

东海盆地丽水凹陷天然气差异成藏特征和启示

李威

(中海油研究总院有限责任公司,北京 100028)

摘要:东海盆地丽水凹陷经历多期构造演化和岩浆活动等地质事件,油气成藏极其复杂,造成油气富集规律认识不清,至今未发现大规模商业性油气田。综合运用地球化学、流体包裹体分析技术和盆地模拟方法,对丽水B洼和C洼开展油气成藏对比,揭示丽水凹陷油气成藏规律。研究表明:①丽水凹陷B洼油气主要来源于新生界灵峰组煤系烃源岩,有机质以陆源高等植物输入为主;C洼油气主要来源于月桂峰组烃源岩,有机质以低等生物贡献为主。②丽水B洼和C洼普遍发育超压环境,超压及上部地层呈三段式分布特征:超压封闭箱、封闭箱顶的对流层、封闭箱上部常压地层(深部流体滞留层)。③B洼和C洼油气充注受异常压力控制,油气垂向分布亦呈三段式,与超压及上部地层的三段式结构呈现耦合对应关系。其中,底部封闭箱内流体包裹体的均一温度峰温随埋深增加呈正常变化;中部封闭箱顶盖层的均一温度峰温基本一致,不随埋深变化;封闭箱上部常压地层中的均一温度峰温则再次随埋深正常变化。④B洼属于改造型成藏模式,油气初期在灵峰组封闭箱内聚集,后期随着深部流体突破封盖层向上运移,在明月峰组再次聚集成藏;C洼则为超压封盖型成藏模式,油气在封闭箱内持续充注,形成“上气下油”的油气藏分布格局。⑤丽水B洼受晚期岩浆活动影响,以次生改造型成藏为主,油气主要赋存于超压带之上的浅层圈闭中;C洼受异常热事件影响较小,油气难以突破超压带,油气主要赋存于超压带内的深部圈闭中。

关键词:烃类包裹体;超压封闭箱;油气成藏;丽水凹陷;东海盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Characteristics and implication of differential gas accumulation in Lishui Sag, East China Sea Basin

LI Wei

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

Abstract: The Lishui Sag in the East China Sea Basin has experienced multi-stage tectonic evolution and magmatic activity, resulting in extremely complex processes of hydrocarbon accumulation. Consequently, its hydrocarbon enrichment patterns have not been clearly understood and no large-scale commercial oil and gas fields have been discovered there to date. By integrating geochemistry, fluid inclusion analysis and basin modeling, this study compares hydrocarbon accumulation between Sub-sag B and Sub-sag C in the Lishui Sag to reveal the accumulation patterns. (1) Hydrocarbons in Sub-sag B are mainly derived from coal-bearing source rocks of the Cenozoic Lingfeng Formation, with organic matter composition dominated by terrestrial higher plants, whereas those in Sub-sag C are mainly sourced from the Yueguifeng Formation, with organic matter composition predominantly contributed by lower organisms. (2) Both sub-sags generally exhibit an overpressure environment, and the overpressure system and its overlying strata show a three-segment vertical structure: an overpressured compartment, a convective layer at the top of the compartment, and a normal-pressure interval above the compartment (deep fluid retention zone). (3) The overpressure-governed hydrocarbon charging in both sub-sags correspondingly results in a vertical three-segment hydrocarbon distribution pattern, coupled with the overpressure structure. Specifically, the peak homogenization temperatures of fluid inclusions increase normally with burial depth in the bottom compartment, remain nearly constant in the middle cap layer regardless of depth, and resume normal variation with depth in the upper normal-pressure zone. (4) Sub-sag B follows a transformational hydrocarbon accumulation model, where hydrocarbons initially accumulated within the

收稿日期:2025-08-06;修回日期:2026-05-09。

作者简介:李威(1988—),男,高级工程师,油气综合地质与成藏。E-mail: liwei173@cnooc.com.cn。

基金项目:中海油重大专项(KJGG2021-0300)。

compartment of the Lingfeng Formation, then migrated upward after deep fluids broke through the caprock, and re-accumulated in the Mingyuefeng Formation. Conversely, Sub-sag C follows an overpressure sealed hydrocarbon accumulation model, which is characterized by continuous hydrocarbon charging within the compartment, forming a “gas-above-oil” distribution pattern. (5) Affected by late magmatism, Sub-sag B is mainly formed via secondary modification, with hydrocarbons mainly accumulated in shallow traps above the overpressure zone. However, Sub-sag C is less affected by abnormal thermal events, making it difficult for hydrocarbons to break through the overpressure zone, and thus occurring mainly in deep traps within the overpressure system.

Key words: hydrocarbon inclusion, overpressured compartment, hydrocarbon accumulation, Lishui Sag, East China Sea Basin

引用格式:李威. 东海盆地丽水凹陷天然气差异成藏特征和启示[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1281–1292. DOI: 10. 11743/ogg20260414.

LI Wei. Characteristics and implication of differential gas accumulation in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1281–1292. DOI: 10. 11743/ogg20260414.

东海盆地作为中国近海面积最大的中、新生代沉积盆地,资源潜力巨大。中海油在该盆地的勘探工作主要聚焦于西湖凹陷与丽水凹陷两大富烃凹陷^[1-4]。其中,丽水凹陷自20世纪80年代初启动勘探,历经近半个世纪,呈现出典型的“见油见气不见田”特征,迄今仅探明丽水36-1气田一处商业性发现。众多学者^[5-10]针对丽水凹陷开展了系统研究,涵盖构造演化、沉积特征、储层及烃源岩特征等关键领域,揭示该凹陷发育古近系月桂峰组湖相烃源岩及灵峰组和明月峰组海相烃源岩(含煤系),生烃潜力巨大。值得注意的是,丽水凹陷钻井普遍具有CO₂显示,部分钻井揭示其含量局部高达90%;同时,地震资料揭示区内岩浆侵入体广泛发育,热液活动频繁。

全球已发现油气田中,部分伴生有幔源CO₂气藏,幔源CO₂通常与岩浆活动等异常高热流体事件伴生,CO₂是一种易达到超临界状态的气体(临界温度31.26℃,临界压力7.2 MPa),其在超临界状态下于原油中的溶解度可达纯水中的30倍^[11-16]。李威等^[13-16]对国内外与幔源CO₂伴生的大型油气田开展了深入研究,揭示了幔源CO₂对油气成藏的双重作用:一方面,其出现标志着岩浆热事件的发生,可加速烃源岩熟化,并引发爆发性生排烃;另一方面,以超临界流体形式运移的幔源CO₂显著改善了油气运移效率——通过降低原油黏度、促进体积膨胀及减小油-水界面张力,从而加速油气运聚成藏。后期受温度和压力条件变化影响,油气藏内可能发生分异作用。丽水凹陷普遍存在的CO₂显示表明,其油气成藏过程显著受控于岩浆活动等地质事件,凸显了该区油气富集规律的复杂性。目前,对“运-聚-散”动态成藏机理的认识尚不清晰,已成为制约该区勘探进程的关键瓶颈。

丽水凹陷可划分为A、B和C三个洼陷。丽水36-

1气田所在的为B洼,与灵峰低凸起相邻的为C洼^[7-10]。近年来针对B洼和C洼的攻关研究表明,二者均具备优越的烃源岩潜力及发育良好的储层和圈闭条件。然而,B洼圈闭中普遍富集CO₂,指示其油气成藏过程显著受控于岩浆热事件;相比之下,C洼CO₂含量较低,但油气发现亦较少。基于上述差异,本文聚焦B洼和C洼,从成藏过程视角剖析其油气富集分异特征。研究采用“源-运-聚-保”系统分析思路,重新厘定两大洼陷油气成藏的主控因素及其差异性。通过系统对比B洼和C洼已发现油气藏的成藏特征,总结洼陷间成藏模式的差异规律,旨在为优选不同洼陷的勘探层系与有利区带提供地质依据,进而为丽水凹陷的勘探部署决策提供成藏动力学支撑。

1 区域地质概况

丽水凹陷位于东海陆架盆地台北坳陷西南部,为一典型的具有“东断西超”构造特征的新生代箕状凹陷^[7-10]。凹陷整体呈北东-南西向展布,西部以缓坡带与闽浙隆起带相连,东部以陡坡带通过边缘断层与灵峰低凸起相接。丽水凹陷新生代经历了5期构造运动:古新世末的瓯江运动、晚始新世—晚渐新世的玉泉运动、渐新世末的花港运动、中新世末的龙井运动以及上新世末的冲绳海槽运动(图1),其中,晚始新世—晚渐新世的玉泉运动持续时间长达10 Ma,丽水凹陷整体遭受明显剥蚀。

受太平洋板块俯冲与后撤以及菲律宾板块楔入的共同影响,东海陆架盆地自晚白垩世起进入裂陷阶段,形成一系列断陷盆地。丽水凹陷的构造演化可划分为裂陷期、拗陷期、沉积间断期及整体沉降期4个阶段。

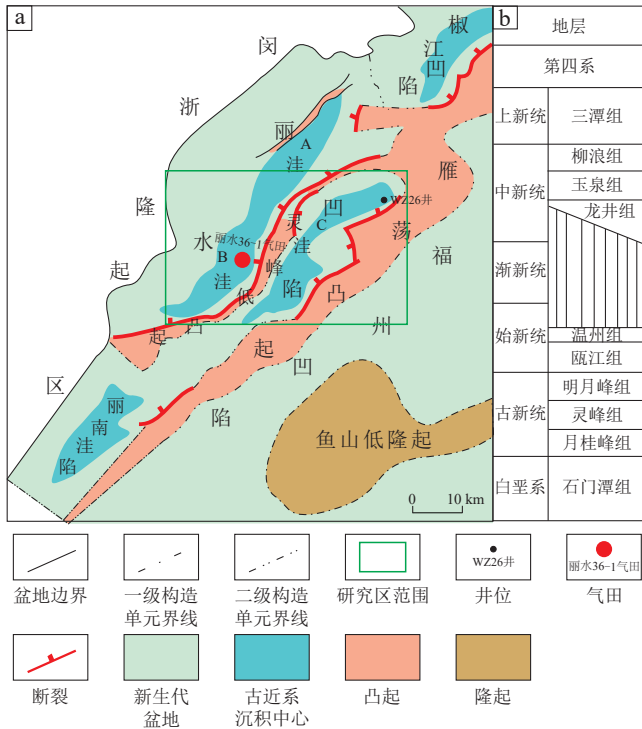


图1 东海盆地丽水凹陷构造单元划分(a)及地层柱状图(b)
(据文献[7]修改)

Fig. 1 Structural unit division (a) and stratigraphic division (b) of the Lishui Sag, East China Sea Basin (modified after reference [7])

凹陷内新生界自下而上依次为:古近系下古新统月桂峰组(E_1y)、上古新统灵峰组(E_1l)和明月峰组(E_1m)、下始新统瓯江组(E_1o)、中始新统温州组(E_1w),新近系中新统和上新统,以及第四系,缺失上始新统及渐新统^[7]。裂陷期发育上白垩统石门潭组,古新统月桂峰组、灵峰组及明月峰组。其中,古新统月桂峰组为湖泊-三角洲沉积,泥岩厚度为200~1400 m;灵峰组为滨浅海-三角洲沉积,最大厚度可达500 m;明月峰组为海相含煤沉积,厚度为100~300 m。拗陷期发育始新统瓯江组和温州组海相沉积。沉积间断期经历了始新世末的玉泉运动与渐新世末的花港运动,导致丽水凹陷整体缺失始新统平湖组和渐新统花港组沉积,并形成了一个显著的构造不整合面^[8];整体沉降期发育中新统龙井组、玉泉组、柳浪组,上新统三潭组,以及更新统东海群组^[9-10](图1)。

2 丽水凹陷油气充注成藏特征

2.1 油气地球化学特征

本研究选取丽水凹陷B洼内最大油气藏——丽水36-1气田的油气样品作为B洼代表,同时选取丽水凹

陷C洼W26井的油气样品作为C洼代表。通过对比分析两者的轻烃参数,旨在揭示B洼与C洼油气特征及来源的差异性。分析结果表明,B洼油气主要赋存于明月峰组,天然气中普遍含 CO_2 ,含量介于31.74%~67.61%; CH_4 含量介于26.79%~56.52%;乙烷稳定碳同位素值($\delta^{13}C_2$)分布范围为-29.55‰~-28.90‰,指示其为混合来源气^[7];凝析油密度约为0.75 g/cm³,含蜡量低于0.5%。C洼油气主要赋存于月桂峰组,产出为轻质原油;凝析油密度约为0.81 g/cm³,含蜡量超过18.0%,含硫量为0.29%^[7],其族组分中的饱和烃含量高达90.1%,芳烃含量为6.5%。

轻烃是轻质油和凝析油的重要组成部分^[11],利用轻烃参数揭示原油地球化学特征及成因是一种重要手段。在轻烃参数研究方面,Mango^[18-20]提出了轻烃的稳态催化动力学成因模式,发现2-甲基己烷(2-MC₆)、3-甲基己烷(3-MC₆)、2,3-二甲基戊烷(2,3-DMC₅)和2,4-二甲基戊烷(2,4-DMC₅)这4种化合物的含量比值具有稳定性,并据此提出参数 K_1 [$K_1 = (2-MC_6 + 2,3-DMC_5)/(3-MC_6 + 2,4-DMC_5)$];式中化合物符号代表其含量,下同。一般而言, K_1 值相同的原油往往来源于同一类烃源岩,因此可利用 K_1 参数判识油气的来源及其差异性。Mango^[18-20]基于 C_7 成因的稳态催化动力学模式认为形成不同碳数环状化合物的反应速率相互独立,而形成同碳数碳环(等环)的反应速率是成比例的,提出轻烃参数 K_2 [$K_2 = P_3/(P_2 + N_2)$]。不同成因的天然气和原油之间,其 K_2 值通常存在差异^[21]。

腐殖型干酪根与腐泥型干酪根在结构上存在显著差异,这种结构差异导致其反应路径不同,进而在动力学过程中产生不同的产物丰度。因此,可采用 $(2-MC_6 + 2,3-DMC_5)/(3-MC_6 + 2,4-DMC_5)/nC_7$ 与 $(3-MC_6 + 2,4-DMC_5)/nC_7$ 以及 P_2/nC_7 与 N_2/P_3 等参数组合,判识丽水凹陷不同次洼油气的母质来源及有机质类型。一般认为,来源于相同母质的烃类产物在相关参数图中应呈线性分布,且具有一致的斜率。此外,前人研究指出,这些参数不易受蒸发分馏等次生作用的影响^[22-23],是进行油气-源岩对比的良好指标。

B洼凝析油的 $(2-MC_6 + 2,3-DMC_5)/nC_7$ 与 $(3-MC_6 + 2,4-DMC_5)/nC_7$ 比值以及 P_3/nC_7 与 $(P_2 + N_2)/nC_7$ 比值参数点基本分布在一条直线上,复相关系数(R^2)达0.99,表明B洼凝析油具有同一含油气系统来源;类似地,C洼凝析油的轻烃参数点同样呈线性分布,指示其油气来源一致。然而,B洼与C洼的分布特征存在显著差异:无论是在 $(2-MC_6 + 2,3-DMC_5)/nC_7$ 与 $(3-MC_6 +$

2,4-DMC₅)/nC₇参数图,还是在P₃/nC₇与(P₂+N₂)/nC₇参数图中,均表现出明显不同(图2a,b)。这说明B注与C注的油气分属不同的含油气系统,其母质来源及类型存在差异。Ten Haven^[24]曾成功应用Mango参数交会图版划分陆相高等植物来源、湖相低等生物来源及混合来源的烃源岩母质类型。基于该图版,本研究对丽水凹陷B注和C注凝析油的烃源岩类型进行了标定。由图2可知,B注样品点均落在图版中陆源高等植物的来源区域内,表明陆生高等植物是B注油气的重要贡献者,其烃源岩有机质组成以陆源高等植物为主;C注样品点则均落在混合来源区域,并靠近湖相等

生物来源区,表明其油气来源于低等生物贡献显著的有机质。结合对区内3套烃源岩的认识^[7],认为B注油气主要来源于灵峰组煤系烃源岩,而C注油气主要来源于月桂峰组湖相烃源岩。

2.2 超压分布特征

丽水凹陷普遍发育超压。从泥岩声波时差与埋深的关系来看,超压及其上部地层构成典型的三段式分布:超压封闭箱、封闭箱顶(超压封闭箱顶部)以及封闭箱上部的常压地层(图3)。下部烃源岩段(如灵峰组)声波时差偏移明显,发育源内超压,存在超压封闭箱。

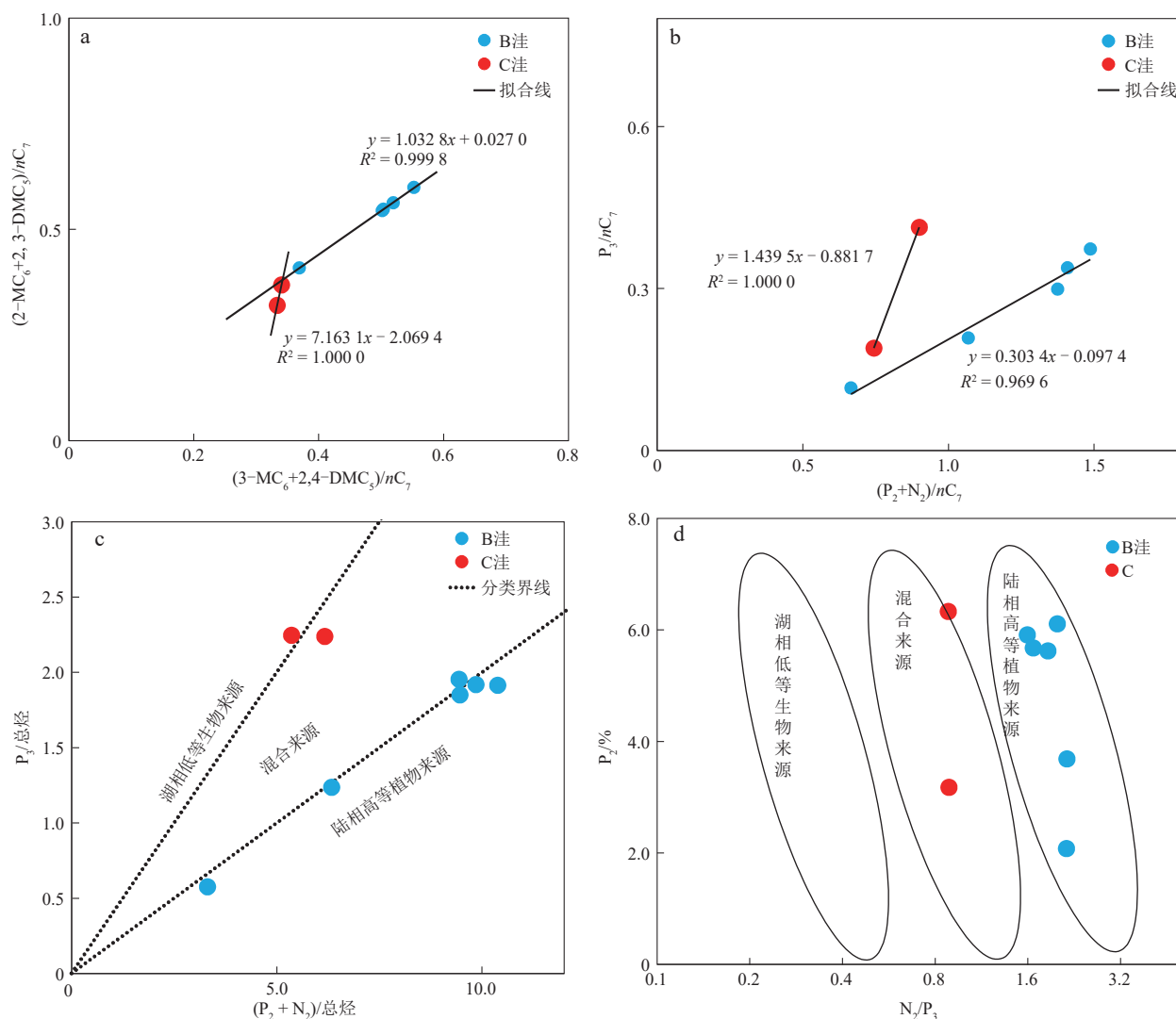


图2 丽水凹陷凝析油气天然气成因认识图版

Fig. 2 Genetic discrimination diagram of condensate and natural gas in the Lishui Sag

a. (2-MC₆+2,3-DMC₅)/nC₇与(3-MC₆+2,4-DMC₅)/nC₇相关图; b. P₃/nC₇与(P₂+N₂)/nC₇相关图; c. P₃/总烃-(P₂+N₂)/总烃天然气成因类型判别图版图; d. (N₂/P₃)-P₃天然气成因类型判别图版图

2-MC₆, 2-甲基己烷; 3-MC₆, 3-甲基己烷; 2,3-DMP, 2,3-二甲基戊烷; 2,4-DMP, 2,4-二甲基戊烷; P₂, 2-甲基己烷+3-甲基己烷; P₃, 3-乙基戊烷+3,3-二甲基环戊烷+顺-1,3-二甲基环戊烷+反-1,3-二甲基环戊烷; N₂, 1,1-二甲基环戊烷+顺-1,3-二甲基环戊烷+反-1,3-二甲基环戊烷

(图中化合物符号代表其含量。)

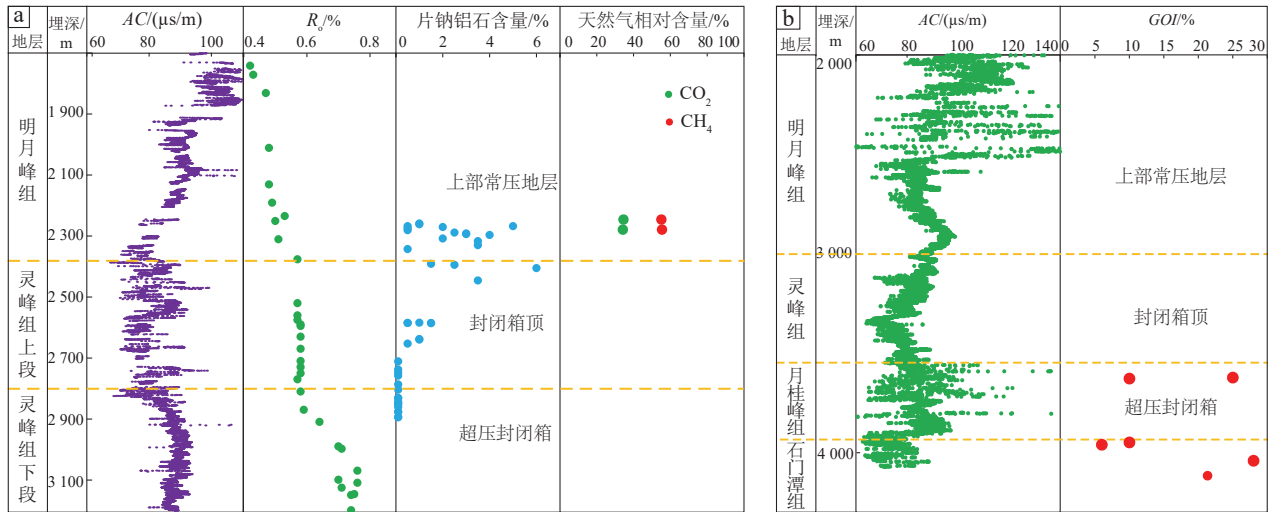


图3 丽水凹陷B洼(a)和C洼(b)地层超压垂向分带特征

Fig. 3 Vertical overpressure zonation characteristics of Sub-sag B(a) and Sub-sag C(b) of the Lishui Sag

R_o : 镜质体反射率; AC: 声波时差测井值; GOI: 含油流体包裹体丰度指标

该超压封闭箱内的镜质体反射率(R_o)随埋深增大而增大,速率(斜率)偏高,表明烃源岩熟化作用加快。中部封闭箱顶主要为砂-泥互层,声波时差恢复正常趋势, R_o 与埋深的关系表现为直立(R_o 不随埋深变化),古地热梯度趋近于0。这一特征表明深部热流体存在垂向流动,其原因可能是超压封闭箱内近顶界面附近的超压导致地层发生间歇性破裂,进而引发超压热流体的幕式开启与垂向排放^[25-28]。上部常压地层的泥岩声波时差与 R_o 随埋深的变化均呈现正常的演化规律。

丽水凹陷B洼和C洼的声波时差数据均出现异常偏离现象。B洼单井泥岩声波时差随埋深增加呈现先减小、后增大的趋势,偏离了埋深正常的压实规律(即声波时差随埋深增加而逐渐减小)。声波时差异常偏大的层位主要位于灵峰组烃源岩层段,指示B洼灵峰

组存在超压封闭箱。灵峰组上段构成封闭箱顶,明月峰组下段为常压地层,二者共同构成主要的油气储层,富含 CO_2 ,同时发育片钠铝石等自生矿物(图3a)。C洼泥岩声波时差同样表现出随埋深增加先减小、后增大的异常现象,反映丽水C洼在月桂峰组存在超压现象,即存在超压封闭箱。灵峰组则构成封闭箱顶。油气主要赋存于月桂峰组及其下伏地层中(即超压带及其下方)(图3b)。

利用盆地模拟软件对B洼和C洼进行压力模拟,结果显示:B洼灵峰组普遍存在超压,且超压集中分布在丽水36-1气田所在区域,最大剩余压力超过8 MPa(图4a);C洼月桂峰组主要发育异常超压,而灵峰组超压不明显。从月桂峰组超压分布图来看(图4b),C洼普遍发育超压,其中最大剩余压力超过12 MPa,明显高于B洼灵峰组的高压分布。

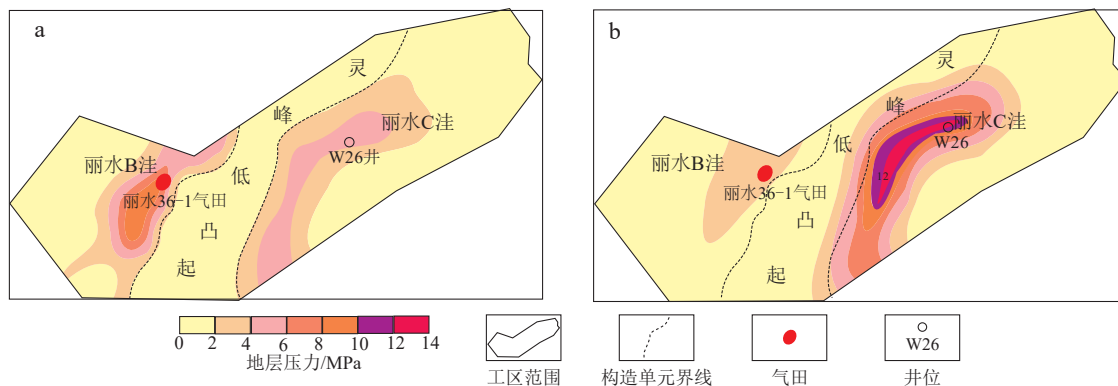


图4 丽水凹陷地层超压平面分布

Fig. 4 Planar view of overpressure distribution in the Lishui Sag

a. 灵峰组; b. 月桂峰组

2.3 油气包裹体特征

流体包裹体因保留了地质历史时期的流体性质、温度、压力及流体环境等关键信息,被广泛应用于油气来源追溯、充注期次划分及成藏年代确定等研究。基于流体包裹体宿主矿物,并结合其赋存于特定的成岩序列或与其他矿物的交切关系,可以明确判定油气充注的期次与顺序^[29-32]。在多期次油气成藏过程中,不同世代包裹体的均一温度数据往往呈现出多峰态的分布特征。单一峰温通常代表某一特定油气充注成藏时期所捕获的流体包裹体群,而不同总体的“峰温”则指示不同的油气充注成藏期次^[13]。

B注同一口井、不同埋深的包裹体主要沿切穿石英颗粒的、成岩期后的微裂隙呈带状分布,多为浅灰色或淡褐色的含烃盐水包裹体。不同埋深包裹体的均一温度分布呈现单峰形态,整体可分为3个“峰温”段。①底部(埋深>2 800 m):灵峰组包裹体均一温度与埋深呈正相关关系,指示为正常充注过程形成的含烃盐水包裹体;②中部(埋深2 310~2 853 m):该埋深段分布的包裹体均一温度基本一致,指示存在由异常流体活动引发的幕式充注现象;③顶部(埋深<2 310 m):包裹体的均一温度峰温随埋深变浅而降低,再次表现出正常充注现象(图5a)。

C注包裹体主要赋存于灵峰组、月桂峰组、石门潭组及基底岩层中。同一口井、不同埋深的包裹体主要沿切穿石英颗粒的次生微裂隙呈带状分布,表现为具有浅蓝白色荧光或绿色荧光的轻质油和凝析油包裹体,并伴生有淡褐色的含烃盐水包裹体。不同埋深包裹体的均一温度呈正态分布,整体上呈现为两段式分布特征。①下部(基底、石门潭组及月桂峰组下部),包裹体均一温度与埋深呈正相关关系,指示为正常充注过程形成的含烃盐水包裹体;②上部(月桂峰组-灵峰组),在近600 m地层范围内,包裹体的均一温度峰温保持一致,与埋深无相关性,这一特征指示异常热流活动的存在(图5b)。

通过对油气储层中与包裹体伴生的片钠铝石和方解石等胶结物进行碳、氧同位素测定,并利用同位素计算古地温(100~120℃),结合地层埋藏热史分析,认为该区域的油气充注发生于渐新世一中新世(33~25 Ma)。这一认识与前人研究结论一致^[7],即对应于丽水凹陷的构造活跃期。该构造活跃期一方面导致研究区发生大规模抬升,另一方面引发了伴随幔源CO₂喷出的岩浆活动。

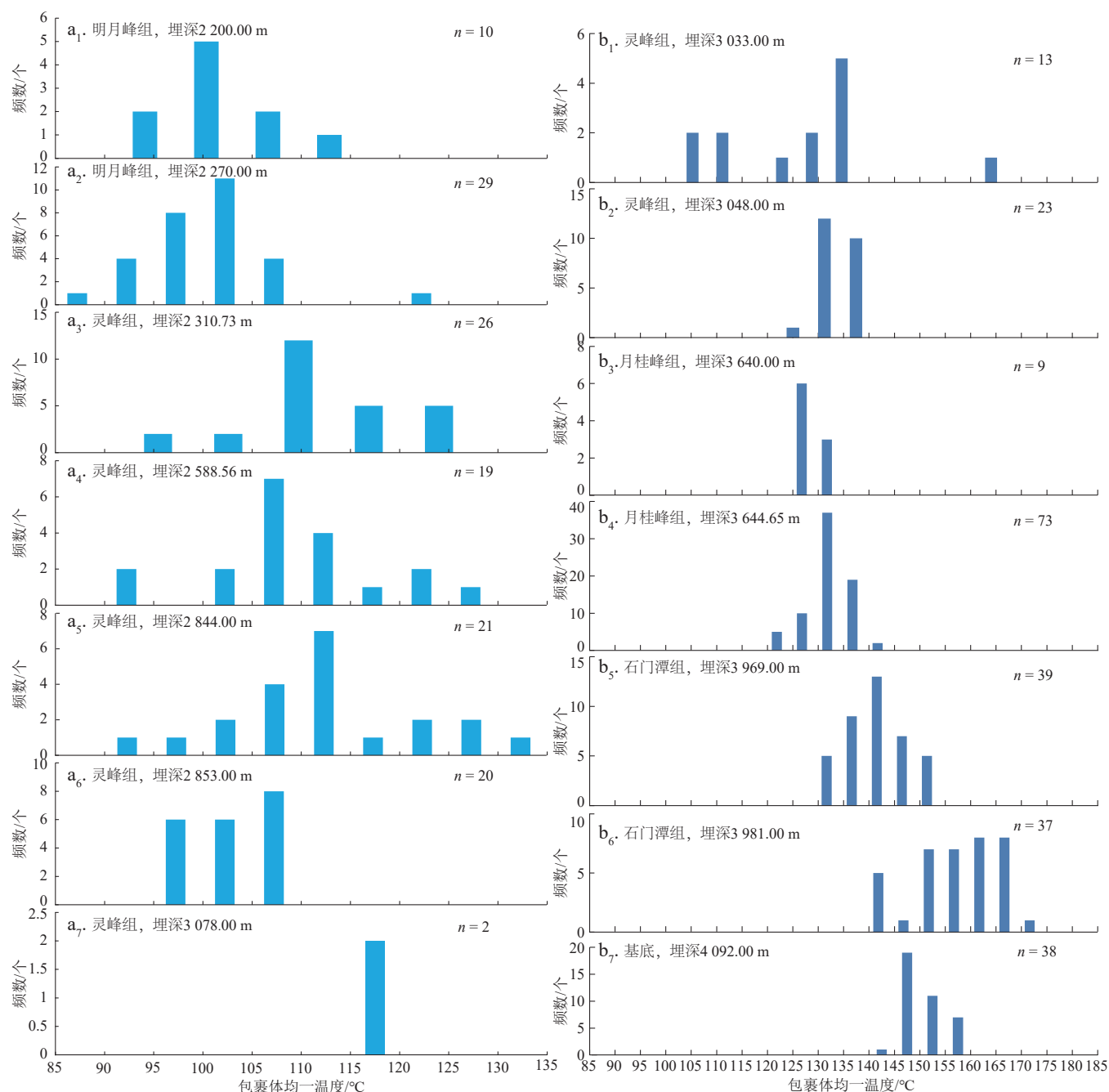
纵向上对比压力与包裹体分布特征,两者呈现出

非常好的耦合关系(图6)。①B注:在灵峰组超压封闭箱内,包裹体均一温度峰温与埋深呈正相关性,即随埋深增加而逐渐升高。而在灵峰组上段(封闭箱顶)地层中,包裹体均一温度峰温表现出一致性,表明深部异常热流体或超压封闭箱内的热流体发生频繁的垂向流动,导致顶盖层破裂、封闭箱开启,促使热流体向上运移。当热流体突破封闭箱顶盖层进入明月峰组后,包裹体均一温度峰温再次随埋深增加而逐渐升高,展现出正常的分布次序。因此,B注包裹体与压力分布呈现协同演化关系,其超压封闭箱、封闭箱顶和封闭箱上部常压地层,恰好对应包裹体均一温度峰温的三段式分布特征。底部超压封闭箱内包裹体均一温度峰温随埋深增加而升高,指示正常充注现象;中部封闭箱顶地层的包裹体均一温度峰温一致,表现出高热流体频繁突破超压封闭箱进行对流的特征;上部常压地层的包裹体均一温度峰温再次随埋深增加而升高(呈正相关性),该层系也是油气主要富集层位,即由超压封闭箱内流体突破封闭箱进入上部地层并滞留所形成。②C注:包裹体与压力分布同样表现出耦合关系,但包裹体仅赋存于超压封闭箱和封闭箱顶盖层内。在超压封闭箱内,包裹体均一温度峰温随埋深增加而逐渐升高,呈现正常的分布次序。在封闭箱顶盖层,同样呈现出均一温度峰温一致的对流层分布特征。然而,C注封闭箱顶部盖层及其上覆常压地层中不发育油气藏。这说明该封闭箱的封盖能力较强,油气突破封闭箱顶盖层向上逃逸的量较少,油气主要赋存于超压封闭箱及其下部地层中。这可能与C注月桂峰组存在更强的超压有关。

2.4 油气充注运移特征

综合前文对丽水B注与C注的地球化学及包裹体分析可知,两者的油气来源及赋存层系均存在显著差异。其中,B注的油气主要来源于灵峰组烃源岩,赋存于明月峰组储层;而C注的油气则主要来源于月桂峰组烃源岩,赋存于月桂峰组及基底潜山储层。从油气来源与包裹体赋存特征推断,显著的油气垂向调整主要发生在B注,而C注则更多地表现为原生气体的“自生自储”或近距离运移成藏特征。

本文利用甲苯/正庚烷(Tol/nC7)与正庚烷/甲基环己烷(nC7/MCH)含量比值来判断油气是否经历过气洗蒸发分馏作用。图7显示,B注同一油气藏中不同埋深的凝析油轻烃参数呈现出明显的规律性分布,其参数点分布特征与气洗蒸发分馏作用的典型模式相吻合。这表明该区油气经历过调整过程:油气在进入明月峰组圈闭的过程中,伴随的天然气与原油发生了分馏作

图5 丽水凹陷B洼(a₁—a₇)和C洼(b₁—b₇)包裹体均一温度频数分布直方图Fig. 5 Homogenization temperature histograms of fluid inclusions in Sub-sag B (a₁–a₇) and Subsag C (b₁–b₇) of the Lishui Sag

用。天然气从原油中脱出时的相态变化,引起了组分的分异,导致轻质组分相对富集并向上部运移。进一步观察不同埋深的凝析油色谱特征可见,同一油藏中,埋深较大的油气样品中、重质组分含量较高,而轻质组分缺乏;随着深度变浅,轻质组分含量逐渐增加,而重质组分含量逐渐降低;埋深最浅处的油气样品轻质组分丰富。值得注意的是,埋深2 250 m样品中富集的轻质组分,与埋深2 260 m样品中所缺失的组分呈互补关系。这一“指纹”对应关系进一步确证了B洼的油气成

藏过程以垂向运移调整为主导。

根据C洼包裹体恢复的古压力系数分析结果(图8),月桂峰组及以下地层的压力系数普遍较高,最高值可达2.92,表明油气主要赋存于高压环境中。通过对相应包裹体中轻质油包裹体和天然气包裹体占比的观察,确认两者均有发育。进一步分析天然气包裹体丰度与埋深的关系发现,在超压封闭箱体内部及其顶部盖层范围内,天然气包裹体丰度随埋深变浅而显著增加,基本呈线性相关特征。这表明在封闭箱体内部

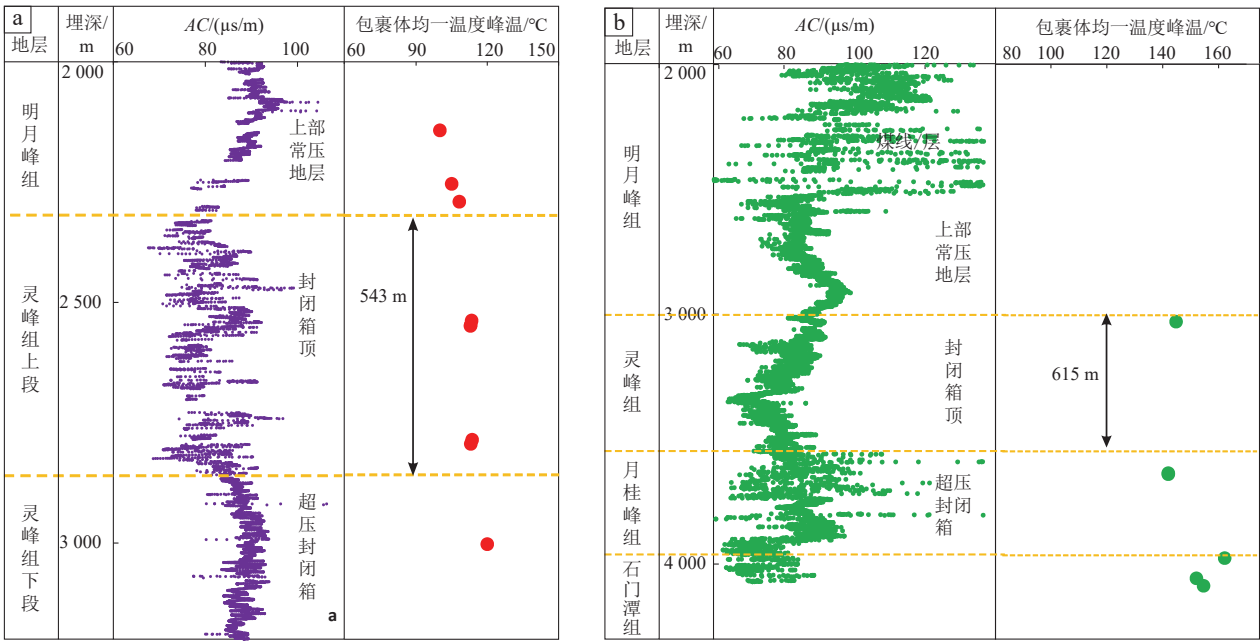


图6 丽水凹陷B洼(a)和C洼(b)地层超压与包裹体均一温度峰温垂向分布对比

Fig. 6 Correlation of vertical overpressure distribution and vertical peak homogenization temperature distribution of inclusions from Sub-sag B (a) and Sub-sag C (b) of the Lishui Sag

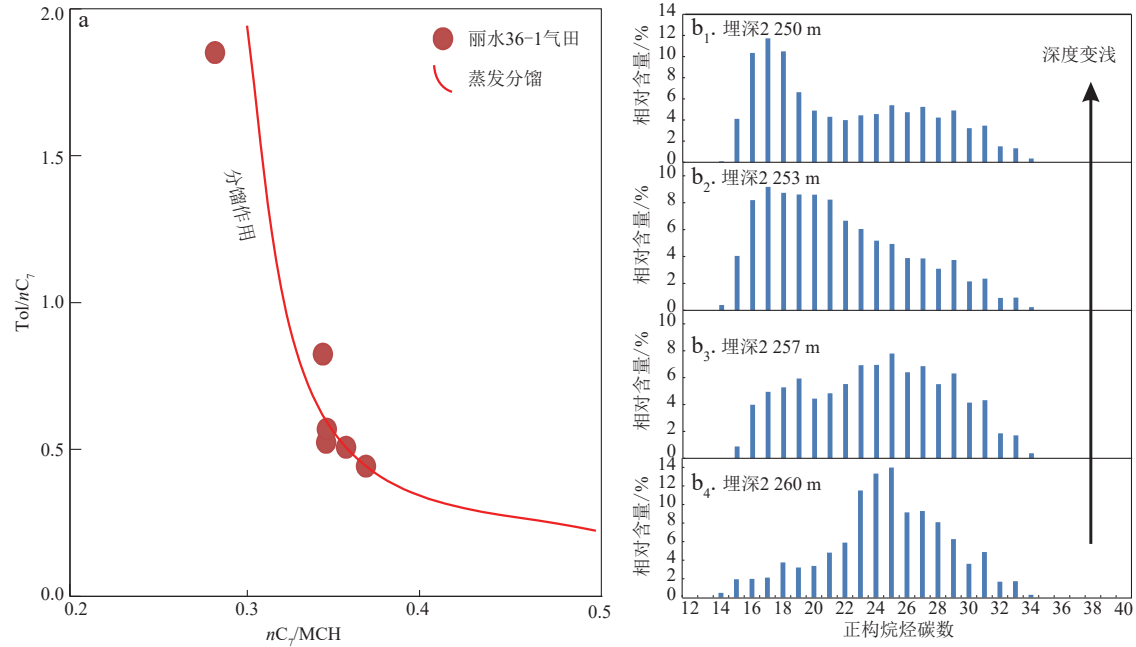


图7 丽水凹陷B洼油气运移示踪图

Fig. 7 Hydrocarbon migration tracing diagram of Sub-sag B

a. 油气次生作用判别图; b. 不同埋深油气色谱图

Tol/nC₇: 甲苯/正庚烷含量比值; nC₇/MCH: 正庚烷/甲基环己烷含量比值

发生了油气分异作用:天然气组分逐渐向上部运移聚集,从而形成了“上气下油”的分布格局。此外,基于原油包裹体气相色谱-质谱(GC-MS)分析获得的甾烷参数 $\beta\beta/\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷含量比值与埋深的关系图(图8)显示,该比值随埋深变浅而减小。这一现象说明在封闭箱体

内,存在天然气向上运移、原油向下运移的动态过程。该结果进一步印证了C洼的油气特征:尽管油气主要赋存于封闭箱体内,但在持续的充注过程中,系统内存在并维持着天然气向上运移、原油向下运移的动态调整趋势。

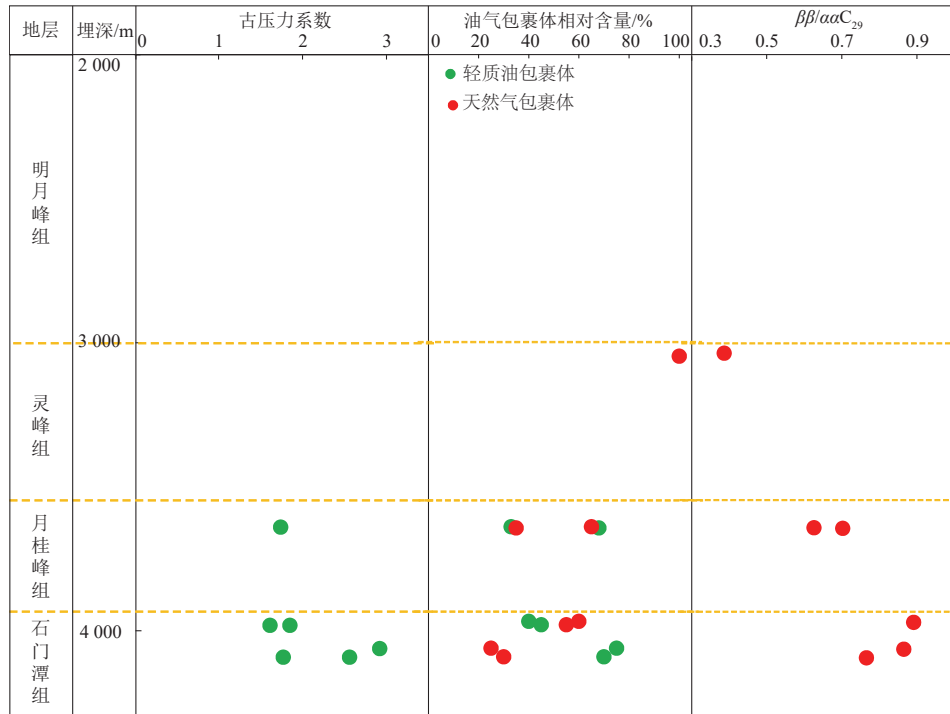


图8 丽水凹陷C洼油气运移综合判识图

Fig. 8 Comprehensive discrimination diagram of hydrocarbon migration in Sub-sag C

$\beta\beta/\alpha\alpha C_{29}$, $\beta\beta/\alpha\alpha C_{29}$ 甾烷含量比值

2.5 油气成藏模式

古新世—始新世,丽水凹陷烃源岩开始生烃与排烃,同时构造圈闭形成。虽然后期渐新统经历了隆升剥蚀,但构造格局基本未发生重大变化。

B洼油气主要来源于灵峰组烃源岩,生成的油气首先聚集于灵峰组下部超压封闭箱体内,后期受构造活动影响,岩浆活动频繁,产生大量CO₂等高温流体。在异常热流体的作用下,封闭箱顶部发生幕式破裂。前期聚集于灵峰组下部超压封闭箱中的油气与超临界CO₂流体混合,形成超临界流体相态并发生运移。这种混合极大地改善了油气运移的载体效率,使得油气得以迅速从封闭箱中逃逸并向上流动。在断裂系统的沟通作用下,形成快速运移通道,油气瞬时充注进入上覆的明月峰组圈闭。与此同时,在油气快速向上运移过程中,由于温度-压力系统的急剧变化,叠加超临界CO₂流体自身的相态转变^[33-34],发生了显著的气洗蒸发分馏效应。天然气从混合流体中逃逸出来,并携带原油中的轻质组分,在明月峰组中再次聚集成藏,最终形成现今富含CO₂流体的丽水36-1气藏(图9)。

C洼油气主要来源于月桂峰组,并主要赋存于月桂峰组及其下部地层和基底潜山储层中。该洼陷在深埋和生烃增压作用下,月桂峰组形成了超压封闭箱,断

层欠发育,月桂峰组湖相优质烃源岩成熟阶段生成的原油聚集在封闭箱内,后期高熟-过熟阶段生成的天然气进入封闭箱后,由于重力分异作用,天然气向上聚集,并进入封闭箱顶部,下部则主要富集原油,最终形成具有气顶的油气藏(图9)。

2.6 勘探启示与意义

丽水凹陷B洼与C洼在构造背景上存在显著差异。B洼岩浆活动显著,而C洼则相对安静。两个洼陷普遍发育超压系统,其中B洼的超压主要源自灵峰组烃源岩的源内超压,而C洼则主要源自月桂峰组烃源岩的源内超压,两个洼陷的油气赋存特征与成藏模式差异明显。丽水B洼主要表现为改造型成藏模式,原生油气最初赋存于超压封闭箱体内或箱体之下地层,后期受岩浆活动影响,伴随幔源CO₂的充注,油气突破超压封闭箱体向上运移并最终聚集成藏。幔源CO₂的次生调整改造作用显著,导致现今油气主要赋存于超压带之上的层系。因此,B洼有利勘探层系应主要聚焦于岩浆发育带上方的浅层先存构造圈闭或岩性圈闭;平面上,勘探重点应优先寻找靠近洼陷且断层活动继承性强的区域。丽水C洼主要表现为超压封盖型成藏模式,油气主要赋存于超压带及其之下的地层中。该区受幔源CO₂影响微弱,超压封盖能力极强。

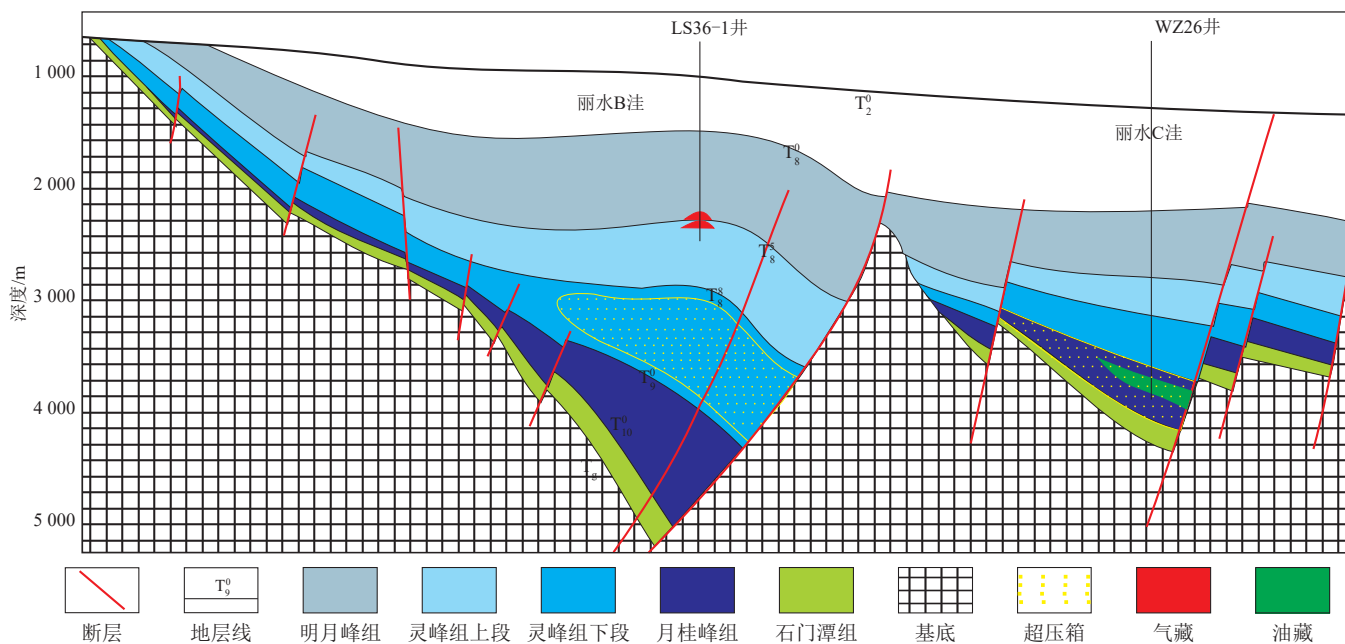


图9 丽水凹陷油气成藏模式示意图

Fig. 9 Hydrocarbon accumulation model of the Lishui Sag

因此,C注有利勘探层系应以发育超压封闭箱体的月桂峰组及其之下地层为主;平面上,勘探重点应聚焦于靠近注陷带的构造圈闭或岩性圈闭。

3 结论

1) 丽水凹陷B注与C注烃源岩特征差异明显。B注的油气主要来源于灵峰组煤系烃源岩,其有机质组成以陆源高等植物贡献为主;而C注的油气则主要来源于月桂峰组烃源岩,其有机质组成以低等生物贡献为主。

2) B注与C注超压环境与包裹体响应耦合。两个注陷普遍发育超压环境,其超压体系及上部地层构成三段式垂向结构,包裹体特征与其异常压力的垂向三段式分布呈现对应关系:底部超压封闭箱包裹体的均一温度呈现正常分布趋势、中部封闭箱顶不同埋深的包裹体均一温度表现出显著的一致性、上部常压地层包裹体的均一温度则恢复正常分布趋势。

3) B注与C注具有不同的成藏模式。B注表现为改造型成藏模式,油气初次聚集于灵峰组超压封闭箱体内;后期随着深部流体突破箱体封盖向上运移,油气在明月峰组圈闭中再次聚集形成现今油气藏。C注表现为超压封盖型成藏模式,油气主要通过近距离运移或源内聚集在月桂峰组形成的超压封闭箱体内,缺乏显著的深部流体活动。油气在封闭箱体内持续充注并发生分异,最终形成“上气下油”的分布格局。

4) 晚期改造与赋存层系差异显著。B注受晚期岩浆活动影响显著,成藏以次生改造型为主,油气主要赋存于超压带之上的浅层圈闭中。相比之下,C注受异常热事件影响微弱,油气难以突破超压带的封盖,故主要赋存于超压带内部及其之下的深部圈闭中。

参考文献

- [1] 田杨,叶加仁,杨宝林,等. 东海陆架盆地丽水凹陷油气成藏规律及区带优选[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(4): 639-653.
TIAN Yang, YE Jiaren, YANG Baolin, et al. Hydrocarbon accumulation rule and exploration target optimization in Lishui Sag, East China Sea continental shelf basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(4): 639-653.
- [2] 陈志勇,吴培康,吴志轩. 丽水凹陷石油地质特征及勘探前景[J]. 中国海上油气, 2000, 14(6): 384-391.
CHEN Zhiyong, WU Peikang, WU Zhixuan. Petroleum geology and exploration potential of Lishui Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2000, 14(6): 384-391.
- [3] 田兵,庞国印,王琪,等. 叠合断陷盆地油气成藏条件分析——以东海丽水—椒江凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(5): 32-37, 42.
TIAN Bing, PANG Guoyin, WANG Qi, et al. Hydrocarbon accumulation conditions of Chang 2 oil reservoir set in Jiuyan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(5): 32-37, 42.
- [4] 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, 2003, 17(1): 44-50.

- GE Heping, CHEN Zhiyong, FANG Laifu, et al. A discussion on hydrocarbon accumulation periods in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2003, 17(1): 44-50.
- [5] 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 Jianshe, TIAN Bing, WANG Qi, et al. Response of seismic-sedimentary facies and characteristics of Yueguifeng Formation source rock in Lishui-Jiaojiang Sag [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3): 482-488.
- [6] 郝乐伟, 王琪, 梁建设, 等. 东海陆架盆地瓯江凹陷油气成藏机制探讨[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(6): 848-859.
- HAO Lewei, WANG Qi, LIANG Jianshe, et al. Mechanism of hydrocarbon accumulation in Oujiang Sag, the East China Sea Shelf Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25 (6) : 848-859.
- [7] 苏奥, 陈红汉, 曹来圣, 等. 东海盆地丽水凹陷油气成因、来源及充注过程[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(5): 523-532.
- SU Ao, CHEN Honghan, CAO Laisheng, et al. Genesis, source and charging of oil and gas in Lishui Sag, East China Sea Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41 (5) : 523-532.
- [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 Chunfeng, XU Chunming, ZHOU Ruihua, 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] 葛和平, 陈建平, 陈晓东, 等. 东海盆地丽水凹陷天然气类型及其成因探讨[J]. *中国科学:地球科学*, 2007, 37(增刊2): 104-110.
- GE Heping, CHEN Jianping, CHEN Xiaodong, et al. Classification and origin of natural gases from Lishui Sag, the East China Sea Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2007, 37 (S2): 104-110.
- [10] 黄志龙, 姜亮, 郝石生. 东海盆地丽水凹陷天然气成因类型[J]. *天然气工业*, 2003, 23(3): 29-31.
- HUANG Zhilong, JIANG Liang, HAO Shisheng. Classification of gas genesis in Lishui Sag of East Sea Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(3): 29-31.
- [11] 曲希玉, 杨会东, 刘立, 等. 松南油伴生CO₂气的成因及其对油气藏的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(1): 39-48.
- QU Xiyu, YANG Huidong, LIU Li, et al. The genesis and its impaction on oil and gas reservoir of oil-associated CO₂ in southern part of Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(1): 39-48.
- [12] 曲希玉, 刘立, 胡大千, 等. CO₂流体对含片钠铝石砂岩改造作用的实验研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(4): 690-697.
- QU Xiyu, LIU Li, HU Daqian, et al. Study on the dawsonite sandstones reformation with CO₂ fluid [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(4): 690-697.
- [13] 李威, 窦立荣, 文志刚, 等. Melut盆地富含CO₂油气藏的成因及期次[J]. *地球科学*, 2022, 47(4): 1459-1469.
- LI Wei, DOU Lirong, WEN Zhigang, et al. Genetic origin of CO₂-rich oil reservoirs and pool-forming period in Melut Basin, southern Sudan[J]. *Earth Science*, 2022, 47(4): 1459-1469.
- [14] 李威. 渤海湾盆地渤中19-6气田凝析气成因研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(3): 458-466.
- LI Wei. Origin of condensate gas in Bozhong 19-6 gas field in Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(3): 458-466.
- [15] 李威, 邓运华. 岩浆活动对渤中19-6潜山油气成藏的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 1052-1061.
- LI Wei, DENG Yunhua. Influence of magmatic activity on hydrocarbon accumulation in Bozhong 19-6 buried-hill in Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(7): 1052-1061.
- [16] 李威, 徐建永, 刘志峰, 等. 幔源CO₂对渤海海域秦皇岛29构造带油气成藏的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 418-428.
- LI Wei, XU Jianyong, LIU Zhifeng, et al. Influence of mantle-derived CO₂ on hydrocarbon accumulation in Qinhuangdao 29 tectonic zone, Bohai Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 418-428.
- [17] 王培荣, 徐冠军, 肖廷荣, 等. 用C₇轻烃参数判识烃源岩沉积环境的探索[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 156-159.
- WANG Peirong, XU Guanjun, XIAO Tingrong, et al. Application of C₇ light hydrocarbon parameters in identifying source rock depositional environment [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 156-159.
- [18] MANGO F D. The origin of light cycloalkanes in petroleum [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(1): 23-27.
- [19] MANGO F D. The light hydrocarbons in petroleum: A critical review[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7/8): 417-440.
- [20] MANGO F D. The origin of light hydrocarbons [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(7): 1265-1277.
- [21] 纪红, 黄光辉, 成定树, 等. 塔里木盆地库车坳陷大宛齐—大北地区原油轻烃特征及地球化学意义[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(6): 965-974.
- JI Hong, HUANG Guanghui, CHENG Dingshu, et al. Geochemical application of light hydrocarbons in Kuqa Depression of Tarim Basin: Case study of Dawanqi-Dabei areas [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(6): 965-974.
- [22] CAÑIPA-MORALES N K, GALÁN-VIDAL C A, GUZMÁN-VEGA M A, et al. Effect of evaporation on C7 light hydrocarbon parameters [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(6): 813-826.
- [23] 胡国艺, 汪为胜, 廖凤蓉. 煤成气轻烃地球化学特征及其影响

- 因素——以四川盆地须家河组为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 905-916.
- HU Guoyi, WANG Weisheng, LIAO Fengrong. Geochemical characteristics and its influencing factors of light hydrocarbon in coal-derived gas: A case study of Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(3): 905-916.
- [24] TEN HAVEN H L. Applications and limitations of Mango's light hydrocarbon parameters in petroleum correlation studies [J]. Organic Geochemistry, 1996, 24(10/11): 957-976.
- [25] 薛一帆, 赵海涛, 黄亚浩, 等. 塔里木盆地深层奥陶系走滑断裂区与非走滑断裂区储层流体超压演化差异特征与成藏机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 926-943.
- XUE Yifan, ZHAO Haitao, HUANG Yahao, et al. Differential fluid overpressure evolution and hydrocarbon accumulation mechanisms of deep Ordovician reservoirs in areas with and without strike-slip faults, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 926-943.
- [26] 杨小艺, 刘成林, 王飞龙, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷西南洼古近系东营组超压分布特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 96-112.
- YANG Xiaoyi, LIU Chenglin, WANG Feilong, et al. Distribution and origin of overpressure in the Paleogene Dongying Formation in the southwestern sub-sag, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 96-112.
- [27] 刘华, 王伸, 蒋子月, 等. 塔里木盆地阿满过渡带奥陶系油气成藏期压力特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(2): 82-92.
- LIU Hua, WANG Shen, JIANG Ziyue, et al. Pressure characteristics during hydrocarbon charging of Ordovician reservoirs in transitional zone between Awati and Manjar Depressions in Tarim Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(2): 82-92.
- [28] 何森, 周长铨, 王志远, 等. 东海西湖凹陷区深层压力突变成因及预测方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(4): 105-114.
- HE Miao, ZHOU Changcheng, WANG Zhiyuan, et al. Causes and prediction method of abrupt change of deep formation pressure in Xihu Depression of East China Sea [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(4): 105-114.
- [29] 杨柳, 公飞, 姜晓宇, 等. CO₂-盐水-砂砾岩作用机理与矿物成分、流体赋存及孔隙变化特征——以准噶尔盆地玛湖凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 967-982.
- YANG Liu, GONG Fei, JIANG Xiaoyu, et al. Mechanisms behind CO₂-brine-sandy conglomerate interactions and resulting variations in mineral components, fluid occurrence, and pores: A case study of the Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 967-982.
- [30] 胡耀, 贾承造, 庞雄奇, 等. 远源型致密油气藏运聚动力与成藏模式——以准噶尔盆地玛湖凹陷三叠系百口泉组砂砾岩油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(4): 1281-1298.
- HU Yao, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Hydrocarbon migration and accumulation dynamics and model of distal tight hydrocarbon reservoirs: A case study of sandy conglomerate oil reservoirs in the Triassic Baikouquan Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(4): 1281-1298.
- [31] 吕雪雁, 曹喆, 杨光庆, 等. 北非克拉通盆地古生界碎屑岩储层特征与成储机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 944-958.
- LYU Xueyan, CAO Zhe, YANG Guangqing, et al. Characteristics and formation mechanisms of the clastic reservoirs in the Paleozoic cratonic basins of North Africa [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 944-958.
- [32] 宋嘉琦, 肖晖. 川中古隆起震旦系灯二段流体包裹体特征与成藏过程[J]. 断块油气田, 2024, 31(5): 762-770.
- SONG Jiaqi, XIAO Hui. Characteristics of fluid inclusions and accumulation process in the second member of Dengying Formation of the Sinian in central Sichuan paleo-uplift [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2024, 31(5): 762-770.
- [33] 张琦, 朱永贤, 韩天会. 三塘湖油田 NJH 区块中黏油 CO₂ 近混相驱实验及应用[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(1): 114-120.
- ZHANG Qi, ZHU Yongxian, HAN Tianhui. Laboratory experiments and field tests of CO₂ near-miscible flooding for medium-viscosity oil in NJH Block, Santanghu Oilfield [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(1): 114-120.
- [34] 杨宏楠, 乐平, 范伟, 等. CO₂ 溶解度实验及预测模型[J]. 新疆石油地质, 2025, 46(3): 360-366.
- YANG Hongnan, YUE Ping, FAN Wei, et al. CO₂ solubility experiments and prediction model [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(3): 360-366.

(编辑 张玉银)