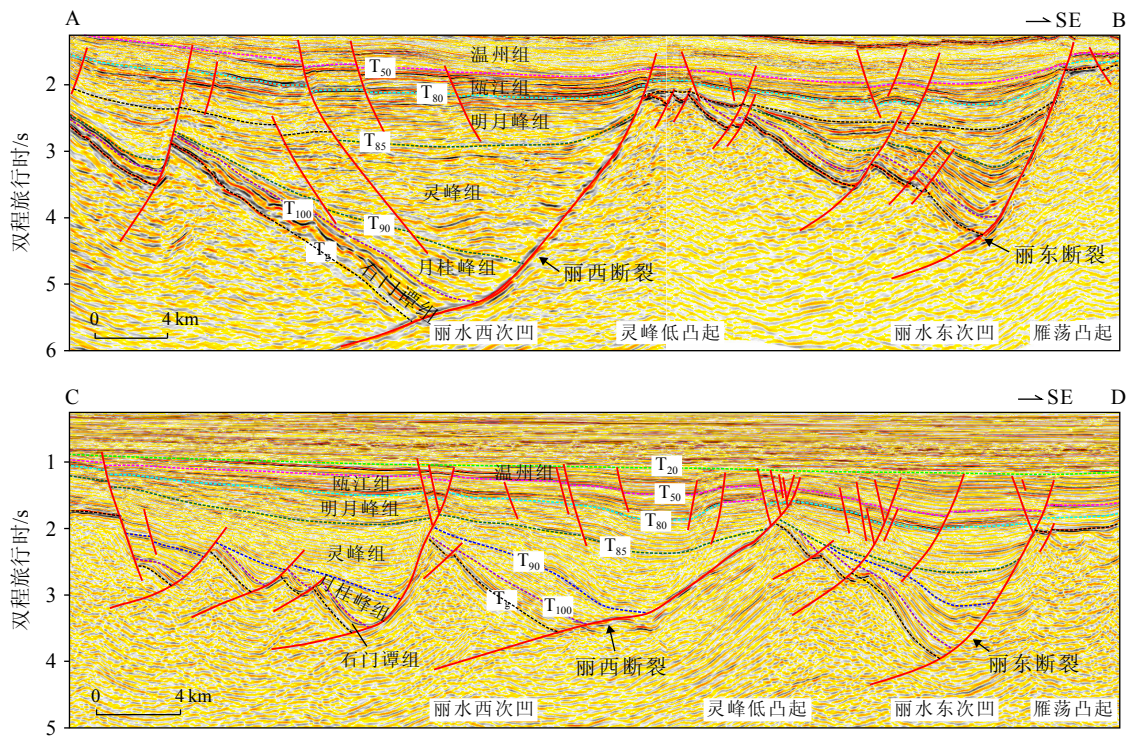


图 3 丽水凹陷结构特征

AB、CD 剖面位置见图 1。

Fig.3 Structural characteristics of Lishui Sag

See Fig.1 for the positions of AB and CD profiles.

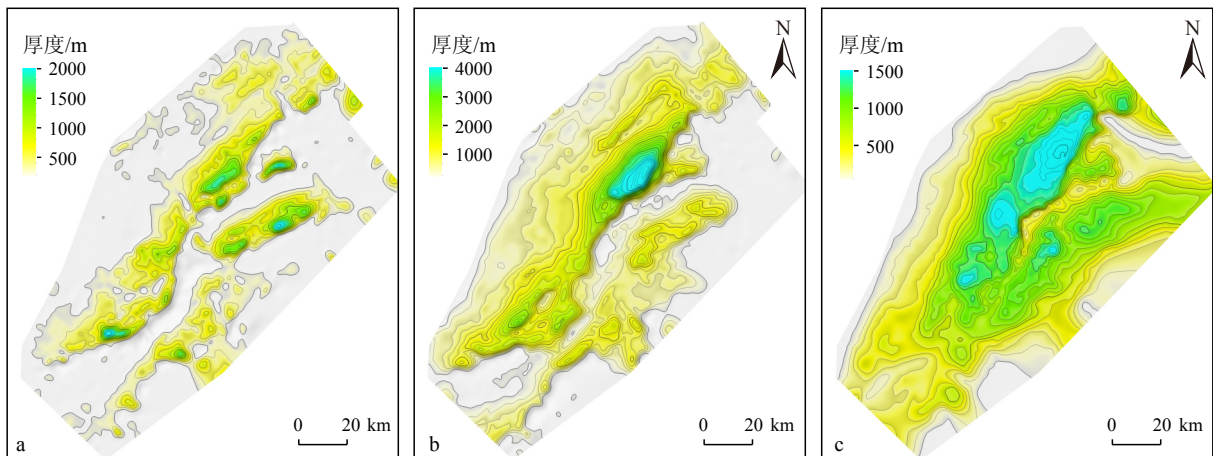


图 4 丽水凹陷月桂峰组 (a)、灵峰组 (b) 和明月峰组 (c) 平面厚度特征

Fig.4 Characteristics of the stratigraphic thickness of the Yueguifeng Formation (a), Lingfeng Formation (b), and Mingyuefeng Formation (c) in Lishui Sag

其中北段和南段为 NE 走向, 中段呈 NNE 走向; 丽西断裂不同分段的剖面形态存在一定差异, 其北段为铲式正断层, 伴生断裂不发育, 而南段也为铲式正断层, 但倾角相对北段变缓, 且在古新统上部及始新统内部发育大量次级断裂, 与主断裂组合形成了似花状构造样式, 显示出丽西断裂局部具有扭动性质。丽东断裂是丽水东次凹和雁荡凸起的边界

断裂, 平面延伸距离约 200 km, 整体呈 NE-SW 向展布; 剖面上主要为铲式正断层, 局部分段发育的次级断裂与主断裂组合形成“Y”字形, 显示以伸展性质为主。

在断裂活动性方面(图 5), 丽西断裂在古新世经历了活动性急剧增强再减弱的过程, 其中月桂峰组沉积期断层活动速率为 143~408 m/Ma, 平均

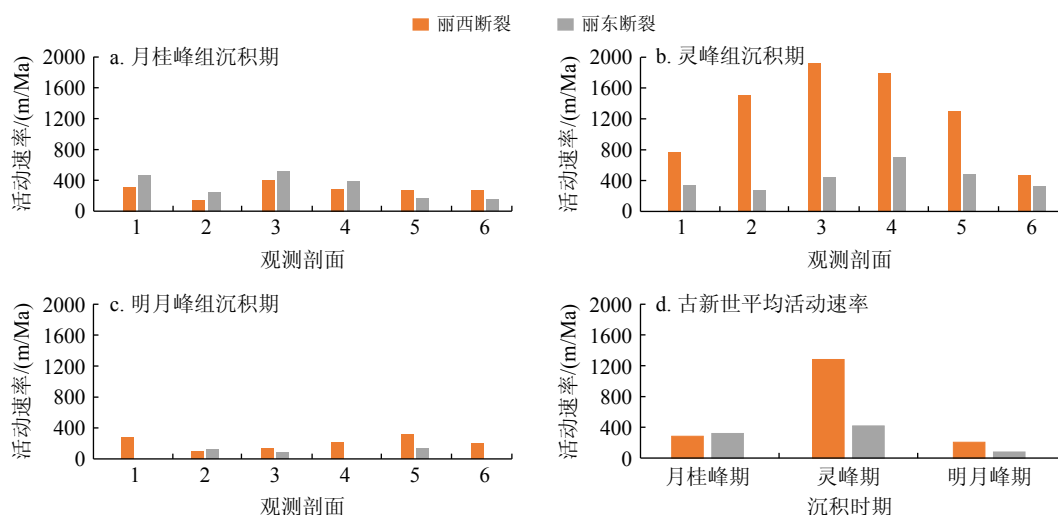


图5 丽水凹陷丽西断裂和丽东断裂古新世活动速率

观测剖面1—6的位置见图1。

Fig.5 Activity rates of the Lixi fault and Lidong fault in the Paleocene Lishui Sag

See Fig.1 for the positions of measured point 1—6.

284 m/Ma; 灵峰组沉积期断层活动速率为 457~1915 m/Ma, 平均 1284 m/Ma; 明月峰组沉积期断层活动速率减弱至 93~280 m/Ma, 平均 206 m/Ma。丽东断裂在古新世也经历了活动性急剧增强再减弱的过程, 其中月桂峰组沉积期断层活动速率为 153~513 m/Ma, 平均 321 m/Ma; 灵峰组沉积期活动速率为 262~690 m/Ma, 平均为 419 m/Ma; 明月峰组沉积期断层活动性减弱至 17~124 m/Ma, 平均为 80 m/Ma(图 5)。两条主干断裂活动性虽然具有相似的演化过程, 但不同时期的相对强弱关系存在转换: 月桂峰组沉积期, 丽西断裂整体活动性略小于丽东断裂, 而灵峰组沉积期两者活动性发生了转换, 丽西断裂垂向活动性远大于丽东断裂, 至明月峰组沉积期丽西断裂活动性仍然较大, 但这种差异已缩小。由此可知, 从古新世早期至古新世中晚期, 两条控凹断层活动性的差异演化控制了丽水凹陷沉积沉降中心自东向西迁移。

2.3 沉积沉降中心迁移特征

丽水凹陷古新世沉积沉降中心具有自东向西、由孤立向统一的迁移规律(图 5)。古新世早期月桂峰组沉积期, 受控于基底先存形态与边界控凹断裂的分段性、差异化强烈活动, 丽水凹陷的东次凹和西次凹均发育多个规模较小的局部沉积中心, 呈 NE 向展布(图 4a), 紧邻控洼断层下降盘, 平面上呈孤立状、强分隔性展布, 丽水东次凹的月桂峰组厚度最大, 最大厚度 2200 m, 而丽水西次凹最大厚度 1900 m; 该阶段丽水东次凹最大厚度大于丽水西次

凹, 表明丽水凹陷沉积沉降中心位于丽水东次凹的东北部。古新世中期灵峰组沉积期(图 4b), 丽水凹陷沉积沉降中心已迁移至丽水西次凹, 沉积中心具有一定继承性, 但其规模均明显增大, 并由孤立趋于连通, 丽水西次凹沉积规模明显大于丽水东次凹; 此时丽水西次凹最大厚度位于北部, 其灵峰组最大厚度约 5000 m, 丽水东次凹最大厚度同样位于北部, 其灵峰组最大厚度约 1700 m, 沉积中心自东向西迁移的同时, 沉降沉降中心长轴方向也由 NE 向转变为 NNE 向, 表明丽西断裂和丽东断裂的分段控制作用急剧减弱。古新世晚期明月峰组沉积期(图 4c), 丽水凹陷沉积沉降中心仍位于丽水西次凹, 丽水西次凹和丽水东次凹早期分隔的沉积中心连通统一, 规模进一步增大, 并趋于均一化, 整体沿 NNE 向展布, 断控作用明显降低, 断拗转换特征明显; 此时丽水西次凹明月峰组最大沉积厚度约 1800 m, 丽水东次凹明月峰组最大沉积厚度约 1500m。

综合构造-地层格架、控凹断层活动性与演化、沉积沉降中心迁移特征可知, 丽水凹陷古新世断陷-沉积中心“自东向西”发生了构造迁移, 即古新世早期断陷-沉积中心位于丽水东次凹, 古新世中期断陷-沉积中心迁移至丽水西次凹, 古新世晚期断陷-沉积中心继承性发育。

3 构造迁移成因探讨

丽水凹陷古新世构造迁移是东海陆架盆地中生代—新生代构造演化的组成部分, 是古太平洋板

块与洋中脊俯冲在东海盆地内的构造响应。

就东海陆架盆地而言,其中生代经历特提斯构造域向太平洋构造域的转变,自侏罗纪以来,先后经历了大陆边缘拗陷期(侏罗纪)、泛裂陷期(白垩纪至古新世)、裂陷迁移期(始新世至今)^[23,27-29]。大陆边缘拗陷期呈拗陷型盆地,地层沉积不受断层控制,沉积中心主要分布于现今福州凹陷,即丽水凹陷东部;而泛裂陷期断控作用增强,丽水、钓北和福州等凹陷内断裂发育、断控沉积作用增强,其中中生界沉积中心位于中部福州凹陷及邻区,古近系沉积中心位于西部丽水凹陷及邻区,即沉积中心发生了自东向西的迁移;裂陷迁移期,盆地主要控凹断裂在泛裂陷期活动断裂的基础上由西向东变化,控制了沉积中心不断向东迁移,即从丽水凹陷所在的西部拗陷带向西湖凹陷所在的东部拗陷带迁移,并进一步向东迁移至冲绳海槽附近^[28-29]。东海陆架盆地构造演化过程受控于(古)太平洋板块后撤式俯冲、印度板块向欧亚板块俯冲碰撞的远程效应以及菲律宾海板块的楔入^[30-33]。

丽水凹陷古新世构造迁移是东海陆架盆地泛裂陷期沉积中心由福州凹陷向西部丽水凹陷迁移演化的组成部分,是多个板块相互作用的结果。然而,古新世早于印度板块与欧亚板块最初的“软碰撞”时间(约 50 Ma)^[30],更早于菲律宾海板块向欧亚板块的俯冲时间(约 23.3 Ma)^[34],因此丽水凹陷构造迁移最可能的控制因素是(古)太平洋板块俯冲。古新世东亚地区主要构造事件是古太平洋板块完全俯冲于东亚大陆之下,太平洋板块取而代之开始俯冲以及古太平洋板块与太平洋板块间的洋中脊俯冲^[35],从时间角度考虑,丽水凹陷古新世构造迁

移与这一区域地质事件相匹配。除丽水凹陷之外,笔者在东海盆地北部长江拗陷古新世也发现了这一迁移特征存在的可能,虽然限于井震资料尚不能完全证实,但也说明构造迁移不仅局限于丽水凹陷,而且很可能是东海盆地西部拗陷带的整体规律,是古太平洋板块以及大洋板块间的洋中脊俯冲在东海盆地内的具体响应。

4 构造迁移对烃源岩及生烃潜力的影响

4.1 对烃源岩规模及分布的影响

构造-沉积作用控制了烃源岩的空间展布和地球化学特征^[36-37]。丽水凹陷古新世断陷-沉积中心“自东向西”迁移控制了凹陷可容纳空间的规律性变化及沉积体系发育与展布,进而影响了月桂峰组湖相烃源岩、灵峰组陆源海相烃源岩在丽水凹陷不同次凹内差异分布。

4.1.1 月桂峰组湖相烃源岩

丽水凹陷古新世早期月桂峰组沉积期处于强烈断陷 I 幕,丽水东次凹断陷强度更大,为整个丽水凹陷的沉积沉降中心。受西部闽浙隆起、东部雁荡凸起及凹陷内部灵峰低凸起供源,丽水凹陷各次洼从陡坡带至缓坡带主要发育陡坡扇/扇三角洲—半深湖—深湖—滨浅湖—辫状河三角洲沉积组合(图 6a);而半深湖—深湖亚相主要发育在深洼区靠近陡坡带一侧。强烈断陷有利于发育半深湖—深湖相沉积环境,从而易于形成厚层细粒湖相泥岩、稳定的水体分层、优越的有机质保存条件,利于优质湖相烃源岩的发育。月桂峰组沉积期,丽水凹陷各个深洼区

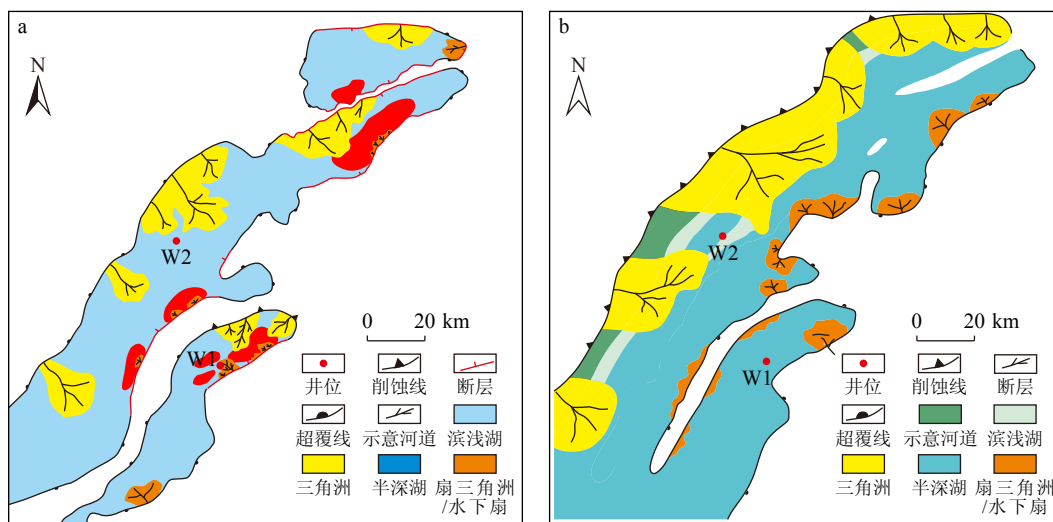


图 6 丽水凹陷月桂峰组 (a) 和灵峰组 (b) 区域沉积相

Fig.6 Sedimentary facies of the Yueguifeng Formation (a) and Lingfeng Formation (b) in the Lishui Sag

处于欠补偿状态, 发育半深-深湖亚相优质烃源岩, 其平面分布与断陷湖盆沉积沉降中心位置一致。

基于钻井及地震相综合识别, 丽水东次凹和丽水西次凹均不同规模发育半深湖-深湖亚相, 在地震上表现为低频连续中-强振幅反射, 其中丽水东次凹半深湖-深湖亚相面积为 186 km², 最大沉积厚度 1950 m, 而丽水西次凹北段半深湖-深湖亚相面积 103 km², 最大沉积厚度 1840 m, 丽水西次凹南段半深湖-深湖亚相面积 92 km², 最大沉积厚度 1230 m。位于丽水东次凹的 W1 井揭示出月桂峰组下段 176 m 深灰色厚层泥岩夹薄层粉砂岩, 泥地比达 86%, 泥岩总有机碳为 1%~3%, 平均为 1.8%, 超过 75% 的样品中 TOC 值 $\geq 1.0\%$, 生烃潜量主体为 2~6 mg/g, 平均为 3.2 mg/g, 总体为好-很好湖相烃源岩; 而位于丽水西次凹的 W2 井揭示了月桂峰组 264.3 m 厚层褐灰色泥岩夹薄层粉砂质泥岩, 泥地比为 100%, 泥岩总有机碳主体为 0.5%~1%, 平均为 0.97%, 超 75% 的样品中 TOC 值 $\leq 1.0\%$, 生烃潜量为 1.5~3 mg/g, 平均为 2.3 mg/g, 整体为中等湖相烃源岩(图 7a)。

4.1.2 灵峰组陆源海相烃源岩

丽水凹陷古新世中期灵峰组沉积期处于强烈断陷 II 幕, 该时期丽水凹陷区域沉积沉降中心迁移至丽水西次凹。受区域海侵影响, 灵峰组为强断陷背景下的海相沉积, 受闽浙隆起、雁荡凸起及灵峰低凸起共同供源, 凹陷内主要发育陡坡扇/扇三角洲-滨浅海-辫状河三角洲沉积组合, 洼陷中心沉积了巨厚的浅海相泥岩(图 6b)。基于丽水凹陷 16 口钻井统计, 丽水西次凹灵峰组烃源岩有机质丰度优

于丽水东次凹, 尤其以丽水西次凹南段有机质丰度最高。在丽水东次凹, 灵峰组泥岩总有机碳主体为 0.5%~1.5%, 平均为 0.96%, 生烃潜量主体为 0.6~2 mg/g, 平均为 1.4 mg/g, 为中等-好烃源岩; 在丽水西次凹北段, 灵峰组泥岩总有机碳主体为 0.8%~1.5%, 平均为 1.2%, 生烃潜量主体为 1.2~2.5 mg/g, 平均为 2.1 mg/g, 为中等-好烃源岩; 在丽水西次凹南段, 灵峰组泥岩总有机碳主体为 1%~2%, 平均为 1.4%, 超过 75% 的样品值 $\geq 1.0\%$, 生烃潜量为 1~3 mg/g, 平均为 1.9 mg/g, 为中等-好烃源岩, 少量为很好烃源岩; 其有机质类型均为 II₂-III 型, 显微组分以镜质组为主(图 7b)。

陆源海相烃源岩的发育受控于陆源有机质的输入及保存条件。灵峰组沉积期, 丽水西次凹断陷作用强烈, 为大型陆源碎屑的注入提供了可容纳空间, 受西部闽浙隆起区大型物源供给, 在西部缓坡带发育大型辫状河三角洲沉积体系, 而近洼陷区更有利于陆源有机质的保存。从灵峰组不同沉积相带泥岩的总有机碳来看, 三角洲前缘和靠近三角洲的浅海相有机质丰度较高, 其 TOC 主体为 1%~2%, 为好烃源岩; 而滨海和远离三角洲的浅海 TOC 主体为 0.5%~1%, 为中等烃源岩。因此, 三角洲前缘和近三角洲的浅海为灵峰组陆源海相好烃源岩的有利沉积相带。

综上所述, 丽水凹陷受控于古新世断陷-沉积中心“自东向西”迁移, 对于月桂峰组湖相烃源岩而言, 丽水东次凹湖相烃源岩的规模、品质均明显优于丽水西次凹; 而对于灵峰组陆源海相烃源岩而

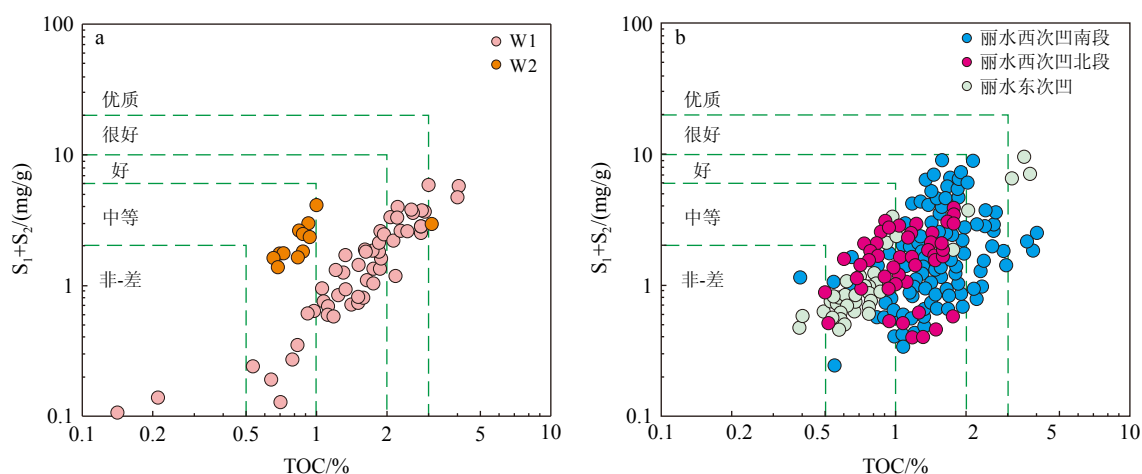


图 7 丽水凹陷 W1、W2 井月桂峰组 (a) 和灵峰组 (b) 烃源岩有机质丰度
W1、W2 井位置见图 1。

Fig.7 Organic matter abundance of the source rock in Yueguifeng Formation (a) and Lingfeng Formation (b) in well W1 and well W2 in Lishui Sag

See Fig.1 for the locations of well W1 and W2.

言,丽水西次凹陆源海相烃源岩的规模、品质均明显优于丽水东次凹,尤其以丽水西次凹南段的灵峰组烃源岩品质最好。

4.2 对油气生烃潜力的影响

构造迁移对丽水凹陷两套烃源岩的热演化程度及油气资源的分布也具有明显控制作用。随着古新世断陷-沉积中心“自东向西”迁移,导致丽水西次凹强烈沉降、整体埋深大,烃源岩的热演化程度与丽水东次凹更高。从丽水凹陷月桂峰组和灵峰组烃源岩镜质体反射率(R_o)模拟结果来看,两套烃源岩热演化程度整体表现出“西高东低、北高南低”,不同洼陷、不同层系烃源岩成熟度存在差异,即不同洼陷烃源灶规模及生烃潜力存在差异。月桂峰组、灵峰组烃源岩成熟度从洼陷中心向凹陷边缘呈环带状降低,丽水东次凹和丽水西次凹主体均进入成熟阶段($R_o > 0.5\%$),凹陷中心已进入高熟—过熟阶段($R_o > 1.3\%$),为凝析油、湿气、干气生成阶段,而凹陷周边以成熟阶段为主,为液态烃生成阶段。整体而言,无论是月桂峰组还是灵峰组,丽水西次凹烃源岩热演化程度高于丽水东次凹(图8)。

进一步利用 Trinity 软件模拟了丽水凹陷月桂峰组、灵峰组烃源岩的排烃潜力。从烃源岩排烃强度来看,丽水东次凹月桂峰组烃源岩排烃强度为 $0 \sim 0.27$ 亿方/ km^2 ,均值为 0.04 亿方/ km^2 ,灵峰组烃源岩排烃强度为 $0 \sim 0.05$ 亿方/ km^2 ,均值为 0.01 亿方/ km^2 ;丽水西次凹月桂峰组烃源岩排烃强度 $0 \sim 0.79$ 亿方/ km^2 ,均值为 0.05 亿方/ km^2 ;灵峰组烃

源岩排烃强度为 $0 \sim 0.09$ 亿方/ km^2 ,均值为 0.03 亿方/ km^2 (图9)。对不同层系而言,月桂峰组油气兼生,是主要的排烃层系,而灵峰组以排气为主;丽水凹陷排油量 100% 来自月桂峰组,排气量 60.3% 来自月桂峰组,39.7% 来自灵峰组。

4.3 对有利油气勘探方向的影响

构造迁移影响了烃源岩发育规模与生烃潜力,进而导致丽水凹陷两个次凹的油气相态、资源规模和油气富集层系的差异。仅从烃源灶的规模来看,丽水西次凹月桂峰组和灵峰组烃源灶的规模均明显大于丽水东次凹,因此丽水西次凹资源规模大于丽水东次凹。具体来说,丽水东次凹月桂峰组半深湖亚相烃源岩规模较大、成熟度高、排烃强度较大,而灵峰组烃源岩规模较小、排烃强度小,因此其油气勘探应聚焦以月桂峰组烃源灶为主的含油气系统,以找油为主;丽水西次凹月桂峰组半深湖亚相烃源岩规模小于东次凹,但叠加了灵峰组规模较大、且高成熟度的陆源海相烃源岩,因此其油气勘探应综合考虑以月桂峰组烃源灶为主和以灵峰组烃源灶为主的两套含油气系统,油气兼生,以气为主,找气潜力较大,尤其是月桂峰组烃源灶和灵峰组烃源灶叠合的区带,供烃条件最为有利。此外,丽水西次凹两套烃源岩埋深大,发育超压,具有较高的供烃动力,在综合考虑输导体系、储盖组合的基础上,应聚焦多层系立体勘探;而丽水东次凹月桂峰组湖相烃源岩埋深较西次凹浅,供烃动力较低,且受灵峰组厚层浅海相泥岩垂向封盖,因此以

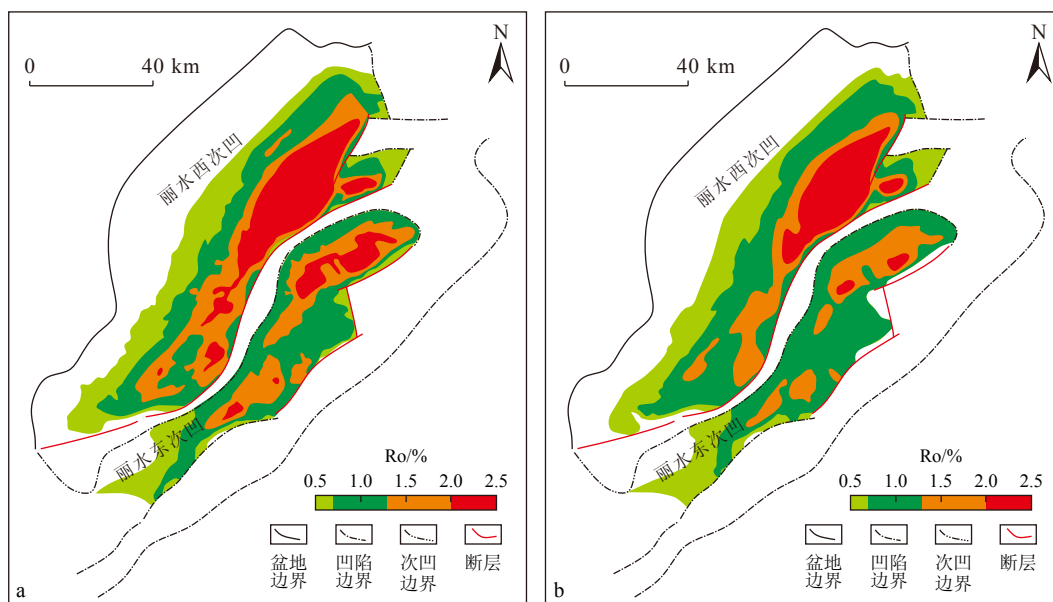


图8 丽水凹陷月桂峰组(a)和灵峰组(b)烃源岩现今成熟度平面分布

Fig.8 Distribution of current maturity (R_o) of source rocks in Yueguifeng Formation (a) and Lingfeng Formation (b) of Lishui Sag

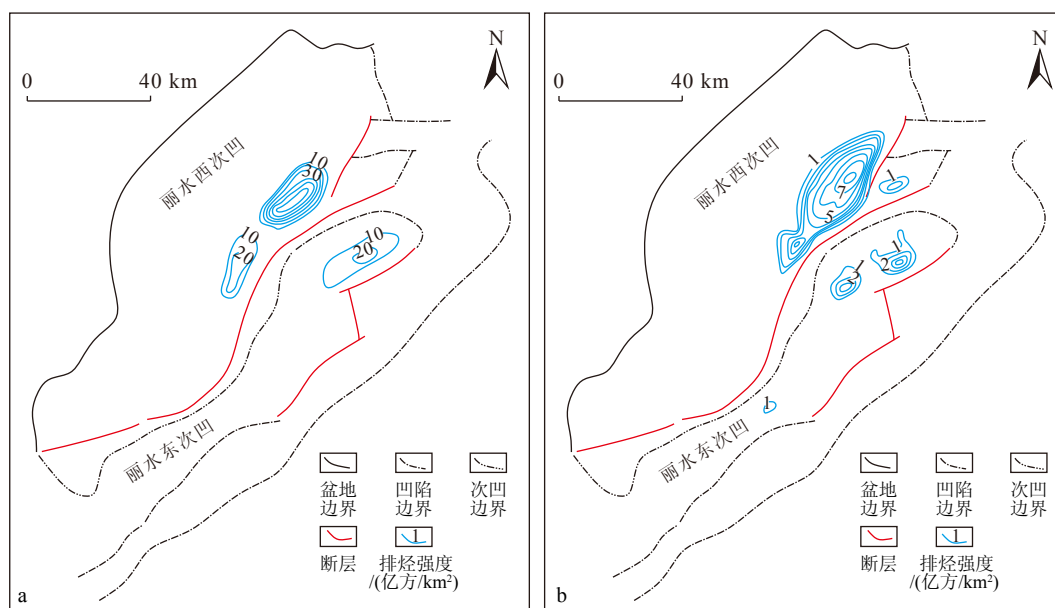


图9 丽水凹陷月桂峰组 (a) 和灵峰组 (b) 烃源岩排烃强度

Fig.9 Source rock expulsion intensity of Yueguifeng Formation (a) and Lingfeng Formation (b) in Lishui Sag

源内或近源层系为主要勘探目的层。

5 结论

(1) 丽水凹陷古新世断陷-沉积中心发生“自东向西”迁移,即区域沉积沉降中心在古新世早期位于丽水东次凹、古新世中期迁移至丽水西次凹、古新世晚期继承性发育;丽水东次凹呈“厚月桂峰组、薄灵峰组”充填结构,而丽水西次凹为“薄月桂峰组、厚灵峰组”充填结构。

(2) 丽水凹陷古新世构造迁移是东海陆架盆地由大陆边缘坳陷向泛裂陷演化过程中引起主要活动断裂及沉积沉降中心向西迁移的结果,其动力来源最可能是古新世古太平洋板块以及大洋板块间的洋中脊俯冲。

(3) 受构造迁移影响,丽水东次凹月桂峰组湖相烃源岩规模较大,品质较好,排烃强度较大,而丽水西次凹发育规模较小,成熟度较高的月桂峰组湖相烃源岩,并叠加灵峰组规模较大、高成熟度的陆源海相烃源岩;丽水东次凹应聚焦以月桂峰组烃源灶为主的含油气系统进行勘探,以找油为主,而丽水西次凹油气勘探应综合考虑月桂峰组或灵峰组两套烃源灶,且油气兼生、以气为主。

参考文献 (References)

[1] 任纪舜,姜春发,张正坤,等. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 124. [REN Jishun, JIANG Chunfa, ZHANG

Zhengkun, et al. Geotectonics and evolution in China [M]. Beijing: Science Press, 1980: 124.]

- [2] 姜春发,朱松年. 构造迁移论概述 [J]. 中国地质科学院院报, 1992, 13(1): 1-14. [JIANG Chunfa, ZHU Songnian. Introduction to tectonic migration theory[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1992, 13(1): 1-14.]
- [3] 王同和. 中国东部含油气盆地的构造迁移 [J]. 中国科学: B辑, 1988(12): 1314-1322. [WANG Tonghe. Tectonic migration of petroliferous basins in eastern China[J]. Scientia Sinica: Series B, 1988(12): 1314-1322.]
- [4] Wang P C, Li S Z, Suo Y H, et al. Plate tectonic control on the formation and tectonic migration of Cenozoic basins in northern margin of the South China Sea[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(4): 1231-1251.
- [5] 夏斌,吕宝凤,吴国干,等. 南海北部新生代盆地构造迁移及其对烃源岩的制约作用 [J]. *天然气地球科学*, 2007, 8(5): 629-634. [XIA Bin, LV Baofeng, WU Guogan, et al. The Cenozoic tectonic transport and its control on the source rock in the Northern South China Sea[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 8(5): 629-634.]
- [6] 胡望水,吴婵,梁建设,等. 北部湾盆地构造迁移特征及对油气成藏的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(6): 920-927. [HU Wangshui, WU Chan, LIANG Jianshe, et al. Tectonic transport characteristics and their influences on hydrocarbon accumulation in Beibuwan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(6): 920-927.]
- [7] 蔡少武,吕丁友,贺电波,等. 渤海湾盆地秦南凹陷构造迁移特征及其对油气聚集的影响 [J]. *石油学报*, 2019, 40(S2): 67-78. [CAI Shaowu, LV Dingyou, HE Dianbo, et al. Characteristics of tectonic migration in Qinnan sag of the Bohai Bay Basin and its impact on hydrocarbon accumulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S2): 67-78.]
- [8] 施和生,杜家元,梅廉夫,等. 珠江口盆地惠州运动及其意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 447-461. [SHI Hesheng, DU Jiayuan, MEI Lianfu, et al. Huizhou Movement and its significance in Pearl

- River Mouth Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 447-461.]
- [9] Chanvry E, Deschamps R, Joseph P, et al. The influence of intrabasin tectonics in the stratigraphic evolution of piggyback basin fills: towards a model from the Tremp-Graus-Ainsa Basin (South-Pyrenean Zone, Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 377: 34-62.
- [10] 林畅松, 刘景彦, 张英志, 等. 构造活动盆地的层序地层与构造地层分析—以中国中、新生代构造活动湖盆分析为例 [J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 365-374. [LIN Changsong, LIU Jingyan, ZHANG Yingzhi, et al. Sequence stratigraphy and tectono-stratigraphic analysis of tectonically active basins: A case study on the Cenozoic-Mesozoic lacustrine basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 365-374.]
- [11] 吴克强, 吴景富, 刘丽芳, 等. 构造迁移及其对油气成藏的影响—以渤海渤东、庙西凹陷为例 [J]. *中国海上油气*, 2014, 26(2): 6-11. [WU Keqiang, WU Jingfu, LIU Lifang, et al. Tectonic transport and its impact on hydrocarbon accumulation: two cases of Bodong and Miaoxi sag[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(2): 6-11.]
- [12] 祁鹏, 郭刚, 任亚平, 等. 西湖凹陷始新世平湖运动的地质表征及其油气地质意义 [J]. *现代地质*, 2021, 35(4): 1081-1105. [QI Peng, GUO Gang, REN Yaping, et al. Geological characterization of the Eocene Pinghu Movement in the Xihu Sag and its hydrocarbon geological significance[J]. *Geoscience*, 2021, 35(4): 1081-1105.]
- [13] 柳广弟, 牛子铖, 陈哲龙, 等. 珠江口盆地陆丰凹陷在洼陷迁移控制下的油气成藏规律 [J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 26-40. [LIU Guangdi, NIU Zicheng, CHEN Zhelong, et al. Hydrocarbon accumulation patterns controlled by the migrated subsags in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 40(S1): 26-40.]
- [14] 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]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 35(4): 441-448.]
- [15] 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.]
- [16] 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.]
- [17] 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]. *地质科技通报*, 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.]
- [18] 仝志刚, 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.]
- [19] 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.]
- [20] 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.]
- [21] 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.]
- [22] 李三忠, 臧艺博, 王鹏程, 等. 华南中生代构造转换和古太平洋俯冲启动 [J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 213-225. [LI Sanzhong, ZANG Yibo, WANG Pengcheng, et al. Mesozoic tectonic transition in South China and initiation of Palaeo-Pacific subduction[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 213-225.]
- [23] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化 [J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 675-691. [LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 675-691.]
- [24] 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.]
- [25] 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. [QIN Jun, ZHANG Yingzhao, LIU Jinshui, et al. Hydrocarbon accumulation process and main controlling factors of Paleocene L Gas Field in Lishui-Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(4): 605-617.]
- [26] 孙玉梅, 席小应. 东海盆地丽水凹陷油气源对比与成藏史 [J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(6): 24-28. [SUN Yumei, XI Xiaoying. Petroleum reservoir filling history and oil source correlation in the Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(6): 24-28.]
- [27] 索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2602-2618. [SUO Yanhui, LI Sanzhong, DAI Liming, et al. Cenozoic tectonic migration and basin evolution in East Asia and its continental margins[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2602-2618.]

- [28] 蒋一鸣, 何新建, 张绍亮. 东海陆架盆地“反转-改造”构造迁移演化特征—以西湖凹陷边缘构造为例 [J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2016, 13(26): 1-8. [JIANG Yiming, HE Xinjian, ZHANG Shaoliang. The characteristics of "inverse-transform" tectonic migration evolution of the East China Sea Shelf Basin - by taking the marginal structure of Xihu Sag for example[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(26): 1-8.]
- [29] 钟锴, 朱伟林, 高顺莉, 等. 东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题 [J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3485-3497. [ZHONG Kai, ZHU Weilin, GAO Shunli, et al. Key geological questions of the formation and evolution and hydrocarbon accumulation of the East China Sea Shelf Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3485-3497.]
- [30] Hinsbergen D V, Peter L, Guillaume D N, et al. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(20): 7659-7664.
- [31] 包汉勇, 郭战峰, 张罗磊, 等. 太平洋板块形成以来的中国东部构造动力学背景 [J]. 地球科学进展, 2013, 28(3): 337-338. [BAO Hanyong, GUO Zhanfeng, ZHANG Luolei, et al. Tectonic dynamics of eastern China since the formation of the Pacific plate[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(3): 337-338.]
- [32] Zhu R X, Zhang H F, Zhu G, et al. Craton destruction and related resources[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(7): 2233-2257.
- [33] 朱光, 刘程, 顾承串, 等. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示 [J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(4): 415-435. [ZHU Guang, LIU Cheng, GU Chengchuan, et al. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the TanLu Fault Zone. *Science China Earth Sciences*, 2018, 48(4): 415-435.]
- [34] 周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示 [J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 1-10. [ZHOU Xinhuai, JIANG Yiming, TANG Xianjun. Tectonic setting, prototype basin evolution and exploration enlightenment of Xihu sag in East China Sea Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(3): 1-10.]
- [35] Tsung-Jui Wu J, Wu J. Izanagi-Pacific ridge subduction revealed by a 56 to 46 Ma magmatic gap along the northeast Asian margin[J]. *Geology*, 2019, 47(10): 953-957.
- [36] 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.]
- [37] 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. [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.]