

渤海湾盆地东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气藏相态演化及成藏过程

王永诗¹, 巩建强², 陈冬霞³, 邱贻博², 茆书巍², 雷文智³, 杨怀宇², 王翘楚³

[1. 中国石化胜利油田分公司, 山东 东营 257000; 2. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015; 3. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249]

摘要:渤海湾盆地东营凹陷北部陡坡带盐家地区深层油气藏经历了复杂的热演化过程,使得深层油气相态类型多变,影响着深层油气勘探开发。通过盆地模拟、 pVT 相态模拟和烃类流体包裹体等综合分析,揭示了盐家地区深层油气相态演化过程,建立了不同类型油气成藏模式。研究表明,东营北带盐家地区古近系沙河街组四段深层油气多种相态垂向有序分布,从浅至深依次发育轻质油、凝析气和干气等多类型油气藏。深层砂砾岩体中油气相态主要受到热演化的控制,而干酪根生烃、原油裂解和外部天然气充注主导了凝析气藏的相态演化过程。基于盐家地区深层砂砾岩体不同类型油气藏的油气相态、储层特征和温压演化史,建立了盐家深层“多期生气,扇中叠置输导-扇根封堵,多相态有序分布”的砂砾岩油气成藏模式,为陆相断陷盆地深层油气的高效勘探提供理论指导。

关键词: pVT 相态模拟;盆地模拟;油气相态演化;油气成藏模式;深层砂砾岩体;古近系;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Phase evolution and accumulation mode of hydrocarbons in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

WANG Yongshi¹, GONG Jianqiang², CHEN Dongxia³, QIU Yibo², MAO Shuwei², LEI Wenzhi³, YANG Huaiyu², WANG Qiaochu³

[1. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China, 3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China]

Abstract: Deep hydrocarbon reservoirs in the Yanjia area in the northern steep slope zone of the Dongying Sag experienced complex thermal evolution. The resultant multiple hydrocarbon phases pose challenges for the exploration and exploitation of deep hydrocarbons. Using basin modeling, pressure-volume-temperature (pVT) phase simulation, and the analysis of hydrocarbon fluid inclusions, we reveal the evolutionary process of deep hydrocarbon phases in the Yanjia area and establish the hydrocarbon accumulation modes of different types of reservoirs. Findings indicate that deep hydrocarbons in the 4th member of the Shahejie Formation in the Yanjia area exhibit an orderly phase distribution in the vertical direction, with reservoirs of light oil, condensate gas, and dry gas found from shallow to deep. While thermal evolution predominantly governed the formation of hydrocarbon phases in deep coarse-grained clastic rocks, the phase evolution in condensate gas reservoirs stemmed from hydrocarbon generation from kerogen, crude oil cracking, and external natural gas charging. By integrating insights into the hydrocarbon phases, characteristics, and temperature and pressure evolutionary histories of different hydrocarbon reservoirs, we propose a hydrocarbon accumulation mode for deep coarse-grained clastic rocks in the Yanjia area. This mode encompasses multi-stage hydrocarbon generation, migration via superimposed sand beds within middle fans while sealed by mudstone within root fans, and the orderly phase distribution of hydrocarbons. This study seeks to provide theoretical guidance for the efficient exploration of deep hydrocarbons in continental downfaulted basins.

Key words: pVT phase simulation, basin simulation, hydrocarbon phase evolution, hydrocarbon accumulation mode, deep coarse-grained clastic rock, Paleogene, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2023-04-03;修回日期:2023-07-28。

第一作者简介:王永诗(1964—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质研究与油气勘探管理。E-mail: wangyish623@sina.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目(P21034-1)。

引用格式:王永诗,巩建强,陈冬霞,等.渤海湾盆地东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气藏相态演化及成藏过程[J].石油与天然气地质,2023,44(5):1159–1172. DOI:10.11743/ogg20230507.

WANG Yongshi, GONG Jianqiang, CHEN Dongxia, et al. Phase evolution and accumulation mode of hydrocarbons in deep coarse-grained elastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1159–1172. DOI: 10.11743/ogg20230507.

随着油气资源勘探程度的不断提高,勘探开发理论的创新和探测技术的进步,深层油气资源越来越多地得到广泛关注,已经成为全球油气勘探的重点领域和目标^[1-2]。但深层油气具有埋藏深、温度高、压力大、构造演化复杂及产能不稳定等特征,使得深层高效勘探和开发面临诸多挑战和难题^[3-4]。深部油气藏与中-浅层油气藏相比较,往往经历了更为复杂的成藏与热演化过程,并且伴随着多期和多相态类型的油气充注,进而影响油气成藏过程、储量计算以及油气藏开发^[5-6]。前人在深层油气相态研究领域进行了一定的探索,朱光有等发现塔里木盆地地下台盆区塔中和塔北隆起的海相碳酸岩地层中存在多种相态的油气藏,并基于油气地球化学方法,揭示了油气相态多样性的成因机制^[7]。陈承声等通过盆地模拟和油气相态模拟相结合,定量分析了塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组深层油气相态物性演化特征^[8]。深层油气相态的形成机制和演化过程研究已成为成藏机制研究的热点和关键点。近年来,济阳坳陷东营凹陷深部砂砾岩地层已有大量凝析气藏发现,引起了石油工作者的极大关注,展现了深层巨大的勘探潜力。

研究区渤海湾盆地东营凹陷北部陡坡带盐家地区古近系沙河街组四段(沙四段)深层发育多相态类型的油气藏,从深至浅表现为干气藏、凝析气藏和轻质油藏的垂向有序分布特征^[9]。东营凹陷沙四段烃源岩经历了复杂的热演化过程,存在多期生烃和多期油气充注的成藏特征。目前,在此地质背景下,深层油气相态垂向分异的形成机制及平面分布认识不足,严重制约了深层油气成藏过程及富集机制的研究。研究区发育的近岸水下扇与半深湖相泥岩横向对接,具有源-储对接和近源充注的优越条件,这样能减小油气运移过程中烃类组分变化的影响,有利于油气相态成因及成藏过程的分析。

本次研究着重开展盆地模拟、*pVT*相态模拟和烃类流体包裹体分析等,探讨东营凹陷北带盐家地区深层油气相态演化史,揭示不同相态油气成藏过程和机制,建立盐家地区基于生烃-储层-压力演化耦合下的深层砂砾岩油气成藏模式。研究成果将有助于深层砂砾岩油气相态的分布预测,为陆相断陷湖盆深层油气勘探提供指导。

1 区域地质概况

东营凹陷位于渤海湾盆地东南部,是中国东部重要的含油气凹陷之一,具有“北断南超”的构造样式(图1a)。东营凹陷北临陈家庄凸起,西靠滨县凸起和青城凸起,东临青坨子凸起,南接鲁西隆起和广饶凸起,为典型的断陷湖盆(图1b)^[10-12]。东营凹陷北部陡坡带位于青坨子凸起、陈家庄凸起和滨县凸起南侧盆地内缘的狭长型断裂带,呈东西向展布,是砂砾岩主要发育区域。其中,盐家地区位于东营凹陷北部陡坡带东段,北以陈家庄凸起为界,南邻民丰生油洼陷,西靠胜北断层,东接永安镇构造断裂带,勘探面积约300 km²。其作为东营凹陷北部陡坡带的一部分,基底断层产状上陡下缓,沿边界断裂发育多条与边界断裂走向一致的伴生断裂,平面延伸3~7 km,断距在20~100 m,继承性较好(图1b)。

盐家地区沙四段为典型的盐湖沉积,发育灰黑色泥岩、砂岩和砾岩,并且灰白色膏盐岩和灰色泥岩条带互层^[13]。北部陡坡带沙四段泥岩形成于还原沉积水体中,有机质类型以I型和II₁型为主,泥页岩总有机碳含量(*TOC*)大于2%,为该地区的优质烃源岩。勘探实践表明,北部陡坡带沙四段沉积期广泛发育砂砾岩储层,源-储匹配关系极好,是油气增储上产的重要阵地^[14]。近年来,随着丰深1—斜1、丰深斜101和丰深斜11等井深层油气藏的发现,盐家地区沙四下亚段展现出良好的勘探潜力(图1c)。

2 深层油气分布及相态特征

2.1 油气藏类型分布特征

东营凹陷北部陡坡带砂砾岩扇体从凸起到洼陷呈现出有规律的组合、叠置和展布,由于盖层条件、断裂作用和岩性变化等对圈闭的形成均有一定影响,加之不同成因类型的扇体与周围生油岩及扇体间的接触方式各异,从而形成不同类型的油气藏^[15]。东营北带盐家地区深层沙四段油藏具有沿北部陡坡带东西向平行分布的特征,从民丰洼陷中心到北部陡坡带依次发育了干气藏、凝析气藏和轻质油藏(图2)。从油气藏平

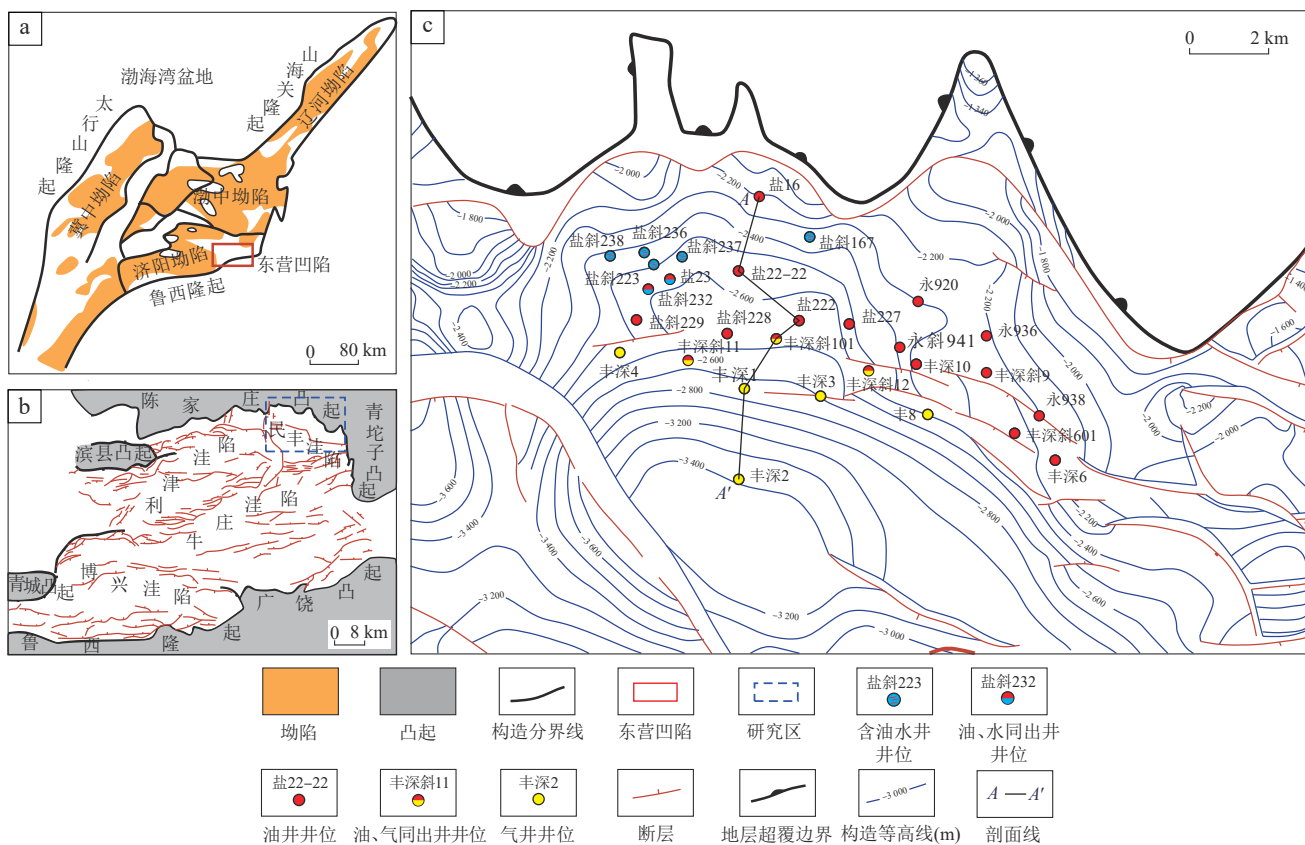


图1 东营凹陷区域位置及构造单元划分

Fig. 1 Regional location and tectonic units of the Dongying Sag

a. 渤海湾盆地构造单元划分; b. 东营凹陷构造单元划分; c. 盐家地区位置及构造特征

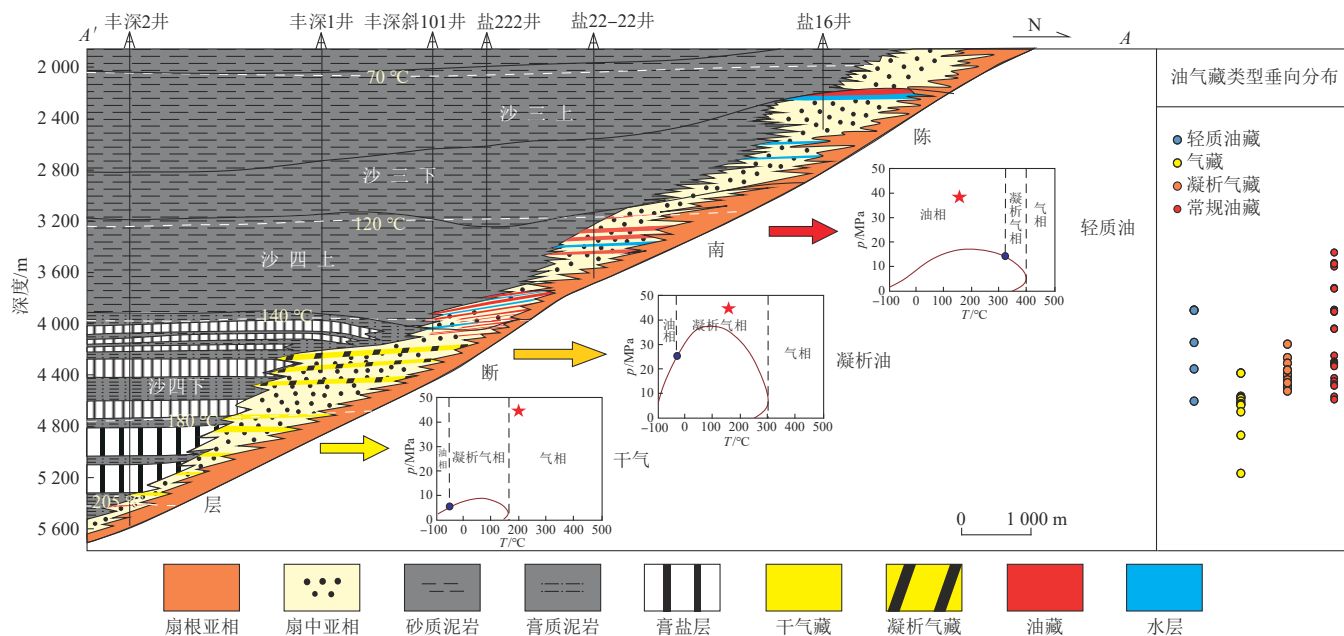


图2 东营凹陷盐家地区深层油气藏油气相态分布特征及分类(剖面位置见图1c)

Fig. 2 Distribution and classification of hydrocarbon phases in deep hydrocarbon reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag

(see Fig. 1c for the profile location)

(p-T相图中红色五角星指示左侧对应深度油气藏的温度和压力值。)

面的展布规律来看,民丰洼陷中泥页岩的埋藏深度与砂砾岩体油气藏存在明显的对应关系,泥页岩埋藏深,临近的砂砾岩储层中多为高成熟演化阶段的烃类产物,反之为成熟阶段生成的油气。具体来看,由于盐家地区西侧的盐斜229井区远离洼陷中心,供烃泥页岩处于成熟阶段,使该地区深层主要发育油藏。同样地,盐家地区东侧永920和永938井区的特征与盐斜229井区相似,以油藏为主;处于洼陷边缘的丰深斜12和丰深斜11井,则以挥发性油藏(轻质油)为主,表现为气态与液态共存的特征;丰深斜101井区更靠近洼陷中心,深层砂砾岩体紧邻深部高成熟的泥页岩,因而以凝析气藏为主;深洼区丰深3井和丰深2井等深层沙四段储层则发育凝析气藏和干气(图1,图2)。

2.2 油气物性特征及相态分析

前人研究表明,供烃的烃源岩成熟度不同,会使得不同类型油气藏中原油和天然气性质存在差异^[16-17]。盐家地区西侧的盐斜229井区原油密度(20℃)介于0.82~0.87 t/m³,平均密度为0.85 t/m³,黏度介于3.32~30.30 mPa·s,均值为12.46 mPa·s,总体表现为低黏度的常规油藏。另外,其天然气平均相对密度为0.83,平均干燥系数为0.73,为典型的湿气,具有油藏伴生气的特征。而中部和东侧的丰深斜11和丰深斜12等油气藏中的原油密度(20℃)为0.81~0.84 t/m³,原油黏度介于1.09~4.79 mPa·s。该地区原油密度和黏度略低于盐斜229井区,为典型的轻质油,原油品质略优于盐斜229井区深层原油,其原油物性之间的细微区别可能是由于该区域相对更靠近生烃中心,所处的热演化阶段或油气二次运移距离存在差异导致的。深层的丰深1和丰深斜101等凝析气藏中原油密度低,平均值为0.78 t/m³,天然气平均相对密度0.69,天然气干燥系数低,位于0.75~0.85,该类型油气藏最主要的特征是具有较高的气/油比,最低气/油比大于1 000 m³/m³。临近生烃中心发育的气藏具有干燥系数高,相对密度低的特征,其干燥系数多大于0.95,为典型的干气藏。盐家地区北部陡坡带深层油气呈现出多种相态垂向有序分布的特征,包括轻质油、凝析气和干气等多类型油气藏^[9]。同时,结合勘探实际,对丰深1井、丰深斜101井和丰深斜12井等开展气体轻组分分析,结合烃组分油气藏类型分析三角图,初步明确盐家地区不同井的油气藏类型(图3)。

总体上,从深层不同类型油气藏的垂向分布规律来看,地层埋深在4 200 m以浅的油气藏以产油为主,少量产气,并且结合 p - T 相图和地层温度、压力可以判识其属于常规轻质油藏。测井解释多在埋深约

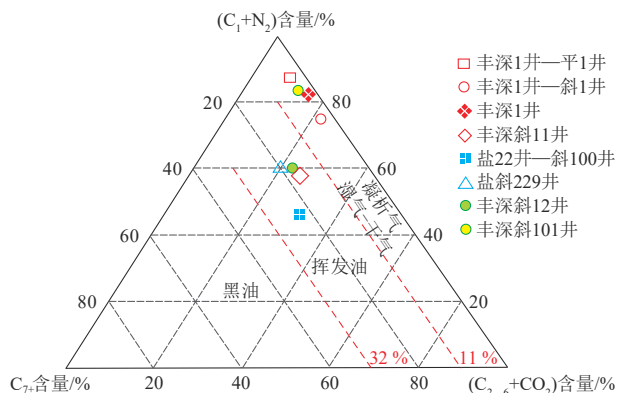


图3 东营凹陷盐家地区深层沙四下亚段砂砾岩油气藏类型划分
Fig. 3 Classification of deep coarse-grained elastic reservoirs in the lower submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the Yanjia area, Dongying Sag

4 200 ~ 4 400 m左右识别出凝析气层,并且该深度油样的 pVT 测试结果也表明该油气藏为凝析气藏。而地层埋深在4 700 m以深的油气藏只产出干气,不产油,表现为非气即干的特征,同时 p - T 相图指示该埋深下的油气为纯气相,为常规干气藏(图2)。

3 生烃-温压主控下的油气相态演化

基于干酪根热降解生油理论,随着热演化程度的增加,烃源岩在各热演化阶段可产出不同类型的烃类^[18-19]。研究表明,在低-中成熟阶段[镜质体反射率(R_o) = 0.5% ~ 1.3%],主要产物为液态石油,以中-低分子量烃类为主。当达到高成熟阶段时(R_o = 1.3% ~ 2.0%),干酪根和重烃热裂解,液态烃类减少,轻烃量迅速增加,在较高地层温度和压力的作用下,形成凝析气和湿气。随着埋藏深度的进一步增加,在高地温作用下(R_o > 2.0%),残留的轻质液态烃进一步裂解为甲烷气,形成过成熟阶段的干气(图4)。从盐家地区深层泥页岩的成熟度指标(R_o)、油气类型分布和油气密度在埋深上的变化规律,可见沙四段深层烃源岩热演化经历多个阶段,从早期生油到生湿气阶段,再到生凝析气阶段,最终到生干气阶段。不同深度的生烃产物与油气藏类型之间具有良好的对应关系,随着埋深增大,热演化程度增强,油气密度变小,油品变轻,说明演化过程中有天然气的生成(图4)。如丰深斜11和丰深斜12井分别在垂深4 120 m和4 200 m附近发现了油气藏,其临近的烃源岩埋深约4 160 m,烃源岩成熟度 $R_o \approx 1.1\%$ 时,为轻质油藏;而丰深1和丰深斜101井油气藏垂深分别在4 300 m和4 100 m,临近的烃源岩分别发育在埋深约4 280 m和4 100 m,其源

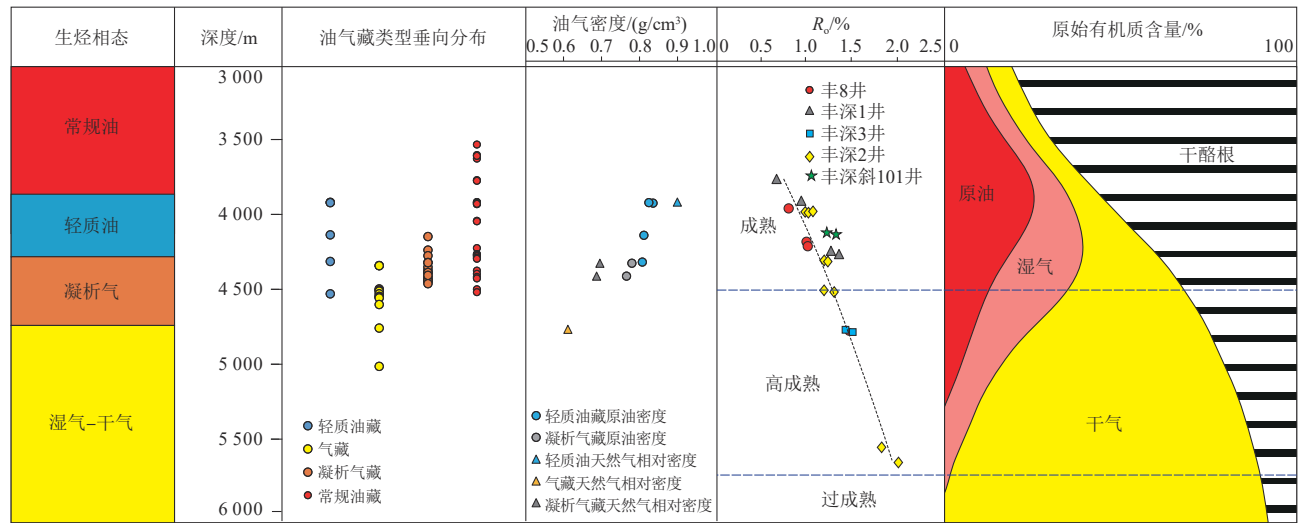


图4 东营凹陷盐家地区深层烃源岩热演化、油气类型和油气密度关系

Fig. 4 Relationships between the thermal evolution of deep source rocks, hydrocarbon types, and the hydrocarbon density in the Yanjia area, Dongying Sag

岩成熟度分别为 $R_o \approx 1.4\%$ 和 $R_o = 1.3\%$ 时,为凝析气藏,尽管丰深斜101井凝析气藏埋藏相对较浅,因其临近高演化的烃源岩,形成凝析气藏;丰深斜11井等油气藏埋藏较深,因其临近较高演化的烃源岩,形成挥发性油藏。包友书等和Chen等均通过高温高压生烃模拟实验揭示了东营凹陷沙四段烃源岩不同演化阶段生成烃类相态特征与埋深、实测 R_o 的对应关系,反映了烃源岩热演化对油气相态的影响^[20-21]。因此,深层油气藏不同相态的形成与临近的供烃泥页岩热演化过程密切相关。

3.1 生烃、温度和压力耦合演化过程

研究表明,深层砂砾岩体中油气相态受到烃源岩生烃温度、压力的影响^[9]。因此,本次研究通过PetroMod盆地模拟软件对盐家地区深层沙四下亚段烃源岩生烃演化和温压演化进行重建(图5a),并对模拟的地层温度和 R_o 进行了校正(图5b),来进一步指出温压对烃源岩成熟度演化的影响。

盐家地区沙四段深层主力烃源岩生烃史的模拟结果显示深层烃源岩发育3期生烃高峰,第一期39.4~33.0 Ma,第二期26.4~21.5 Ma,第三期2.0~0 Ma(图5c)。其中前两期均以生油为主,第三期以生气为主。从沙三段沉积时期(42.0 Ma)深层烃源岩开始进入“生油窗”,开始大量生成液态石油。随后,大约在17.0 Ma左右东营组沉积时期,由于地层抬升,地层遭受剥蚀,地层温度降低,使得生烃减弱。地层抬升结束后,地层继续深埋,地层温度不断增高,在4.0 Ma后进入过成熟生气阶段,残余的液态烃和烃源岩中的干酪根

裂解,大量生成原油裂解气和干酪根裂解气。这表明盐家地区深层烃源岩具有早期生油、晚期生气的特征。

古地层压力和古地层温度主要受东营凹陷构造演化过程影响。埋藏初期,随着地层快速沉积,地层温度和压力不断上升,在约39.0 Ma的第一期生烃高峰,地层温度到达150℃,泥岩和储层中地层压力为50.0 MPa和30.0 MPa,源、储压差可达20.0 MPa。随着地层进一步深埋,在第二期生烃高峰(约24.0 Ma),地层温度进一步增大到165℃,泥岩地层压力达到60.0 MPa,源、储压差为22.0 MPa。东营组沉积时期,由于地层抬升剥蚀,导致地层温度和压力降低。明化镇组沉积时期,地层再次沉降深埋,地层温度逐渐升高,烃源岩再次进入生烃门限,在第三期生烃高峰(约2.0 Ma)生成天然气,泥岩地层压力在生气增压的作用达到70.0 MPa,同时在流体压力传导的作用下,储层中压力约为45.0 MPa,源、储压差达到最大25.0 MPa(图5c)。由此可见,东营凹陷构造演化控制着地层温度和压力的变化,进一步控制深层烃源岩的生烃过程,最终影响油气成藏过程。总体上,盐家地区深层具有烃源岩多期生烃和高源、储压差的特点,烃源岩生烃和地层古温度、压力演化的恢复和三者之间耦合关系共同控制源岩排烃及油气的运聚。

3.2 深层油气相态演化过程

盐家地区深层砂砾岩油气具近源充注特征,油气在从烃源岩生成到排出并运移到储层过程中的温压变化一般不会导致油气初始相态的转变,而是由烃源岩

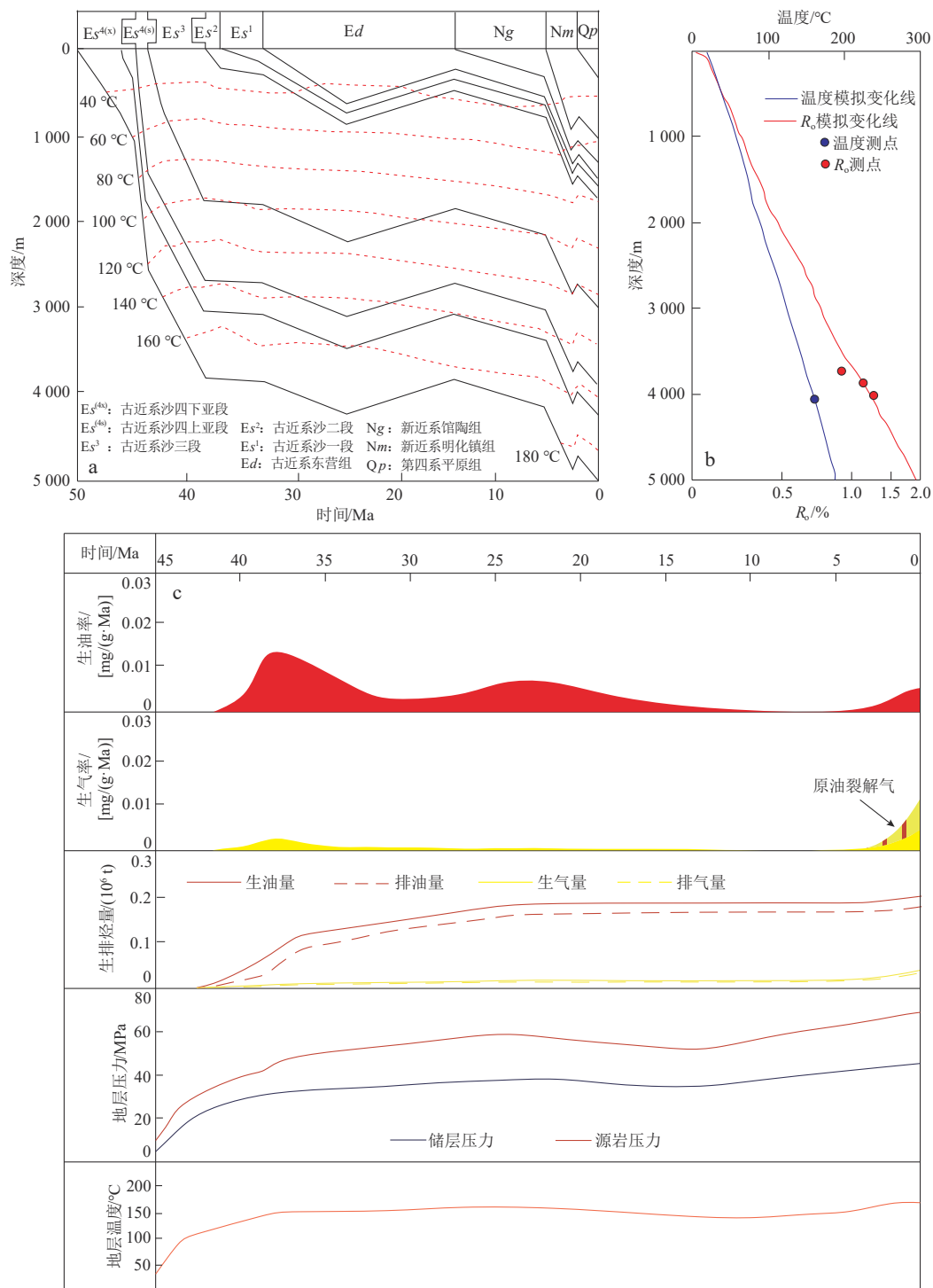


图5 东营凹陷盐家地区丰深1井埋藏史和模拟数据、深层烃源岩生排烃史以及地层温度和压力史

Fig. 5 The burial history of strata, simulated formation temperature, the hydrocarbon generation and expulsion history of deep source rocks, and formation temperature and pressure evolution in well Fengshen 1 in the Yanjia area, Dongying Sag

a. 埋藏史和温度史; b. 地层温度、 R_o 模拟值与实测数据关系; c. 生排烃史及地层温度和压力史

的热演化阶段控制着生成油气的相态类型。因此,储层中捕获的流体包裹体可用于分析充注时期油气的相态类型,可通过烃类包裹体的荧光颜色判识烃类充注时的成熟度^[22-23]。通过对不同相态烃类包裹体的均一温度和荧光颜色进行匹配(图6),并结合建立的埋藏史

确定了各相态烃类包裹体形成的时间和成熟度阶段。在沙三段沉积中期—东营组沉积初期(39 ~ 31 Ma),烃源岩初次生烃,砂砾岩储层中充注了早期成熟阶段生成的淡黄色、绿色液态烃(图6f,图7a,图7b)。随后,东营组沉积中期—馆陶组沉积初期(26 ~ 17 Ma),

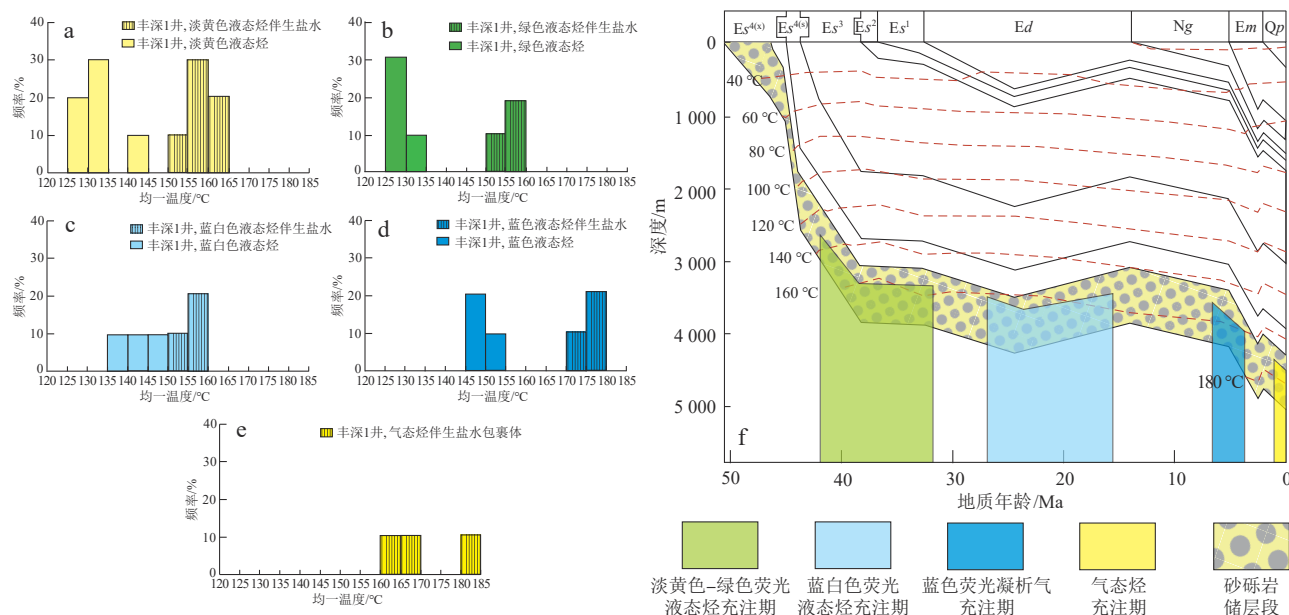


图6 东营凹陷盐家地区深层不同相态烃类包裹体均一温度分布、埋藏史及不同相态烃类充注期次

Fig. 6 Inclusion homogenization temperature distribution of deep hydrocarbons with different phases, the burial history combined with the charging stages in the Yanjia area, Dongying Sag

a—d. 分别为淡黄色、绿色、蓝白色、蓝色荧光液态烃包裹体及其伴生盐水包裹体均一温度频率分布直方图; e. 气态烃伴生盐水包裹体均一温度频率分布直方图; f. 埋藏史及不同相态烃类充注时期

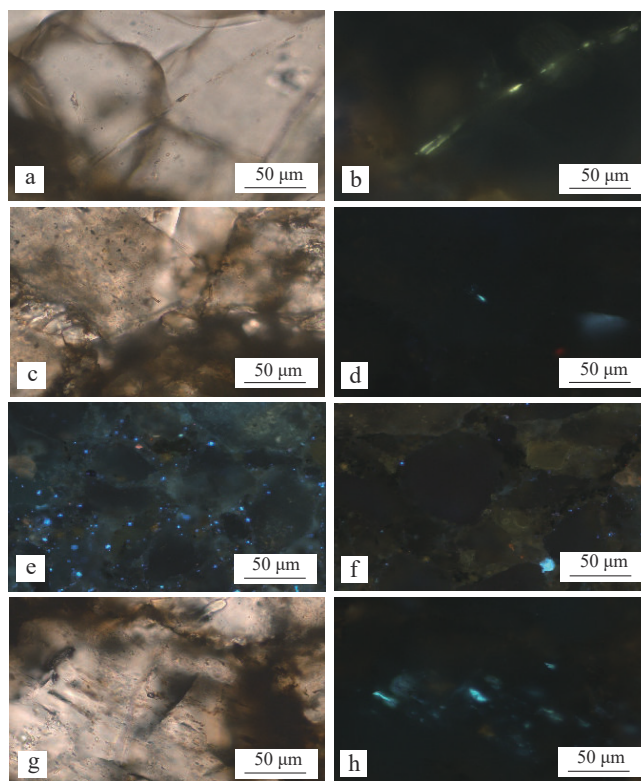


图7 东营凹陷盐家地区丰深1井深层不同相态烃类包裹体镜下照片(埋深4 323 ~ 4 495 m)

Fig. 7 Microscopic images of fluid inclusions of hydrocarbons with different phases in the deep layers of well Fengshen 1 in the Yanjia area, Dongying Sag (at a burial depth from 4 323 to 4 495 m)

a, b. 分别为石英颗粒中的绿色荧光油气包裹体; c, d. 分别为方解石胶结物中的黄色荧光油气包裹体; e, f. 分别为石英颗粒中的蓝白色荧光油气包裹体; g, h. 分别为石英颗粒中的蓝色荧光油气包裹体
(a, c, g. 为单偏光照片; b, d, e, f, h. 为荧光照片。)

地层埋深增大,地层温度升高,砂砾岩储层中充注了成熟-高成熟阶段生成的绿色、蓝白色液态烃(图 6f, 图 7c—f)。在经过地层抬升剥蚀后,于馆陶组沉积早期地层再次沉降深埋,明化镇组沉积时期(7~5 Ma)烃源岩再次达到生烃门限,在更高的地温条件下,砂砾岩储层中充注了高成熟阶段生成的蓝色富气相凝析油(图 6f, 图 7g, 图 7h)。至今,深层烃源岩进入高-过成熟度阶段,干酪根和残余的液态烃类不断热裂解生成天然气,并且在砂砾岩储层的包裹体中观察到具有高均一温度的气相包裹体。综合来看,研究区深层烃源岩经历了两期深埋,从早期生油,到生湿气-凝析气,再到晚期生干气,多热演化阶段导致了多种相态的烃类流体的注入。

通过烃类流体包裹体的分析,明确了在地质历史时期,油气从烃源岩生成到充注的初始相态演化过程。即烃源岩早期成熟阶段初次生烃充注低熟油,随后至东营组沉积时期,烃源岩达到成熟-高成熟阶段生成轻质油,地层在馆陶组沉积期开始再次发生沉降深埋

后,明化镇组沉积时期烃源岩进入高成熟阶段生成凝析油。至今,烃源岩热演化程度达到生干气阶段。

进一步研究表明,深层上部油藏在地质历史期中并未发生相态转变,主要受到热演化控制^[24]。而深层凝析气藏的相态演化过程较为复杂,在沙二段沉积时期(约 38 Ma),烃源岩进入“生油窗”初次生烃,由成熟烃源岩生成、排出、运移至储层中的液态烃在古地层压力和温度的控制下石油仍然保持液相(图 8a, d)。明化镇组沉积时期,地层温度达到原油热裂解条件,油藏中的大-中分子液态烃裂解生气,同时烃源岩中的干酪根也裂解生成天然气,使得油藏中烃类组分不断变轻,气液比不断增高,导致 p - T 相图发生左移,在地层温度和压力约束下,油藏逐渐形成油、气两相,向凝析气相转变(图 8b, d)。现今,由于地层温度的进一步升高,油气藏中液态烃不断裂解形成的气态烃的比重增大,烃类组分的改变使得临界条件转变,最终在地层压力和温度的控制下形成凝析气藏(图 8c, d)。另外,深层干气藏经历从油相到气相的转变,在东营组沉积时

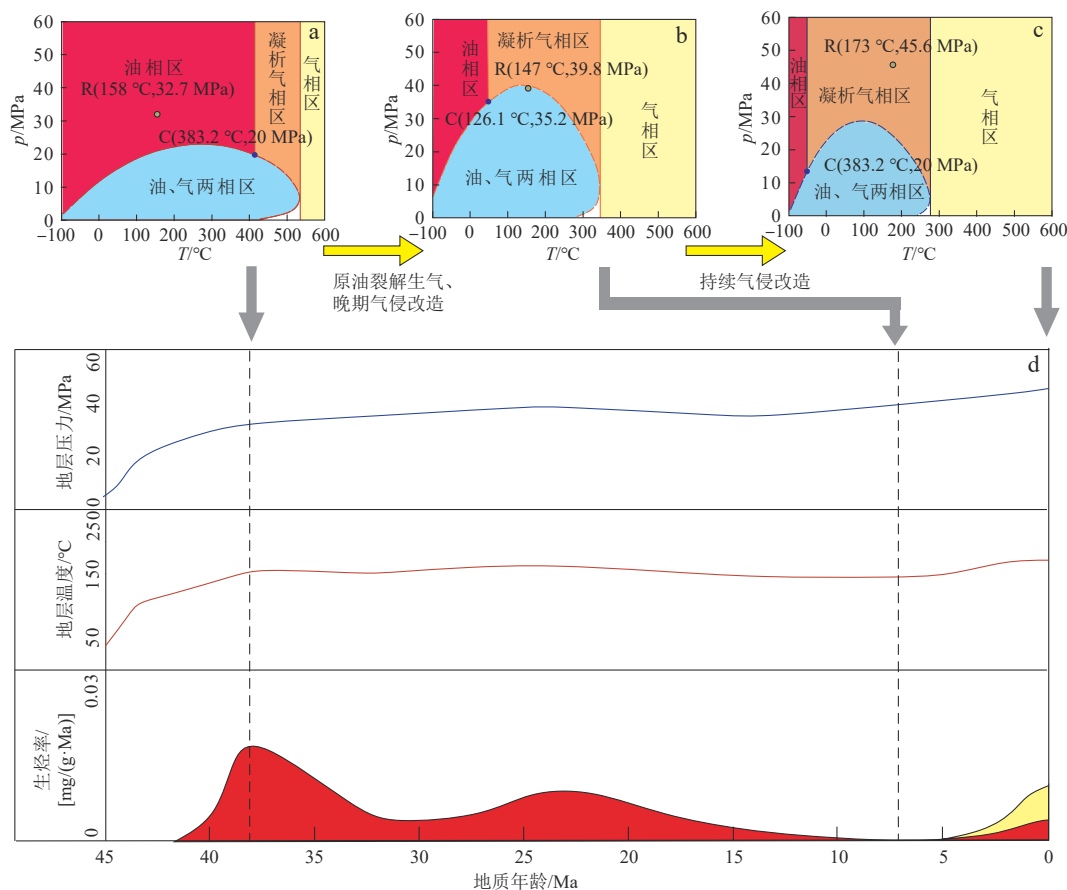


图 8 东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油气相态演化过程

Fig. 8 Evolutionary process of hydrocarbon phases in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag

a. 约 38 Ma, 沙二段沉积时期; b. 约 7 Ma, 明化镇组沉积时期; c. 现今; d 生烃史、地层温度和压力史

(a—c 图中的 C 为临界点, 包含临界温度和临界压力; R 点为储层的温度和压力点。)

期之前储层中聚集了液态石油,从明化镇组沉积时期至今,由于地层深埋,热演化程度增高,油藏中的液态烃不断遭受热裂解转化为气态烃,同时高-过成熟烃源岩生成干气,形成现今的深层干气藏。

4 “生-储-压”联合演化下多相态油气成藏机制与模式

东营凹陷盐家地区深层砂砾岩体中发育油藏、凝

析气藏和干气藏,不同类型油气藏的相态演化和成藏过程不同,受到流体改造和温压条件的控制。因此,针对不同的油气藏类型,开展生储-压力联合作用下控藏综合分析,建立了深层砂砾岩“多期生油气,扇中叠置输导-扇根封堵,多相态有序分布”的油气成藏模式。

4.1 早期油藏充注及模式

研究表明,油气充注初期(约39 Ma)成熟烃源岩

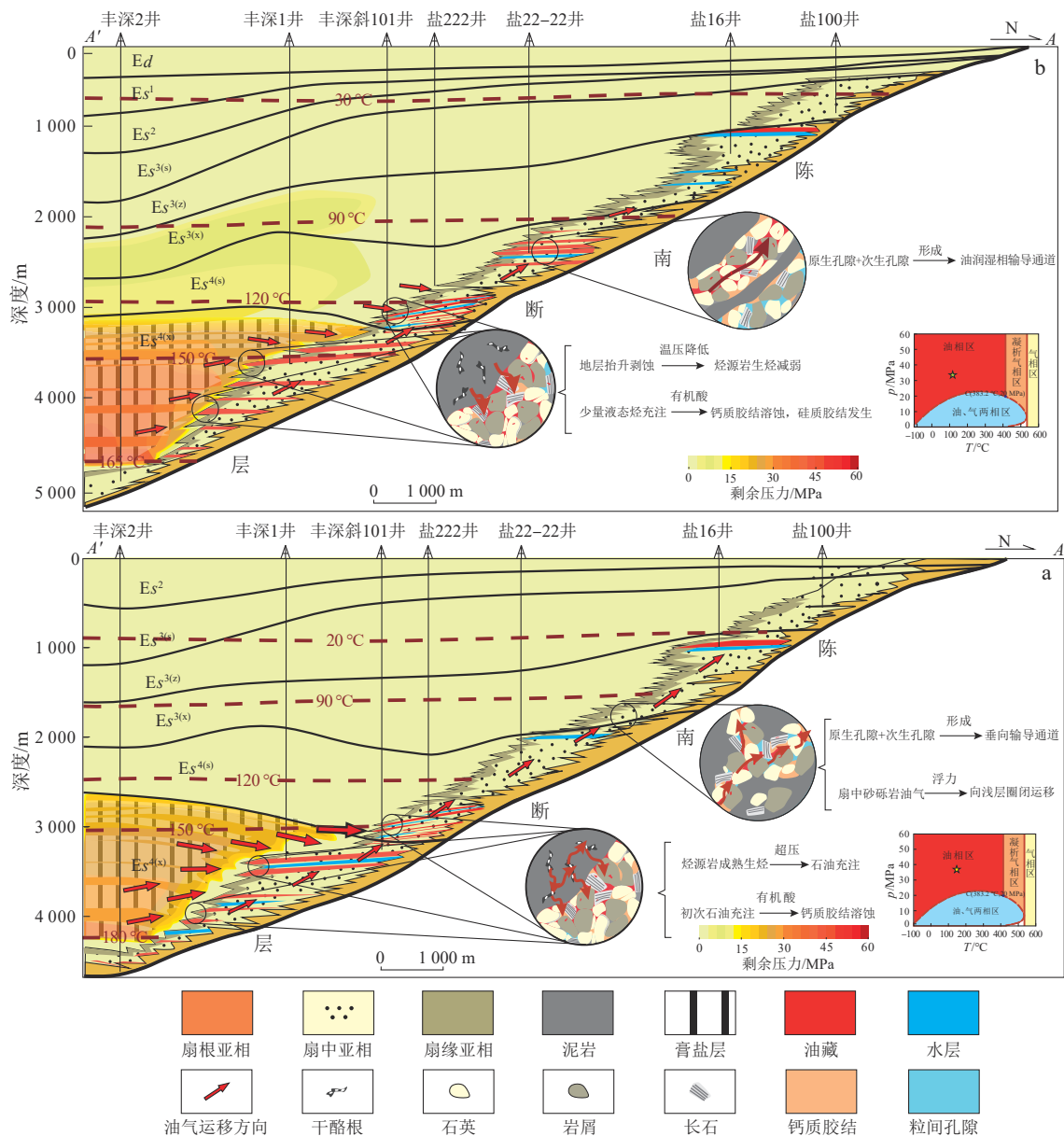


图9 东营凹陷盐家地区深层砂砾岩油藏成藏过程及模式(剖面位置见图1c)

Fig. 9 Accumulation process and mode of deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag (see Fig. 1c for the profile location)

a. 油气充注期(约39 Ma); b. 地层抬升期(约17 Ma)

(p - T 相图中的C点为临界点,包含临界温度和临界压力;五角星代表对应油气藏的温压条件,即该时期的温度和压力值在 p - T 相图中的位置,判断相态类型。)

生烃产生的超压为液态石油和有机酸的充注提供动力,扇中早期钙质胶结逐渐被溶蚀,孔隙中充注的油气抵抗增强的压实作用^[25-27]。扇中的油气在浮力的作用下向上运移,温度和压力降低,烃类仍保持油相,同时受扇根封堵作用,形成垂向分布的油藏(图9a,b)。在东营组沉积地层抬升期(约17 Ma),地层抬升导致地层温度和压力降低,烃源岩生烃减弱,仅有少量液态石油充注,砂砾岩体扇中储层中钙质胶结继续溶蚀,少量硅质胶结发育,次生孔隙大量发育^[28]。此时的烃类组分基本不变,温压降低的条件下,油藏仍然保持单一油相。

随着地层再次深埋,地层温度和压力增高,烃源岩再次达到成熟阶段二次生烃。在高源、储压差的作用下,成熟烃源岩持续向砂砾岩中充注液态石油。随后,以浮力和超压为动力,石油和有机酸在扇中储层中运移,有机酸溶蚀早期钙质胶结,不断改善储层质量,同时石油在扇中优质储集层中受扇根封堵富集成藏,并一直延续至今(5~0 Ma)。

4.2 深层凝析气成藏过程及模式

盐家地区深层烃源岩经历多阶段热演化过程使得深部天然气的成因较为复杂。对研究区部分井天然气组分和同位素数据进行分析^[29-30],在 $\ln(C_1/C_2)$ - $\ln(C_2/C_3)$ 和 $\ln(C_2/C_3)$ - $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$ 交会图上显示为原油裂解气和干酪根裂解气的混合(图10)。表明沙四段深层凝析气藏的形成过程,主要受到热演化和外部天然气充注的影响。

在原油裂解期(约5 Ma),由于地层持续深埋,地

层温度和压力不断升高,使得沙四段古油藏中的原油发生裂解,所形成的沥青充填原生孔隙,但由于该时期热演化程度有限($R_o=1.3\%$),原油裂解程度较低。原油裂解生气引起的增压作用在储层中形成少量微裂缝,同时,侧向高成熟烃源岩在源、储压差作用下向砂砾岩储层充注天然气(凝析气)。在原油裂解生气和天然气充注作用下,油气藏中气/油比不断增加,油气处于两相共存阶段(图11a)。随着地层深埋至现今,沙四段早期古油藏中的原油持续裂解,侧向高-过成熟烃源岩开始生成并向储层中充注干气,油藏中气态烃组分逐渐增多。最终,在“多源供气、气侵改造”的条件下,改变了原始烃类组分和相态临界条件,使得古油藏形成了高气/油比的凝析气藏(图11b)。

4.3 深层干气藏成藏过程及模式

深部干气藏的成因主要是地层持续深埋,温度和压力不断升高,促使沙四段深部古油藏中的原油大量裂解和侧向过成熟烃源岩裂解,生成的大量气体充注成藏。由于深部处于高热演化阶段,使得原油裂解程度较高($R_o>1.6\%$),可形成大量裂解气。同时,增压作用导致储层中形成大量微裂缝,微小的输导通道利于过成熟烃源岩在超压作用下向储层充注干酪根裂解气,逐渐在深部形成干气藏(图12)。

5 结论

1) 盐家地区深层沙四段油气藏呈沿北部陡坡带连片分布特征,平面上从民丰洼陷中心到北部陡坡带

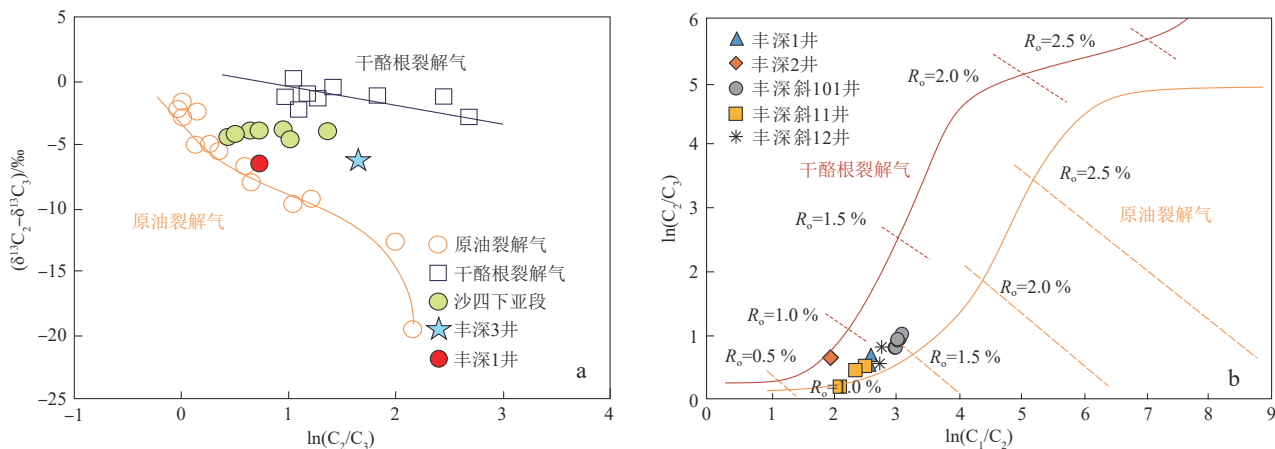


图10 东营凹陷深层天然气类型判别图版

Fig. 10 Identification of deep natural gas types in the Dongying Sag

a. $\ln(C_2/C_3)$ vs. $(\delta^{13}C_2 - \delta^{13}C_3)$; b. $\ln(C_1/C_2)$ vs. $\ln(C_2/C_3)$

(原油裂解气和干酪根裂解气数据来源于文献[31];沙四下亚段和丰深3井天然气数据来源于文献[32]。)

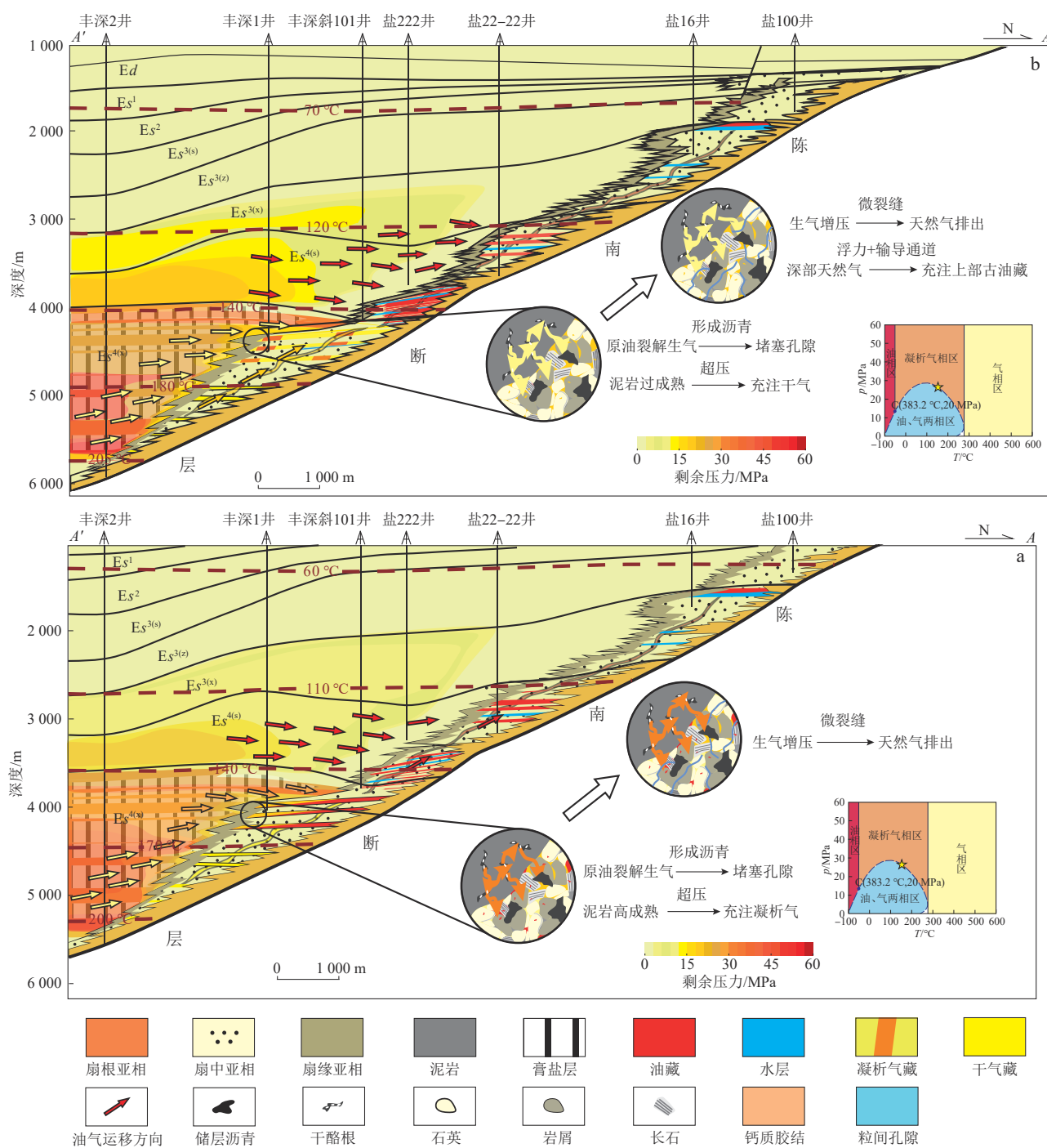


图 11 东营凹陷盐家地区深层砂砾岩凝析气藏成藏过程及模式(剖面位置见图 1c)

Fig. 11 Accumulation process and mode of condensate gas in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag (see Fig. 1c for the profile location)

a. 原油裂解期(约 5 Ma); b. 天然气充注期(现今)

(p - T 相图中的C点为临界点,包含临界温度和临界压力;五角星代表对应油气藏的温压条件,即该时期的温度和压力值在 p - T 相图中的位置,判断相态类型。)

依次发育了干气藏、凝析气藏和油藏。在垂向上深层油气多种相态垂向有序分布,从浅至深依次发育轻质油、凝析气和干气等多类型油气藏,具有明显的油气有序分布特征。

2) 盐家地区深层砂砾岩体中油气相态主要受到烃源岩生烃和温度、压力的影响。通过不同热演化阶段的烃源岩产物相态和温度-压力史,揭示了深层不同油气藏的油气相态演化过程。深层油藏和气藏中油

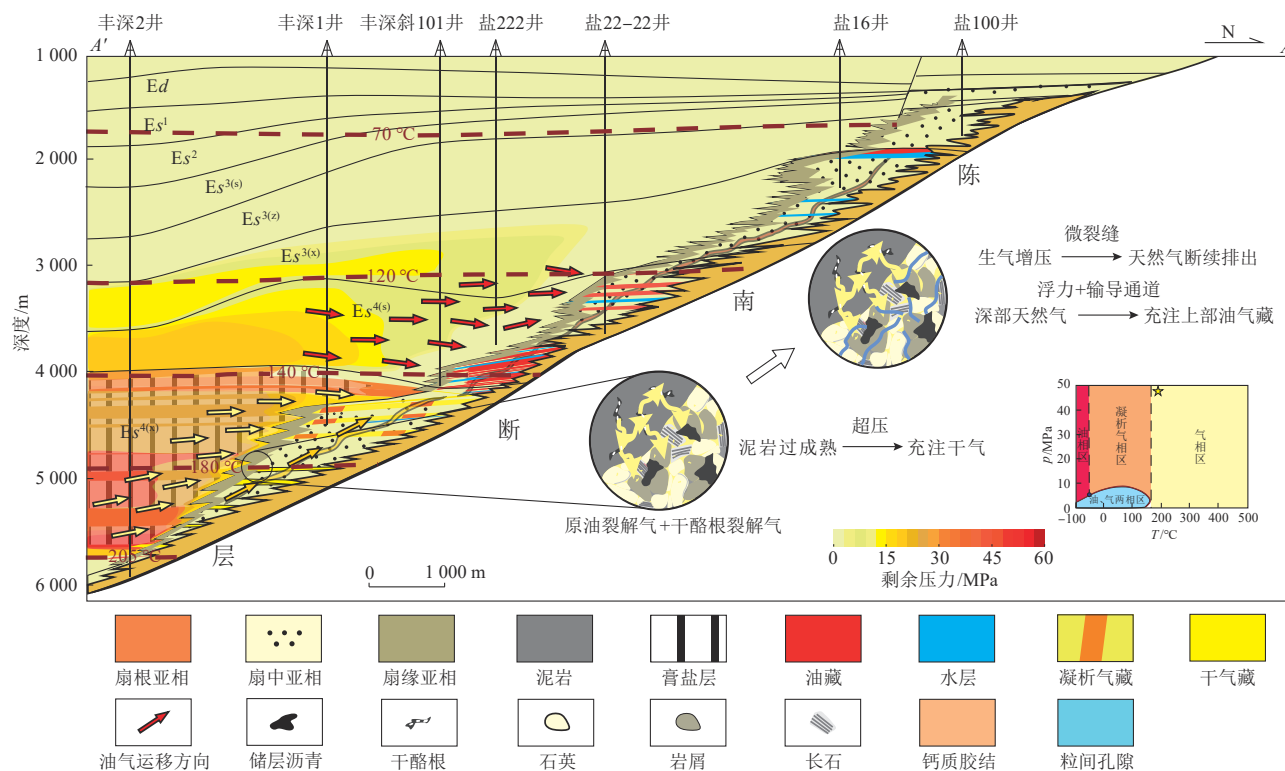


图12 东营凹陷盐家地区深层砂砾岩干气藏成藏过程及模式(剖面位置见图1c)

Fig. 12 Accumulation process and mode of dry gas in deep coarse-grained clastic reservoirs in the Yanjia area, Dongying Sag

(五角星代表对应油气藏的温压条件,即该时期的温度和压力值在 p - T 相图中的位置,判断相态类型。)

气相态主要受到热演化的影响和控制,而热演化、热裂解作用和外部天然气充注控制和影响了凝析气藏中油气的相态演化过程。

3) 基于盐家地区深层砂砾岩体不同类型油气藏的油气相态、储层特征和温压演化,建立了盐家地区水下扇“多期生油气,扇中叠置输导-扇根封堵,多相态有序分布”的深层油气成藏模式,进一步揭示了区域深层油气分布成因序列及控制因素,进而指导油气的高效勘探。

参 考 文 献

- [1] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655-672, 683.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672, 683.
- [2] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [3] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 1-12.
HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 1-12.
- [4] 何海清, 范士芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 17-30.
HE Haiqing, FAN Tuzhi, GUO Xujie, et al. Major achievements in oil and gas exploration of petrochina during the 13th Five-Year Plan period and its development strategy for the 14th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 17-30.
- [5] 谈玉明, 蒋有录, 赵利杰, 等. 东濮凹陷北部地区油气相态演化主控因素及充注模式[J]. 石油实验地质, 2015, 37(1): 28-34.
TAN Yuming, JIANG Youlu, ZHAO Lijie, et al. Main controlling factors of phase evolution and charging pattern of hydrocarbons in northern Dongpu Sag [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(1): 28-34.
- [6] 赵文智, 朱光有, 苏劲, 等. 中国海相油气多期充注与成藏聚集模式研究——以塔里木盆地轮古东地区为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 709-721.
ZHAO Wenzhi, ZHU Guangyou, SU Jin, et al. Study on the

- multi-stage charging and accumulation model of Chinese marine petroleum: Example from eastern Lungu area in the Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 709-721.
- [7] 朱光有, 李婧菲, 张志遥. 深层油气相态多样性成因与次生地球化学作用强度评价——以塔里木盆地海相油气为例[J/OL]. *地球科学*: 1-17 [2023-08-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1622.004.html>.
- ZHU Guangyou, LI Jingfei, ZHANG Zhiyao. Origin of deep oil and gas phase state diversity and evaluation of secondary geochemical intensity—A case study of marine oil and gas in Tarim Basin [J/OL]. *Earth Science*: 1-17 [2023-08-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20211108.1622.004.html>.
- [8] 陈承声, 邓瑞, 张海祖, 等. 塔里木盆地轮探1井下寒武统超深层油气相态演化定量模拟[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(1): 96-110.
- CHEN Chengsheng, DENG Rui, ZHANG Haizu, et al. Quantitative simulation of phase evolution for ultra-deep oil and gas from Lower Cambrian strata of Well Luntan-1 in the Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(1): 96-110.
- [9] 王永诗, 郝雪峰, 胡阳. 富油凹陷油气分布有序性与富集差异性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 785-794.
- WANG Yongshi, HAO Xuefeng, HU Yang. Orderly distribution and differential enrichment of hydrocarbon in oil-rich sags: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 785-794.
- [10] 宋明水, 茆书巍, 林会喜, 等. 断陷湖盆湖底扇砂岩体沉积特征及主控因素分析——以东营凹陷民丰地区沙三段中亚段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(3): 1-13.
- SONG Mingshui, MAO Shuwei, LIN Huixi, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fan sand bodies in faulted basin: A case study of Middle Es₃ in Minfeng area, Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(3): 1-13.
- [11] 邱隆伟, 韩晓彤, 宋璠, 等. 东营凹陷盐22区块沙四上亚段近岸水下扇岩相特征及沉积演化[J]. *大庆石油地质与开发*, 2021, 40(1): 26-37.
- QIU Longwei, HAN Xiaotong, SONG Fan, et al. Lithofacies characteristics and sedimentary evolution of the near-shore subaqueous fans in the upper submember of Es₄ in Block Yan22 of Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(1): 26-37.
- [12] 袁静, 周涛, 乔俊, 等. 深层砂砾岩中的深部热流体作用及其地质意义——以渤海湾盆地东营凹陷民丰—盐家地区古近系沙河街组四段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 929-942.
- YUAN Jing, ZHOU Tao, QIAO Jun, et al. Deep hydrothermalism of deep coarse-grained siliciclastic rocks and its geological significance: A case study of the 4th member of the Paleogene Shahejie Formation in Minfeng-Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 929-942.
- [13] 杨怀宇, 张鹏飞, 邱贻博, 等. 东营凹陷深层自源型油气成藏模式与勘探实践[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(2): 92-101.
- YANG Huaiyu, ZHANG Pengfei, QIU Yibo, et al. Deep self-source type hydrocarbon accumulation pattern and exploration practice in Dongying Sag [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(2): 92-101.
- [14] 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1243-1254.
- SONG Mingshui, WANG Yongshi, HAO Xuefeng, et al. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1243-1254.
- [15] 杨国臣, 于炳松. 隐蔽油气圈闭勘探之发展现状[J]. *岩性油气藏*, 2008, 20(3): 6-11.
- YANG Guochen, YU Bingsong. Development status of exploration of subtle hydrocarbon traps [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20(3): 6-11.
- [16] 张美珍, 李志明, 秦建中, 等. 东营凹陷有效烃源岩成熟度评价[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(3): 12-16, 117-118.
- ZHANG Meizhen, LI Zhiming, QIN Jianzhong, et al. Assessment of the thermal maturity of the effective hydrocarbon source rocks in Dongying Depression [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2008, 23(3): 12-16, 117-118.
- [17] 李志明, 孙中良, 黎茂稳, 等. 陆相基岩型页岩甜点区成熟度界限探讨——以渤海湾盆地东营凹陷沙三下—沙四上亚段为例[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 767-775.
- LI Zhiming, SUN Zhongliang, LI Maowen, et al. Maturity limit of sweet spot area for continental matrix type shale oil: A case study of lower Es₃ and upper Es₄ sub-members in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(5): 767-775.
- [18] TISSOT B P, WELTE D H. *Petroleum formation and occurrence* [M]. Berlin: Springer, 1984: 1-554.
- [19] BEHAR F, KRESSMANN S, RUDKIEWICZ J L, et al. Experimental simulation in a confined system and kinetic modelling of kerogen and oil cracking [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19(1/3): 173-189.
- [20] 包友书, 张林晔, 张守春, 等. 东营凹陷油气资源相态类型分布规律[J]. *石油学报*, 2009, 30(4): 530-535.
- BAO Youshu, ZHANG Linye, ZHANG Shouchun, et al. Distribution of phase type of hydrocarbon resources in Dongying Depression [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 30(4): 530-535.
- [21] CHEN Zhonghong, QIAO Rongzhen, LI Chenyi, et al. Hydrocarbon generation potential and model of the deep lacustrine

- source rocks in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 140: 105656.
- [22] 欧光习, 李林强, 孙玉梅. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25(1): 1-11.
- OU Guangxi, LI Linqiang, SUN Yumei. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary basins [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(1): 1-11.
- [23] 斯尚华, 赵靖舟, 邹国亮, 等. 原油包裹体中芳香烃组分类型与成熟度关系——以三肇凹陷扶余油层为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(7): 835-840, 864.
- SI Shanghua, ZHAO Jingzhou, ZOU Guoliang, et al. Relationship between aromatic component types and maturity in crude oil inclusions: A case study of Fuyu reservoir in Sanzhao Sag [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(7): 835-840, 864.
- [24] 乔荣臻, 陈中红, 李趁义, 等. 东营凹陷古近系沙河街组深层油气相态及成藏模式[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(3): 374-390.
- QIAO Rongzhen, CHEN Zhonghong, LI Chenyi, et al. Petroleum phase states and accumulation models of the deep Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Depression, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(3): 374-390.
- [25] 王淑萍, 徐守余, 董春梅, 等. 东营凹陷北带沙四下亚段深层砂砾岩储层储集空间特征及成因机制[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(8): 1135-1143.
- WANG Shuping, XU Shouyu, DONG Chunmei, et al. Reservoir-space characteristics and genetic mechanism of deep glutenite reservoir of Es₄^s in the north zone of the Dongying Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(8): 1135-1143.
- [26] 高阳. 渤海湾盆地东营凹陷陡坡带沙四下亚段砂砾岩储层物性主控因素[J]. *大庆石油地质与开发*, 2022, 41(5): 28-36.
- GAO Yang. Main controlling factors of glutenite reservoir property in steep slope zone of Lower Es₄ of Dongying Sag in Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2022, 41(5): 28-36.
- [27] 陈思芮, 王卫学, 曲希玉, 等. 东营凹陷北带沙四上亚段砂砾岩储层物性主控因素分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(4): 1091-1106.
- CHEN Sirui, WANG Weixue, QU Xiyu, et al. Main controlling factors of physical properties of glutenite reservoirs of Es₄^s member in north zone of Dongying Depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4): 1091-1106.
- [28] 胡阳, 刘惠民, 郝雪峰. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩油藏特征及控制因素——以东营凹陷古近系为例[J]. *地质论评*, 2019, 65(S1): 151-152.
- HU Yang, LIU Huimin, HAO Xuefeng. Characteristics and controlling factors of glutenite reservoir in steep slope zone of faulted lacustrine basin: A case study of Paleogene in Dongying Depression [J]. *Geological Review*, 2019, 65(S1): 151-152.
- [29] 邹才能, 谢增业, 李剑, 等. 典型碳酸盐岩大气田规模聚集差异性及其主控因素——以四川盆地安岳气田和鄂尔多斯盆地靖边气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 1-15.
- ZOU Caineng, XIE Zengye, LI Jian, et al. Differences and main controlling factors of large-scale gas accumulations in typical giant carbonate gas fields: A case study on Anyue gas field in the Sichuan Basin and Jingbian gas field in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 1-15.
- [30] 谢增业, 魏国齐, 李剑, 等. 四川盆地川中隆起带震旦系一二叠系天然气地球化学特征及成藏模式[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6): 50-67.
- XIE Zengye, WEI Guoqi, LI Jian, et al. Geochemical characteristics and accumulation pattern of gas reservoirs of the Sinian-Permian in central Sichuan uplift zone, Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6): 50-67.
- [31] GUO Liguang, XIAO Xianming, TIAN Hui, et al. Distinguishing gases derived from oil cracking and kerogen maturation: Insights from laboratory pyrolysis experiments [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(10): 1074-1084.
- [32] QIAO Rongzhen, CHEN Zhonghong. Petroleum phase evolution at high temperature: A combined study of oil cracking experiment and deep oil in Dongying Depression, eastern China [J]. *Fuel*, 2022, 326: 124978.

(编辑 梁 慧)