

李林致, 李婧婧, 廖计华, 等. 东海陆架盆地丽水-椒江凹陷灵峰组海相烃源岩发育主控因素及分布特征[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(2): 21-29.

LI Linzhi, LI Jingjing, LIAO Jihua, et al. Controlling factors and distribution characteristics of marine source rocks in the Lingfeng Formation of the Lishui-Jiaojang Sag in the East China Sea Shelf Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(2): 21-29.

东海陆架盆地丽水-椒江凹陷灵峰组海相烃源岩发育主控因素及分布特征

李林致, 李婧婧, 廖计华, 郭刚, 王欣, 李峰

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 东海陆架盆地丽水-椒江凹陷古新统烃源岩的研究主要集中在月桂峰组湖相烃源岩, 而对于灵峰组海相优质烃源岩的形成条件与分布规律尚不明确。综合利用地质、地球化学和古生物等资料, 在烃源岩有机地球化学特征分析的基础上, 探讨了丽水-椒江凹陷灵峰组海相烃源岩发育的主控因素, 并对烃源岩的形成模式和分布进行了探究。结果表明, 丽水-椒江凹陷灵峰组发育中等—好级别的陆源海相烃源岩, 内部不同洼陷具有较强的非均质性; 烃源岩的发育受古生产力、陆源输入和水体条件等因素的综合影响。平面上, 丽水-椒江凹陷灵峰组海相烃源岩的规模和质量与该区三角洲-滨浅海的沉积环境密切相关。三角洲前缘和近三角洲的浅海相带陆源有机质输入量大, 在弱氧化—弱还原环境下发育高丰度烃源岩, 是灵峰组好烃源岩发育的有利相带。

关键词: 丽水-椒江凹陷; 灵峰组; 海相烃源岩; 主控因素; 陆源有机质输入

中图分类号: P736; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.056

0 引言

丽水-椒江凹陷是东海盆地西南侧重点油气勘探地区之一^[1-2]。该区域自 20 世纪 70 年代初开始油气勘探, 已发现多个含油气构造, 建成 1 个小型气田(L 气田)^[3]。但近年来, 丽水-椒江凹陷始终未获突破性进展, 多口钻井均失利。从源控论^[4]的角度来看, 对丽水-椒江凹陷烃源岩发育和分布的认识直接影响了该区的进一步勘探。丽水-椒江凹陷钻井揭示了主力烃源岩为下古新统月桂峰组湖相泥岩, 而发育在湖相泥岩之上的海相层系烃源岩被认为是次要的烃源岩, 未受到太多重视。然而, 随着近年来油气勘探的深入, 覃军等^[3]根据成藏背景、

烃类气分析化验资料, 认为 L 气田的烃类气来自灵峰组, 为局限于浅海背景的前三角洲区弱氧化环境下由少量陆源有机质与藻类共同贡献母质形成的; 郭永等^[5]从油气标志性特征和成藏规律的角度提出, L 构造的凝析油气藏形成至少经历了 2 个成藏期, 古油藏油气的主要贡献者是月桂峰组烃源岩, 现今油气藏的凝析油主要来自灵峰组烃源岩。因此, 灵峰组海相烃源岩的发育主控因素及分布逐渐受到关注。关于海相优质烃源岩形成的主控因素, 早在 20 世纪 80 年代就有学者^[6-7]围绕“生产力”和“保存条件”2 大要素开展了讨论, 但由于各个地区基础地质条件的不同, 有机质生产和保存条件如何叠加控制海相烃源岩的分布存在较大差异。受限于勘探程度与研究历史, 前人对丽水-椒江凹陷烃源岩的研究主要集中在下古新统月桂峰组湖相烃源岩, 而对中古新统灵峰组海相烃源岩发育特征、空间展布与发育模式等均不清楚。因此, 本文基于已钻遇灵峰组烃源岩的地球化学特征, 从古生产力、生源输入和水体条件方面研究海相烃源岩的成因,

收稿日期: 2024-03-07

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

并结合地质认识,探讨海相烃源岩发育的主要控制因素,预测海相烃源岩发育的有利区域,以期为盆地油气勘探决策提供科学依据。

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,总体呈 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”的半地堑凹陷^[8](图 1)。其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^[9],总面积约 $1.7 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。

区域研究表明,丽水-椒江凹陷构造演化复杂,晚白垩纪至今经历了裂陷、拗陷、抬升剥蚀和整体沉降 4 个构造演化阶段^[10]。晚白垩世—古新世为裂陷期,断裂活动活跃,充填有古新统月桂峰组、灵峰组和明月峰组地层。下古新统月桂峰组为陆相三角洲-湖泊沉积地层,中古新统灵峰组是一套海进环境下形成的滨浅海相沉积地层,上古新统明月峰组为一套海退环境下的滨浅海-三角洲相沉积^[11]。始新世—渐新世为拗陷期,期间断裂不发育,仅有少数继承性断裂且活动性弱,对沉积的控制作用不明显,充填瓯江组和温州组三角洲-滨浅海相地层。始新世末期—渐新世末期为抬升剥蚀期,经历了始

新世末期的玉泉运动和渐新世末期的花港运动,造成丽水-椒江凹陷整体缺失始新统平湖组、渐新统花港组地层。之后,丽水-椒江凹陷进入整体沉降期,在新近系—第四系大范围沉积了滨-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地层。已钻井揭示,丽水-椒江凹陷共有 15 口井钻遇中古新统灵峰组,整体为一套海相暗色泥岩,能够有效生烃,是本次研究的主要层段。该时期丽水-椒江凹陷受内部凸起的分割,依据灵峰组古地貌特征,可在丽水-椒江凹陷内部划分出椒江 A 洼、丽水 A 洼、丽水 B 洼和丽水 C 洼 4 个互不连通的次洼。

2 灵峰组烃源岩有机地球化学特征

有机质丰度、类型和成熟度是评价烃源岩生烃能力的重要参数^[12]。灵峰组烃源岩为海进环境下的陆源海相地层,因此,选用陆源烃源岩有机质分级评价标准^[13](表 1)对丽水-椒江凹陷 15 口井 321 个泥岩样品烃源岩有机质丰度进行评价。丽水-椒江凹陷灵峰组暗色泥岩 TOC 含量分布范围主要介于 0.5%~2%, S1+S2 分布范围主要介于 0.5~4 mg/g, 氯仿沥青“A”普遍 > 0.05%, 总体为中等—好烃源岩(图 2a)。利用岩石热解实验中的氢指数(HI)和

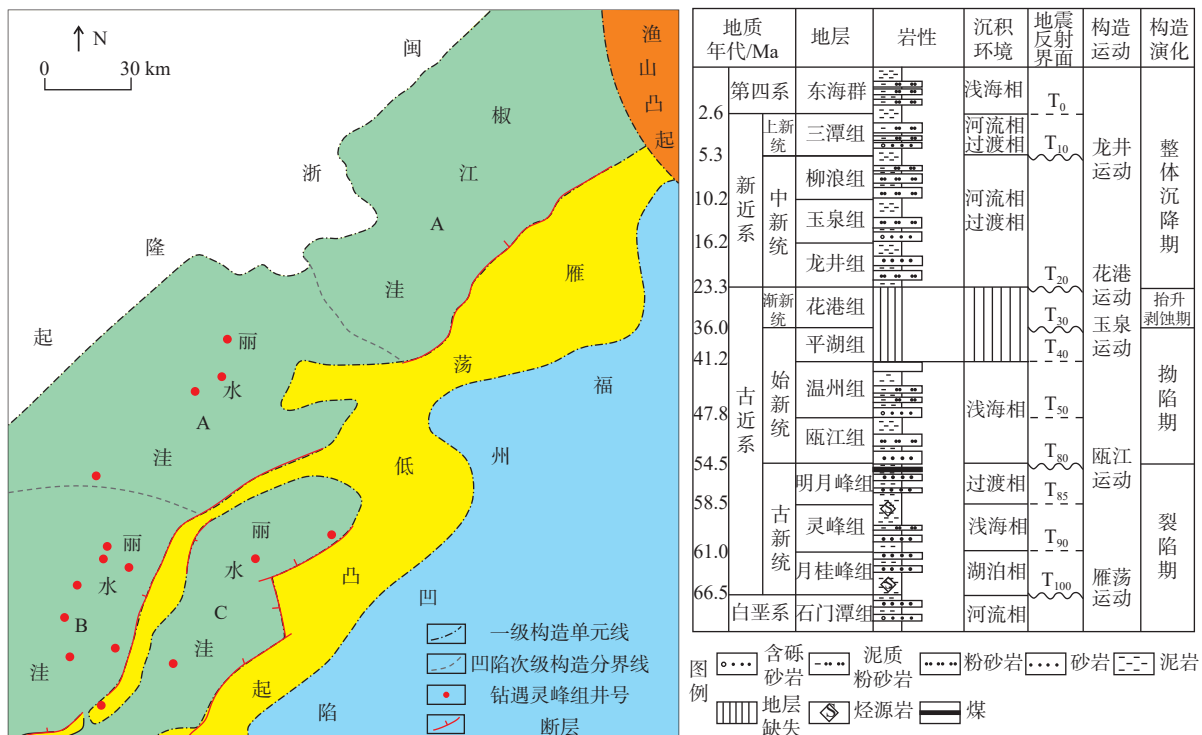


图 1 丽水-椒江凹陷区域构造概况及地层综合柱状图

Fig.1 Regional tectonic background and stratigraphic-sedimentary histogram of Lishui-Jiaojiang Sag

表 1 淡水—半咸水环境下陆源烃源岩有机质丰度评价指标^[13]

Table 1 Evaluation indicators to organic matter abundance of terrestrial source rocks in freshwater brackish water environments^[13]

指标	生油岩类型				
	非生油岩	差	中	好	很好
TOC/%	<0.4	0.4~0.6	0.6~1	1~2	>2
“A”/%	<0.015	0.015~0.05	0.05~0.1	0.1~0.2	>0.2
(S1+S2)/(mg/g)	-	<2	2~6	6~20	>20

注：“TOC”代表烃源岩残余有机碳含量；“A”代表烃源岩残余氯仿沥青“A”含量；“S1+S2”代表烃源岩生烃潜量(烃质量/岩石质量)

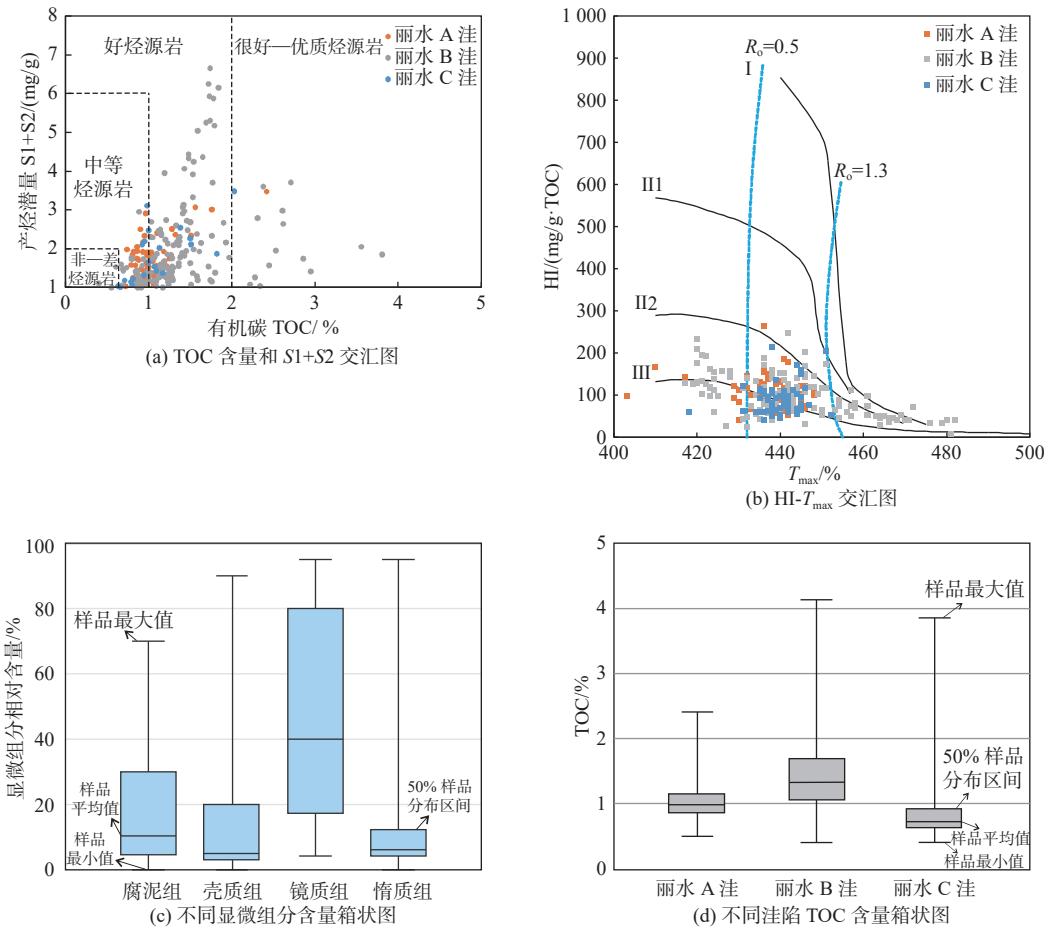


图 2 丽水-椒江凹陷灵峰组烃源岩地球化学参数

Fig.2 Geochemical parameters of source rocks in Lingfeng Formation of Lishui-Jiaojiang Sag

最高热解峰温($T_{\max}$)数据投点可判断烃源岩有机质类型。灵峰组烃源岩有机质类型以Ⅱ2-Ⅲ型为主(图2b),有机质主要来源于陆生高等植物。从有机质组成来看,灵峰组烃源岩显微组分以镜质组为主,同样说明有机质主要来源于陆生高等植物(图2c)。反映烃源岩有机质成熟度的镜质体反射率(R_0)参数显示,灵峰组烃源岩现今 R_0 值普遍 $>0.7\%$,处于主要生油期($0.7\%<R_0<1.3\%$),已经大量生烃。平面上,丽水-椒江凹陷钻遇灵峰组的海相泥岩样品集中分布在丽水A洼、丽水B洼和丽水C洼,椒江A洼没有井钻遇灵峰组地层。其中,丽水B洼有机质丰度相对较高,其次为丽水A洼和丽水C洼

(图2d),3个洼陷的有机质类型相似。

3 灵峰组烃源岩发育主控因素

3.1 古生产力

古生产力是指单位时间里海洋中所生成的有机物质总量,反映了生物在地质历程中通过能量循环过程固定能量的速率^[14-15],是烃源岩形成和发育的重要物质基础。一些微量元素蕴含着烃源岩形成的重要信息^[16],目前常用于确定古生产力。镍、铜、锌等金属元素含量与生产力水平有着密不可分

的关系,其强烈富集暗示曾有较高含量的有机质将其大量带到沉积物中,随后在还原条件下,沉积物中的镍、铜、锌被保存下来^[17],因此可作为指示古生产力水平高低的元素替代指标^[18]。然而环境中镍、铜、锌元素的来源除了生物以外还受陆源输入的影响。因此,本次通过引入反映陆源输入的 Ti 元素,利用澳大利亚后太古代平均页岩(PAAS)中微量元素含量(表 2)对样品微量元素含量进行 Ti 校正,来扣除陆源输入对镍、铜、锌含量的影响。

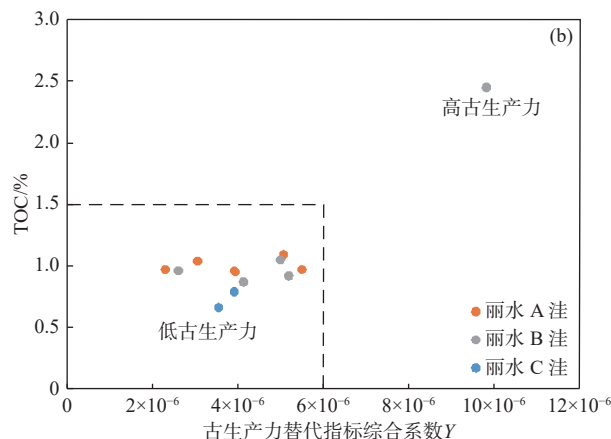
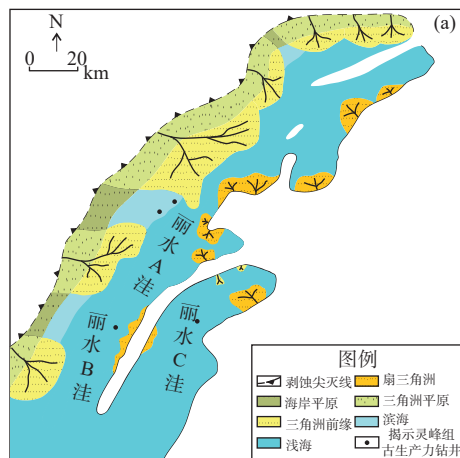
表 2 PAAS 的 Ti、Ni、Cu、Zn 含量^[17]
Table 2 Ti, Ni, Cu, Zn contents of PAAS^[17]

元素	Ti	Ni	Cu	Zn
PAAS/(μg/g)	5 995	75	60	80

校正公式为^[19]

$$w_{(X生物)} = w_{(X总量)} \times w_{(Ti总量)} \times \left[\frac{w_{(X)}/w_{(Ti)}}{[w_{(X)}/w_{(Ti)}]_{PAAS}} \right] \quad (1)$$

式中: $w_{(X生物)}$ 为样品中 X 元素的生物含量, $\mu\text{g/g}$;
 $w_{(X总量)}$ 为样品中 X 元素的测定总含量, $\mu\text{g/g}$;
 $w_{(Ti总量)}$ 为样品中 Ti 元素的测定总含量, $\mu\text{g/g}$;



(a) 古生产力钻井分布; (b) 古生产力指标综合系数与 TOC 的关系

图 3 丽水-椒江凹陷灵峰组古生产力替代指标综合系数与 TOC 关系

Fig.3 Relationship between the comprehensive coefficient of paleo-productivity substitution indicator and TOC in the Lingfeng Formation of Lishui-Jiajiang Sag

3.2 陆源输入

丽水-椒江凹陷灵峰组受构造运动及全球海平面变化影响,整体为一套海相沉积,其西侧闽浙隆起带和东侧雁荡低凸起向凹陷内继承性持续供源,发育了规模性三角洲沉积,带来一定的有机质输入,进而影响烃源岩发育。

丽水-椒江凹陷灵峰组烃源岩萘烷和甾烷生物

$[w_{(X)}/w_{(Ti)}]_{PAAS}$ 为新太古代澳大利亚页岩中 X 元素与 Ti 元素平均含量的比值。

利用校正后的 $w_{(Ni生物)}$ 、 $w_{(Cu生物)}$ 、 $w_{(Zn生物)}$, 根据计算关系式得到古生产力替代指标综合系数 Y ^[18]。

$$Y = 0.610\,962 \times w_{(Zn生物)} + 0.593\,955 \times w_{(Cu生物)} + 0.523\,396 \times w_{(Ni生物)} \quad (2)$$

根据丽水-椒江凹陷灵峰组古生产力替代指标综合系数 Y 与有机质丰度 TOC 之间的关系(图 3), 建立灵峰组水体古生产力评价标准。当综合系数 $Y \geq 6 \times 10^{-6}$ 时, 烃源岩有机质丰度高, 指示水体具有高古生产力; 当综合系数 $Y < 6 \times 10^{-6}$ 时, 烃源岩有机质丰度中等, 指示古生产力低。丽水 B 洼与丽水 C 洼样品点分布在远离三角洲的浅海相带, 古生产力水平整体较低, 揭示水生生物对灵峰组烃源岩的贡献较小, 仅在丽水 B 洼局部有少量高古生产力的出现; 丽水 A 洼样品点集中在滨海相带, 受沉积相带影响, 古生产力水平低。

标志物分布特征显示, 菌藻类生源产物三环萘烷含量相对较低, 指示高等植物生源输入的标志化合物奥利烷(OL)含量较高, C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷中反映陆相有机质输入来源的 C_{29} 为主峰, 指示了丽水-椒江凹陷灵峰组陆源有机质的大量输入(图 4)。

国际上众多科学家利用正构烷烃的链长分布及各项参数指标来指示沉积有机质的来源, 并用其进行一定的应用研究^[20], 有利于对有机质输入来源

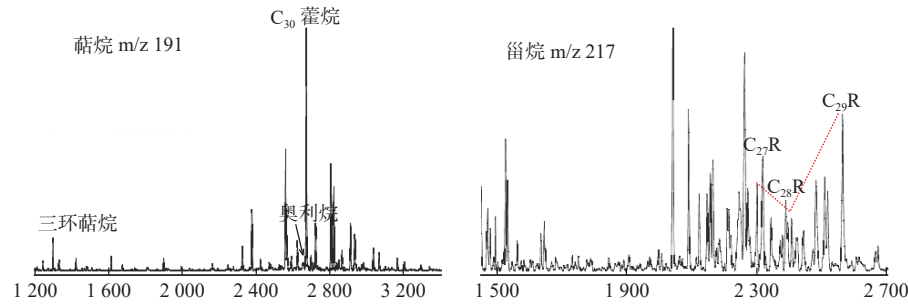


图 4 丽水-椒江凹陷灵峰组烃源岩抽提物样品中萜烷和甾烷质量色谱图

Fig.4 Mass chromatograms of terpenes and steroids in the source rock extract samples of the Lingfeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag

开展定量研究。高碳数正构烷烃平均链长 ACL 反映的是一定碳数范围内正构烷烃含量分布集中的碳数链长,可用于指示陆源相对于海源输入的情况^[21]。其计算公式如下:

$$ACL = (\sum [C_i] \times i) / (\sum [C_i]) \quad (3)$$

式中: i 为碳数,介于 13~40^[20]

对揭示有机质输入量的高碳数正构烷烃平均链长 ACL 数值与 TOC 进行统计,结果显示二者具有明显的相关性,表明有机质输入对丽水-椒江凹陷灵峰组陆源海相烃源岩的发育具有重要的控制作用。丽水-椒江凹陷内 3 个洼陷的有机质输入量具有一定的差异,其中,丽水 A 洼有机质输入量最高,丽水 C 洼有机质输入量较低,丽水 B 洼有机质输入量分布跨度大(图 5)。

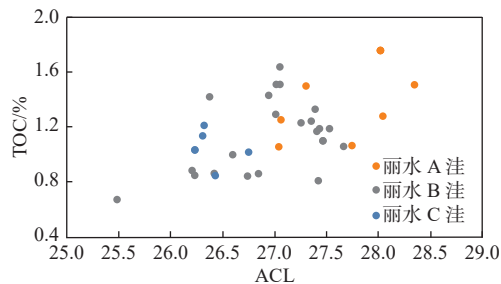
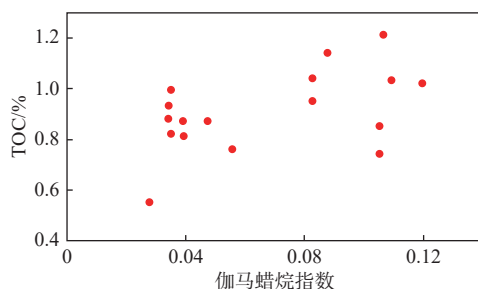
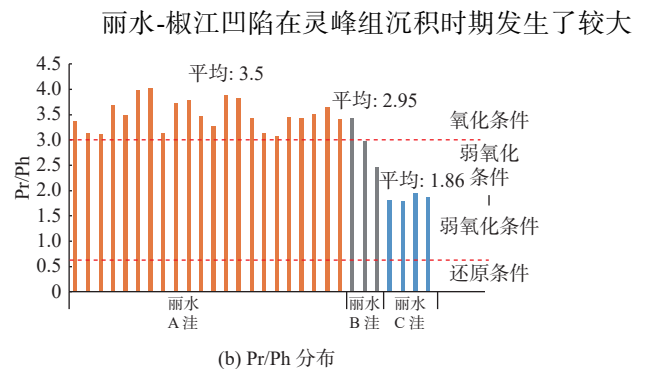


图 5 丽水-椒江凹陷灵峰组 ACL 与 TOC 关系

Fig.5 Relationship between ACL and TOC of Lingfeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag



(a) 伽马蜡烷指数与 TOC 关系



(b) Pr/Ph 分布

图 6 丽水-椒江凹陷灵峰组有机质地球化学参数分布

Fig.6 Distribution of organic matter geochemical parameters in the Lingfeng Formation of Lishui-Jiaojiang Sag

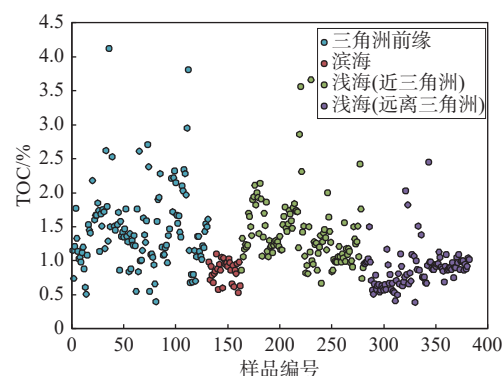
3.3 古水体条件

古水体条件主要指烃源岩沉积时期海水的氧化-还原条件和水体分层性等条件,在一定程度上制约着有机质的保存^[6,22]。目前,地球化学中常利用姥鲛烷与植烷比值(Pr/Ph)和伽马蜡烷指数判断有机质沉积环境的氧化-还原和水体分层条件。Pr/Ph 低值通常代表一种还原的环境,高伽马蜡烷指数反映有机质在还原环境下的强水体分层,二者比值呈负相关性,因此强氧化环境常伴随着沉积水体分层减弱^[23]。丽水-椒江凹陷灵峰组烃源岩伽马蜡烷指数与 TOC 正相关性指示了偏还原的古水体环境更利于较好烃源岩的发育(图 6a)。前人研究普遍认为,Pr/Ph>3.0 指示氧化条件下的陆源有机质输入,Pr/Ph<0.8 代表缺氧环境且通常是超盐环境^[24-25]。丽水-椒江凹陷灵峰组 Pr/Ph 介于 1.81~4.02,其中,丽水 A 洼 Pr/Ph 最高(平均为 3.5),显示其为较强陆源输入的氧化环境,丽水 B 洼 Pr/Ph 平均为 2.95,水体环境弱氧化,丽水 C 洼 Pr/Ph 平均为 1.86,水体环境为弱氧化—弱还原(图 6b)。

4 灵峰组烃源岩平面分布预测

规模的海侵,整体为三角洲-滨浅海沉积体系,其西侧发育多期辫状河三角洲,东侧存在近源扇三角洲群。海陆过渡相烃源岩的发育与盆地或凹陷周缘发育的三角洲密切相关^[26]。因此,丽水-椒江凹陷灵峰组的三角洲-滨浅海沉积环境对其烃源岩的质量和规模具有重要影响。统计显示,丽水-椒江凹陷灵峰组不同沉积相带烃源岩质量存在明显差异,三角洲前缘相、近三角洲的浅海相有机质丰度较高,而滨海相、远离三角洲的浅海相烃源岩质量明显降低(图 7、8)。

结合灵峰组烃源岩发育主控因素,对沉积相带与烃源岩质量的关系进行探讨,认为三角洲前缘和近三角洲的浅海相有机质主要来源于河流输入的陆生高等植物,在弱氧化—弱还原环境下有机质丰度较高,生烃潜力大;滨海相带由于水浅且水体动荡,阳光充足,富含氧,不利于河流输入陆生高等植物的保存,烃源岩品质变差;远离三角洲的浅海相带整体缺乏陆源有机质的输入,仅在局部受一定海相母质来源的影响,烃源岩品质中等。由此,建立了丽水-椒江凹陷灵峰组烃源岩带状分布模式(图 9)。从不同洼陷来看,丽水 B 洼灵峰组主要钻



浅海(近三角洲)指距三角洲边缘距离<15 km;

浅海(远离三角洲)指距三角洲边缘距离>15 km

图 7 丽水-椒江凹陷灵峰组不同沉积相带与 TOC 关系

Fig.7 Relationship between different sedimentary facies and TOC in the Lingfeng Formation of Lishui-Jiaojiang Sag

遇三角洲前缘相和浅海相,烃源岩的发育主要受控于西侧大型三角洲带来的陆源高等植物输入,局部深洼处具有较高的古生产力,水体整体为弱氧化—弱还原环境,有机质丰度相对较高;丽水 A 洼灵峰组主要钻遇三角洲前缘相和滨海相,烃源岩的发育主要受控于水体环境,滨海相带水体偏氧化,古生产力水平低,整体有机质丰度中等。丽水 C 洼东侧

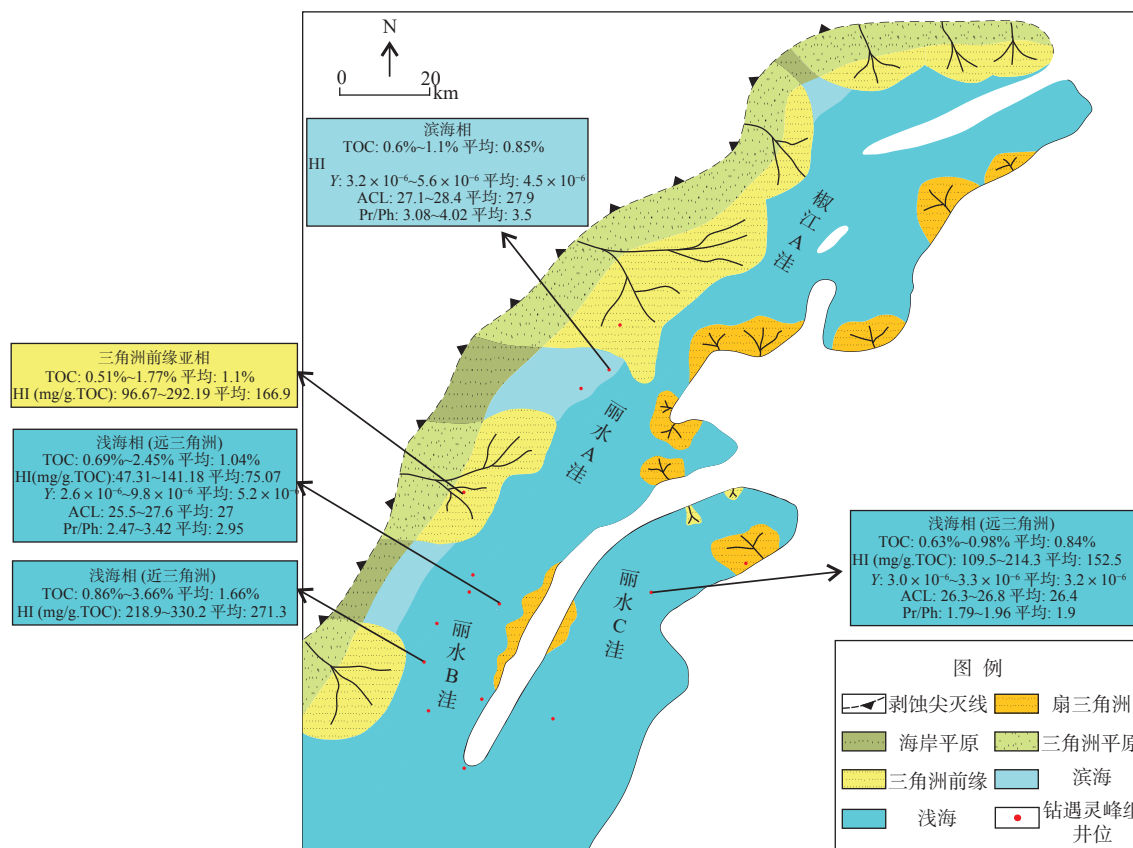


图 8 丽水-椒江凹陷灵峰组不同沉积相带典型井烃源岩特征参数

Fig.8 Characteristic parameters of source rocks in different sedimentary facies zones of Lingfeng Formation, Lishui-Jiaojiang Sag in typical wells

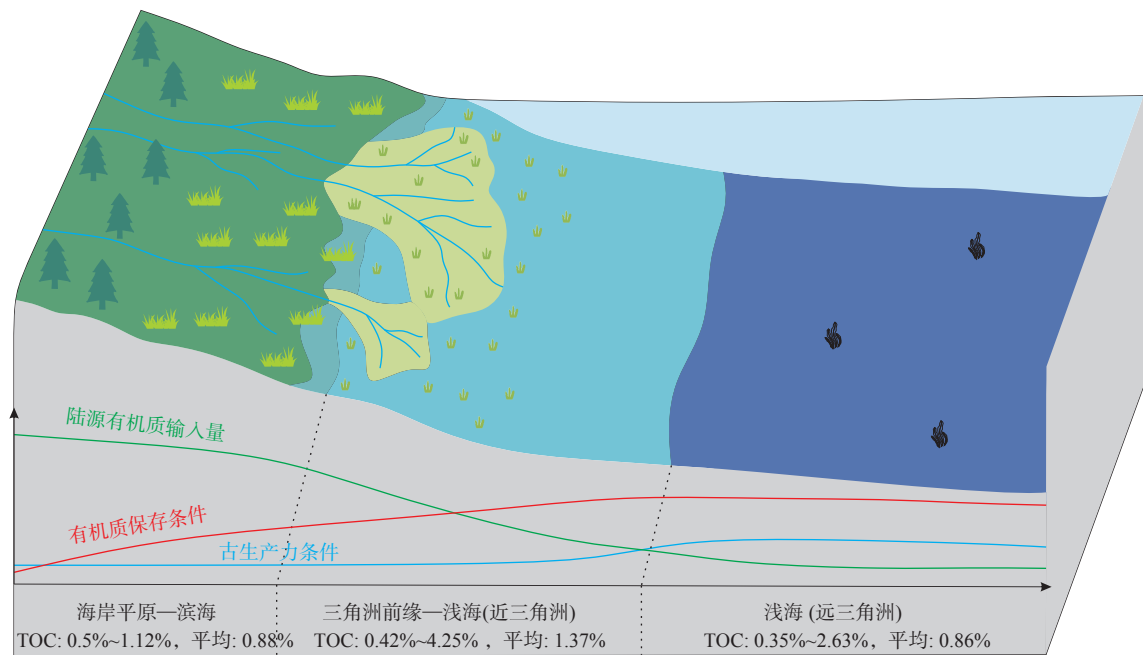


图 9 丽水-椒江凹陷灵峰组烃源岩分布模式

Fig.9 Distribution pattern of hydrocarbon source rocks in the Lingfeng Formation of Lishui-Jiaojiang Sag

主要发育近源扇三角洲,整体陆源输入量少,古生产力水平低,有机质丰度较差。

5 结论

(1)丽水-椒江凹陷灵峰组发育中等—好级别的陆源海相烃源岩,有机质类型以Ⅲ型为主,部分为Ⅱ2型。丽水-椒江凹陷不同洼陷烃源岩质量具有较强的非均质性,丽水B洼有机质丰度相对较高,其次为丽水A洼和丽水C洼,3个洼陷有机质类型相似。

(2)丽水-椒江凹陷灵峰组海相烃源岩的发育受古生产力、陆源输入和水体条件等因素的综合影响。其中,陆源有机质输入对有机质的富集影响最明显,而古生产力条件仅在局部深洼区有效控制较好烃源岩的发育。

(3)丽水-椒江凹陷灵峰组海相烃源岩的规模和质量与其三角洲-滨浅海的沉积环境密切相关。三角洲前缘和近三角洲的浅海相带陆源有机质输入量大,在弱氧化—弱还原环境下发育高丰度烃源岩,是灵峰组优质烃源岩发育的有利相带。3个洼陷钻井相带和主控因素的差异影响着烃源岩发育的非均质性。

参考文献:

[1] 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]. 地球科学, 2024, 49(4): 1339-1351.

ZHAN J M, TANG Y J, LIU B, et al. Sediment provenance and its direction of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Depression: evidence from detrital zircon U-Pb chronology and heavy minerals[J]. Earth Science, 2024, 49(4): 1339-1351.

[2] 梁建设,田兵,王琪,等. 丽水-椒江凹陷月桂峰组地震-沉积响应及烃源岩特征[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3): 482-488.

LIANG J S, TIAN B, WANG Q, et al. Response of seismic-sedimentary facies and characteristics of Yueguifeng Formation source rock in Lishui-Jiaojiang Sag[J]. Natural Gas Geosciences, 2012, 23(3): 482-488.

[3] 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 J, ZHANG Y Z, LIU J S, 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 Geosciences, 2022, 33(4): 605-617.

[4] 黄籍中. “源控论”再认识:以四川盆地天然气勘探为例[J]. 海相油气地质, 1998, 3(2): 1-5, 4.

HUANG J Z. Further understanding of "source control theory": taking natural gas exploration in the Sichuan Basin as an example[J]. Marine Oil and Gas Geology, 1998, 3(2): 1-5, 4.

[5] 郭永华,于水,葛玲. 东海盆地丽水凹陷 LS36-1 构造成藏机理研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 29-31.

GUO Y H, YU S, GE L. Formation of the LS36-1 oil and gas structure in the Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 29-31.

[6] 徐建永,赵牛斌,徐仕琨,等. 莺歌海盆地中新统海相烃源岩发育主控因素及模式[J]. 地质科技通报, 2021, 40(2): 54-63.

- XU J Y, ZHAO N B, XU S K, et al. Main controlling factors and development model of the Miocene marine source rocks in Yinggehai Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(2): 54-63.
- [7] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地质前缘, 2005, 12(3): 39-48.
- ZHANG S C, ZHANG B M, BIAN L Z, et al. Development constraints of marine source rocks in China[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 39-48.
- [8] 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.
- CHEN C F, XU C M, ZHOU R H, et al. Development characteristics and accumulation conditions of lithologic reservoirs in Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(2): 30-35.
- [9] 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 Y, YE J R, LEI C, 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.
- [10] 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.
- ZHANF S L, XIA B. Characters of tectonic evolution of the Lishui-Jiaojiang Sag and oil accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(3): 324-328.
- [11] 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 B, LI X Y, PANG G Y, et al. Sedimentary systems of the superimposed rift-subsidence basin: taking Lishui-Jiaojiang Sag of the East China Sea as an example[J]. Journal of Sedimentology, 2012, 30 (4): 696-705.
- [12] 卢双舫, 张敏. 油气有机地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 1-273.
- LU S F, ZHANG M. Oil and Gas Organic Geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 1-273.
- [13] 中国石油天然气总公司. SY/T 5735—1995 陆相烃源岩地球化学评价方法[S]. 北京: 中国石油天然气总公司, 1995.
- China National Petroleum Corporation. SY/T 5735-1995 Method for geochemical evaluation of terrestrial source rocks [S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 1995.
- [14] 田正隆, 陈绍勇, 龙爱民. 以 Ba 为指标反演海洋古生产力的研究进展[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(3): 78-86.
- TIAN Z L, CHEN S Y, LONG A M. A review on barium as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(3): 78-86.
- [15] TATLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[M]. Oxford: Blackwell, Scientific Publications, 1985: 312.
- [16] 王续学, 张祥玉, 李守军, 等. 莱阳凹陷莱阳群黑色页岩氧化还原敏感微量元素特征与有机质富集的控制因素[J]. 现代地质, 2023, 37(3): 733-744.
- WANG X X, ZHANG X Y, LI S J, et al. Redox sensitive trace element compositions of the Shuinan Formation black shale in the Laiyang Sag: controlling factors of organic matter enrichment[J]. Geoscience, 2023, 37(3): 733-744.
- [17] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [18] 陈慧, 解习农, 李红敬, 等. 利用古氧相和古生产力替代指标评价四川上寺剖面二叠系海相烃源岩[J]. 古地理学报, 2010, 12(3): 324-333.
- CHEN H, JIE X N, LI H J, et al. Evaluation of the Permian marine hydrocarbon source rocks at Shangsi section in Sichuan Province using multi-proxies of paleoproductivity and paleoredox[J]. Journal of Paleogeography, 2010, 12(3): 324-333.
- [19] 徐波, 刁慧, 王宁, 等. 东海盆地丽水凹陷古新统微量元素地球化学特征及其指示意义[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(12): 64-74.
- XU B, DIAO H, WANG N, et al. Geochemical characteristics and indicative significance of trace elements in the Paleocene in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 64-74.
- [20] 张玉琢. 南黄海表层沉积物中正构烷烃的组成、分布特征及其对沉积有机质来源的指示意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011: 6-7.
- ZHANG Y Z. The composition and distribution of n-alkanes in surface sediments from the South Yellow Sea and their potential as organic matter source indicators [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011: 6-7.
- [21] SIKES E L, UHLE M E, NODDER S D, et al. Sources of organic matter in a coastal marine environment: evidence from n-alkanes and their $\delta^{13}\text{C}$ distributions in the Hauraki Gulf, New Zealand[J]. Marine Chemistry, 2009, 113(3/4): 149-163.
- [22] 侯宇光, 何生, 杨香华, 等. 澳大利亚波拿巴盆地大陆边缘裂陷期海陆过渡相烃源岩地球化学特征与发育模式[J]. 石油实验地质, 2015, 37(3): 374-382.
- HOU Y G, HE S, YANG X H, et al. Geochemical characteristics and development model of transitional source rocks during the continental margin rifting stage, Bonaparte Basin, Australia[J]. Petroleum Experimental Geology, 2015, 37(3): 374-382.
- [23] TAO K, CAO J, CHEN X, et al. Deep hydrocarbons in the northwestern Junggar Basin (NW China): geochemistry, origin, and implications for the oil vs. gas generation potential of post-mature saline lacustrine source rocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 109: 623-640.
- [24] 王剑, 陈俊, 陈锐兵, 等. 准噶尔盆地东部石炭系火山岩形成环境及其对储集性能影响机理[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(11): 1785-1797.
- WANG J, CHEN J, CHEN R B, et al. Forming environment of Carboniferous volcanic rocks and its influence mechanism on

- reservoir performance in the eastern Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(11): 1785-1797.
- [25] DIDKY B M, SIMONEIT B R T, BRASSELL S C, et al. Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation[J]. *Nature*, 1978, 272(5650): 216-222.
- [26] 邓运华, 兰蕾, 李友川, 等. 论三角洲对南海海相油气田分布的控制作用 [J]. *石油学报*, 2019, 40(S2): 1-12.
- DENG Y H, LAN L, LI Y C, et al. On the control effect of deltas on the distribution of marine oil and gas fields in the South China Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S2): 1-12.

Controlling factors and distribution characteristics of marine source rocks in the Lingfeng Formation of the Lishui-Jiaojiang Sag in the East China Sea Shelf Basin

LI Linzhi, LI Jingjing, LIAO Jihua, GUO Gang, WANG Xin, LI Feng

(CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100028, China)

Abstract: Research on the Paleogene source rocks in the Lishui-Jiaojiang Sag (LJS) of the East China Sea Shelf Basin focuses on mainly the lacustrine source rocks of the Yueguifeng Formation, while the formation conditions and distribution patterns of high-quality marine source rocks of the Lingfeng Formation are not yet clear. Based on the comprehensive utilization of geological, geochemical, and paleontological data, and the analysis of organic geochemical characteristics of source rocks, we explored the main controlling factors for the development of marine source rocks in the Lingfeng Formation of the LJS, and their formation patterns and distribution. Results show that the Lingfeng Formation in the LJS developed moderate to good grade terrestrial marine source rocks, and different internal sags have strong heterogeneity. The development of hydrocarbon source rocks is comprehensively influenced by factors such as paleoproductivity, source input, and hydraulic conditions. From a planar perspective, the scale and quality of the source rocks in the LJS are closely related to the sedimentary environment of the deltaic coastal shallow sea. The delta front and near-delta shallow marine facies have a large amount of terrigenous organic matter input, and high abundance source rocks are developed in a weak oxidation weak reduction environment, which is a favorable facies zone for the development of high-quality source rocks in the Lingfeng Formation.

Key words: Lishui-Jiaojiang Sag; Lingfeng Formation; marine source rocks; main controlling factors; input of terrestrial organic matter