

岩浆活动对渤中 19-6 潜山油气成藏的影响

李 威, 邓运华

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘要: 渤海湾盆地是中国东部重要含油气盆地。2018 年中国东部最大整装凝析气田—渤中 19-6 气田的发现, 一举打开了渤海湾盆地深层天然气勘探的新领域, 展现了油型盆地天然气勘探的巨大潜力。渤中 19-6 构造带具有上油下气的分布特征, 为了研究该构造带油气的成藏机理, 从烃源岩生排烃史、构造热演化史、岩浆活动、流体包裹体显微荧光与测温技术等方面系统分析渤中 19-6 构造带油气成藏史, 深入研究其形成机理, 认为: 渤中 19-6 构造带凝析气田不同深度的包裹体具有相似的盐度和均一温度分布范围, 且不同深度的均一温度主峰温度相同, 均表现为高于地层的温度, 显示了油气充注属于事件性成藏, 具有穿层、瞬时、高温的特征; 渤中 19-6 构造带岩浆活动发育, 岩浆侵入加速了有机质的成熟, 促进了烃源岩生排烃作用, 烃源岩在短时间内大量形成凝析油气; 渤中 19-6 潜山构造带早期形成的古油藏, 受新构造运动的影响, 向上调整为渤中 19-4 油田, 同时构造活动造成岩浆上涌, 伴随的超临界状态幔源 CO₂ 液体, 加速了油气运移过程, 凝析油气快速充注进入渤中 19-6 潜山圈闭, 形成现今的渤中 19-6 凝析气田。

关键词: 渤海湾盆地; 渤中凹陷; 渤中 19-6 构造; 成藏过程; 岩浆活动

中图分类号: T122

文献标志码: A

Influence of Magmatic Activity on Hydrocarbon Accumulation in Bozhong 19-6 Buried-hill in Bohai Bay Basin

LI Wei, DENG Yunhua

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

Abstract: Bohai Bay Basin is an important oil-bearing basin in eastern China. The discovery of Bozhong 19-6 gas field, the largest integrated condensate gas field in eastern China in 2018, has opened up a new field of deep gas exploration in Bohai bay Basin, showing great potential of gas exploration in oil-type basin. The Bozhong 19-6 structure belt has a unique distribution characteristic of

oil accumulation in shallow part and gas accumulation in deep part. The hydrocarbon accumulation period and adjustment process in buried hill reservoir was investigated using a suite of hydrocarbon generation and expulsion history, tectonic thermal evolution history, magmatic activity, characteristics of fluid inclusions, microfluorescence determination and temperature measurement technology by taking Bozhong 19-6 structure belt as an example. The results show that: The inclusions in the condensate field in the Bozhong 19-6 structural belt have similar distribution ranges of salinity and homogenization temperature at different depths, and the main peak temperature of homogenization temperature at different depths is higher than that of the stratum temperature, which indicates that the oil and gas charging belongs to the event accumulation, which has the characteristics of layer penetration, instantaneous and high temperature. The magmatic activity developed in the Bozhong 19-6 tectonic belt. The magmatic intrusion accelerated the maturation of organic matter and promoted the hydrocarbon generation and expulsion of source rocks, and the source rocks formed a lot of condensate oil and gas in a short time. Bozhong 19-6 buried structure belt, the early formation of the ancient reservoir is affected by the new tectonic movement, adjusted upward for Bozhong 19-4 oilfield, magmatic upwelling activity, with the mantle-derived CO₂ supercritical state of liquid, speeding up the process of oil and gas migration, condensate oil and gas rapidly filling into Bozhong 19-6 buried hill reservoir, forming Bozhong 19-6 gas field.

Key words: Bohai bay Basin; Bozhong depression; Bozhong 19-6 structure belt; accumulation process; magmatic activity

收稿日期: 2021-05-31

第一作者: 李 威(1988—), 男, 工程师, 工学博士, 主要研究方向地球化学与油气成藏。

E-mail: liwei173@cnooc.com.cn.



论文
拓展
介绍

渤海湾盆地是中国东部重要含油气盆地,经历半个多世纪的勘探,发现的大部分含气构造带主要以产油为主,前人也认为渤海湾盆地主要为油型盆地^[1-2]。中国海油通过长期的攻关研究,积极向深层挺进,2018年发现了探明储量超千亿方的整装凝析气田—渤中19-6凝析气田^[1-2]。这一发现,一举打开了渤海湾盆地渤海海域深层天然气勘探的新领域,实现了油型盆地中找大气田的历史性跨越,对于推动渤海湾盆地深层-超深层油气勘探意义重大。

前人对渤中19-6凝析气田成因及来源多有研究^[1-5],在成藏方面从构造沉积演化史、埋藏热史等宏观角度,以及油气地化特征、包裹体特征等微观角度对渤中19-6凝析气田凝析油气成藏主控因素及充注期次进行了相关研究^[6-8],并取得了一定认识:①新近纪晚期,受新构造运动的影响,渤中凹陷沉降速率高达 $320\text{m}\cdot\text{Ma}^{-1}$,快速沉积沉降加速了渤中凹陷各次洼沙河街组烃源岩的成熟演化,熟化速率达 $0.14\%\sim 0.41\%\cdot\text{Ma}^{-1}$,生成大量天然气,形成现今渤中19-6大型天然气藏^[9-10];②利用包裹体均一温度,结合埋藏热史,认为渤中19-6凝析气田原油充注事件为12Ma左右开始,天然气充注时间在5Ma左右开始,具有早油晚气的成藏过程^[4,9-10]。

总结前人的认识,基本都是认为地层快速埋藏引起烃源岩快速熟化,没有探讨岩浆活动等异常热

事件对成藏的影响。但是从构造发育特征及已钻井情况来看,渤中19-6构造带所处区带深大断裂发育,新构造运动期断层活化,岩浆活动普遍,从钻井中普遍见到火山岩等。在成藏方面更多的是对独立的包裹体样进行分析,同时结合埋藏史进行判断;缺乏对包裹体系统性、整体性的分析,对油气成藏没有整体性的认识。鉴于此,本文立足渤中19-6凝析气田所处的构造带,从微观、宏观两方面探讨油气成藏:微观方面主要对包裹体进行系列取样,从纵向上多层次、多深度的进行对比,结合包裹体赋存矿物、包裹体盐度、温度等信息对油气充注特征进行综合对比和判断分析;宏观方面从地质角度分析岩浆活动及其发育特征,同时分析岩浆活动对烃源岩生烃及油气成藏的影响。以期从岩浆等异常热事件的角度,探讨渤海海域中深层潜山油气成藏特征。本文对深入认识渤中凹陷深层潜山油气成藏与分布规律具有重要的科学理论和现实意义。

1 地质概况

渤中凹陷位于渤海湾盆地中东部,面积近 $1\times 10^4\text{km}^2$,是渤海海域面积最大的二级构造单元。渤中19-6凝析气田位于渤中凹陷西南部渤中19-6构造带深层,凝析油气主要赋存于孔店组砂砾岩及潜山中^[1-6](图1)。

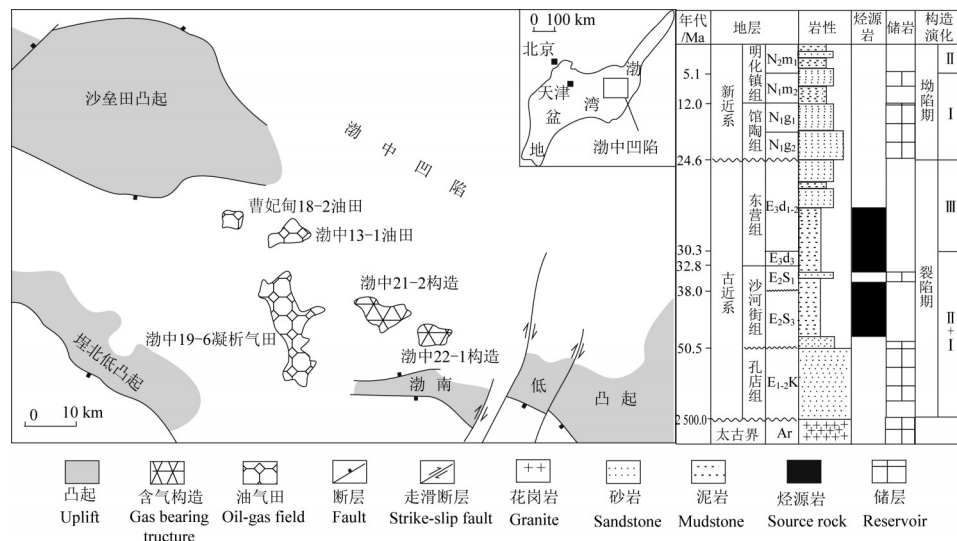


图1 渤中19-6凝析气田区域位置图

Fig.1 Location of Bozhong 19-6 condensate gas field

渤中19-6构造带浅部为渤中19-4中型油田,原油赋存于馆陶组、明化镇组中,构造带北部、西部和东部分别为沙垒田凸起、埕北低凸起和渤南低凸起^[1-3]。渤中19-6构造带及周缘次洼发育沙三段、沙一段、东三段、东

二段4套烃源岩,4套烃源岩有机质丰度均属于有效烃源岩,部分地区达到了好—最好烃源岩,有机质类型以混合型为主,其中沙三段烃源岩的有机质类型主要为II₁型—II₂型,沙一段烃源岩的有机质类型主要为II₁型,东

三段、东二段烃源岩的有机质类型属于Ⅱ₁型—Ⅱ₂型^[1,4]。渤海海域渤中凹陷具有较高的大地热流值,同时沉积了巨厚的东营组和馆陶组—明化镇组地层,使得沙三段、沙一段和东三段、东二段烃源岩的埋深较大,普遍超过4 000 m,最大埋深可超过10 000 m。其中东营组烃源岩整体处于成熟阶段,沙河街组烃源岩属于高一过成熟阶段。烃源岩丰度较高、类型以混合型为主以及较高的热演化程度,是该区得以形成大油气田的基础。

2 油气充注成藏特征

2.1 烃类流体包裹体特征

选取渤中19-6构造带A井进行系列取样,样品

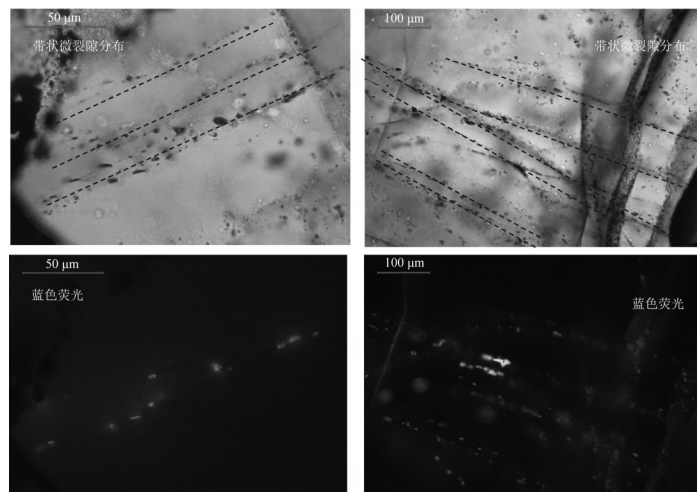


图2 渤中19-6构造带包裹体特征

Fig.2 Characteristics of inclusions in Bozhong 19-6 structure belt

2.2 流体包裹体盐度及均一温度分布

包裹体世代划分与盐度及测温数据相结合的统计分期是确定包裹体宿主岩层油气充注期次和时间的重要途径。油气运移充注过程中,如果是同一流体充注,包裹体具有相同的盐度分布区间,不同流体充注,盐度分布则具有不同的分布特征。多期次油气成藏过程形成的不同世代的包裹体均一温度往往具有多峰态的分布特征,单一“峰温”基本代表了特定油气充注成藏时期所捕获流体包裹体,不同总体的“峰温”往往指示不同充注成藏期次^[11-15]。

从A井不同深度的包裹体赋存体系来看(图2),烃类包裹体发育丰度高,包裹体均呈线状、带状分布于微裂隙中,分布具有明显的方向性。统计流体包裹体盐度,从最浅的3 800 m到最深的4 400 m,盐度分布范围相似,盐度分布主峰均为<3.0%,盐度较低,表明形成包裹体期间,不同深度的赋存矿物捕获

深度从3 800 m~4 400 m,涉及孔店组及基岩潜山,选取四个深度段进行包裹体取样和分析。油气包裹体发育丰度高(GOI为5%±~50%±),包裹体大多为沿切穿砂岩石英颗粒及其加大边的成岩期后微裂隙成线状或成带分布。从油气包裹体发育丰度来看,所选取的包裹体均属于代表油气运移的有效包裹体。镜像观察显示微裂隙中成线状或成带分布的包裹体主要为淡黄色—灰色轻质油包裹体,显示蓝绿色荧光,气烃呈灰色,无荧光显示。部分包裹体中含有沥青,与烃类包裹体伴生的是广泛分布的淡褐色含烃盐水包裹体(图2)。

的为同种性质的流体(图3a)。通过统计不同深度的宿主矿物中与烃类流体包裹体伴生的含烃盐水包裹体均一温度,发现从浅至深包裹体均一温度连续分布,范围相似,主峰温度均为160℃(图3b);结合包裹体赋存体系及包裹体盐度分布特征,表明不同深度的包裹体为同一流体在同一时期充注形成。

利用钻井测试过程中获得的静井温度,统计计算A井的地层温度分布特征,并将不同深度的包裹体均一温度主峰温度与相应深度的地层温度进行对比(图3c);对比图中可以发现,从浅至深(3 800 m~4 400 m)包裹体均一温度主峰温度相同且均高于地层温度,表明该地区的油气充注具有瞬时性、穿层性和高温的特征;同时在基岩潜山中赋存的包裹体还发育有近200℃的流体包裹体。综合判断,油气形成具有异常热事件的成藏特征。对于包裹体均一温度高于埋藏地层温度的流体包裹体,前人做过研究,

认为包裹体形成时期的流体温度高于围岩地层温度,这类流体是典型的深部热液流体。据此,同样认为渤中19-6构造带主要为深部热液流体所引起的异常充注事件^[16]。

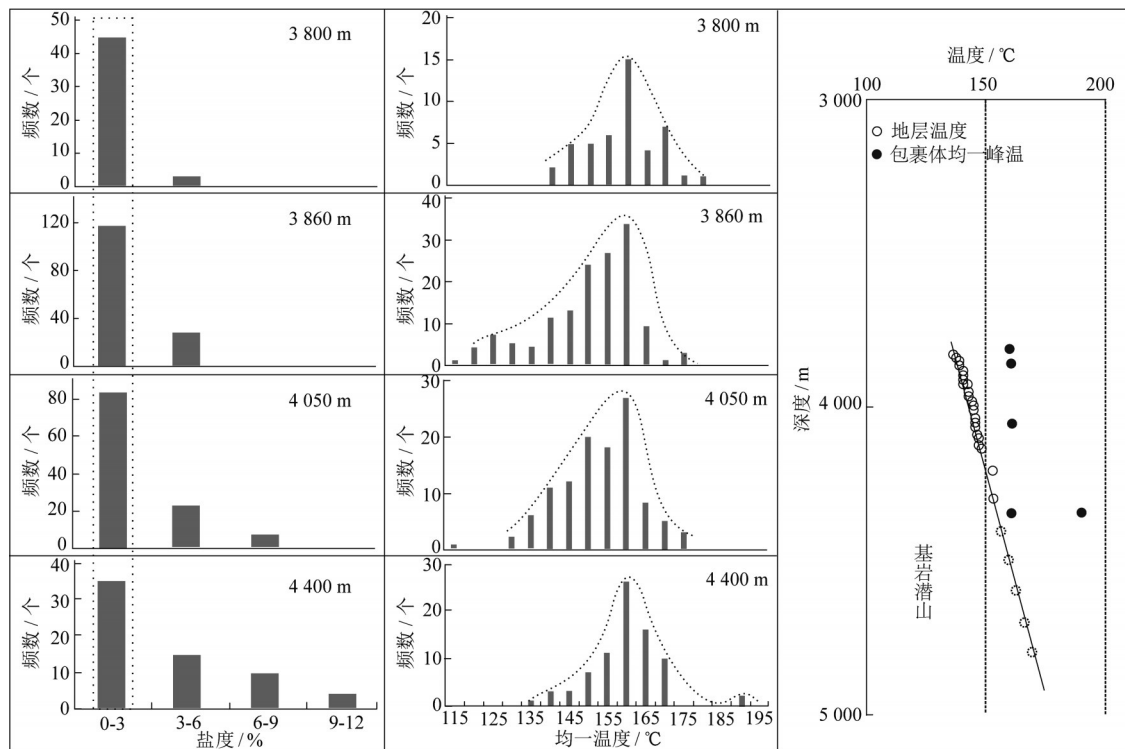


图3 渤中19-6构造带A井包裹体盐度、均一温度、地层温度纵向分布特征

Fig.3 Longitudinal distribution characteristics of inclusions salinity, homogenization temperature and stratum temperature in Well A of Bozhong 19-6 structure belt

3 岩浆对油气成藏的影响

3.1 岩浆发育特征

岩浆活动与构造运动密切相关,断裂的活动强度和位置控制了岩浆活动的规模和火成岩的分布。前人普遍认为郯庐断裂带附近火山活动活跃,火山岩主要呈NE向展布,且对构造活动区的熔岩样品进行了分析,Mg'分布在0.65~0.75之间,主要为幔源型原生岩浆^[17-19]。渤中19-6构造带位于渤中凹陷西南部,区内郯庐断裂和张家口—蓬莱断裂发育,火成岩分布范围较广。从渤中凹陷西南部钻井岩心来看,多口井在基岩潜山、中生界、新生界的沙河街组、东营组和馆陶组钻遇岩浆岩,岩性主要为以辉绿岩为主的基性侵入岩和以玄武岩为主的基性喷出岩。区域分析表明,岩浆岩发育受构造控制,断裂的分布及发育模式控制着岩浆上涌通道和岩浆岩的分布,在郯庐断裂、张家口—蓬莱断裂的共同控制下,伸展断裂和走滑断裂发育,岩浆在沿这些断裂上涌的过程中侵入围岩,在地震剖面上具有明显的穿层特征^[18]。研究区主要发育

以辉绿岩体为主的侵入岩,在地震剖面中与围岩界面较为清晰,岩体形态普遍不规则,多分布于断层两侧,与围岩界面不平行,突变接触,同时在剖面上也可以发现明显的岩浆通道,具有“裂隙式”上涌的特征(图4)。渤中凹陷西南部晚期发育NE向和近WE向2组断裂,断层切穿基底有效沟通底部岩浆房,是岩浆岩向浅层运移和喷发的主要通道,控制了岩浆岩纵向和平面的分布。前人对渤中凹陷西南部岩浆岩平面分布也有研究,认为岩浆岩平面近NE向展布,多期岩浆平面分布面积超1000 km²^[19]。

3.2 岩浆活动对烃源岩生烃作用的影响

岩浆侵入带来的异常热力对烃源岩的影响是最直接的,在烃源岩生烃的不同阶段,具有不同的效应,它几乎影响了烃源岩演化的全过程。岩浆侵入提高了盆地的地温梯度,加速了有机质的热演化程度,使生油门限变浅,促进生烃作用进程,加速烃源岩的热成熟^[20]。

渤中19-6构造带烃源岩在岩浆高温作用下,热演化加快,生排烃作用明显。从渤中19-6构造带A、B、C三口井的R_o演化图来看(图5):3500米左右开

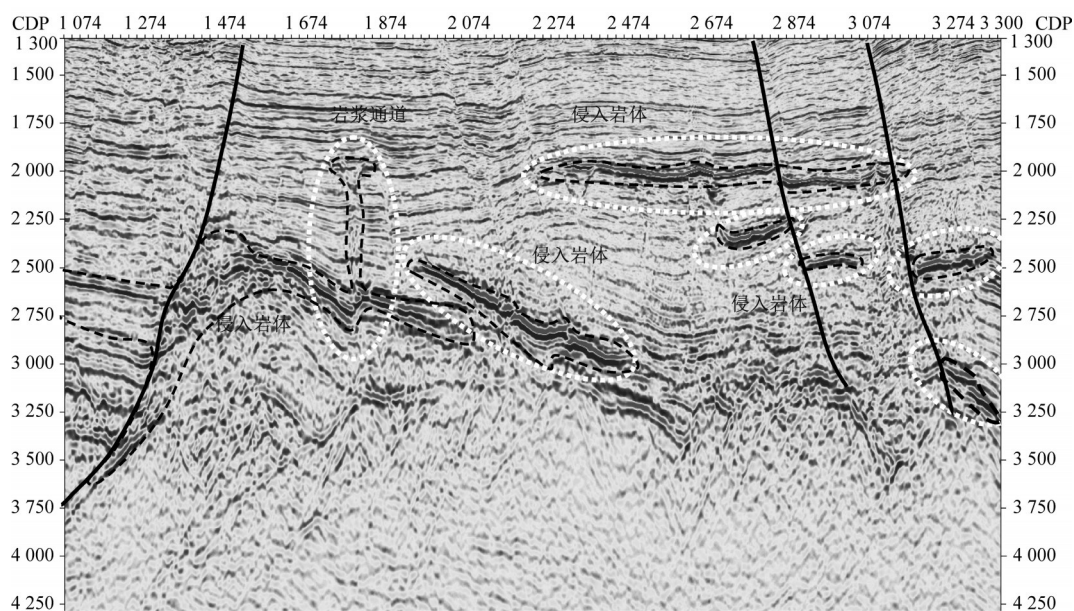


图4 渤中19-6构造带侵入岩体分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of intrusive magmatic rocks in Bozhong 19-6 structure belt

始, R_o 存在明显的跳跃, 在不到 500 m 的深度范围内, R_o 增量 (ΔR_o) 极为明显; 其中 A 井 ΔR_o 超过 1.0%, B 井 ΔR_o 超过 0.7%, C 井 ΔR_o 超过 0.3%, 远超过上覆地层快速埋藏带来的 R_o 增量。同时从研究区 ΔR_o 变化幅度来看, A \rightarrow B \rightarrow C 逐渐减小, 即从南东到北西方向岩浆烘烤作用逐渐减小。结合前人研究^[19], 岩浆岩主要发育在南洼, 导致南洼区域普遍发育高含量

的 CO_2 气藏, 而研究区毗邻南洼, 因此从分布来看受岩浆岩影响明显的区域主要是研究区南东部。

渤中 19-6 构造带 R_o 的突变和跳跃表明岩浆对烃源岩的生烃演化具有明显的影响, 在岩浆作用下, 烃源岩在短时间内快速成熟到高熟(图 5), 也造成了生烃演化的异常变化。

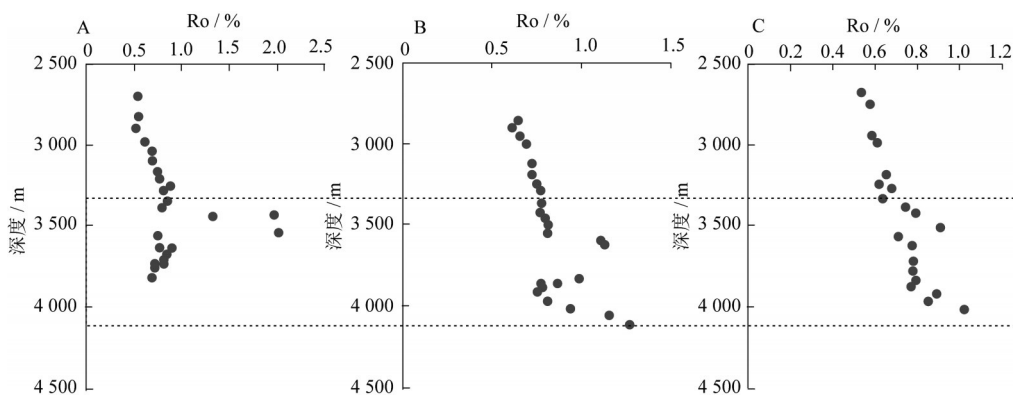
图5 渤中19-6构造带烃源岩 R_o 随深度变化

Fig.5 Relationship between reflectance of source rock and depth in Bozhong 19-6 structure belt

以渤中 19-6 构造带 A 井为例, 表征烃源岩生排烃特征的有机地球化学参数随着岩浆侵入体与烃源岩的接触距离远近呈现出规律性变化(图 6)。有机质 R_o 在 3400 m~3700 m 深度范围内, 从 1.0% 左右突变至 2.0% 左右, 即烃源岩演化程度从成熟阶段在短期内进入高熟阶段, 相应的烃源岩各项指标也呈现突变性变化。TOC 在该深度段急剧下降, 从 1.2% 降低至

0.3% 左右, 表明烃源岩有效碳消耗程度巨大, 从 S_3 、 OI 急剧上升而 HI 跳跃下降, 表明在短期内, 耗氢作用明显, 烃源岩中氢元素消耗殆尽, 而残留死碳含量加大, 生成的 CO_2 含量剧增(S_3), 在该时期烃产率 PI 呈几何倍数增加, 从 0.1 上升至 0.25 左右(图 6)。同时可以看出, 随着距离侵入岩体的增大, 侵入体上下烃源岩都逐渐恢复至正常。其中侵入岩体上部在

300m范围内各项指标跳跃明显,随着距离侵入岩体越近,TOC、HI突变式下降越明显,耗碳、耗氢作用加剧,表明受到侵入体的热烘烤作用明显,300 m之上烃源岩受影响作用较小;在侵入岩体下部,200 m范围内,参数跳跃明显,与上部具有同样的规律,受热烘烤作用显著,200 m之下的深度烃源岩受影响较小。

从这些参数的变化来看,岩浆侵入体对烃源岩的影响显著,不仅加速了有机质的成熟和生烃,同时导致烃源岩排烃作用显著。与上部没有受到侵入体热影响的烃源岩相比(图6),烃源岩受到侵入体热影响时将会使得附近烃源岩生烃转化率增高,转化率曲线发生明显跳动^[21]。

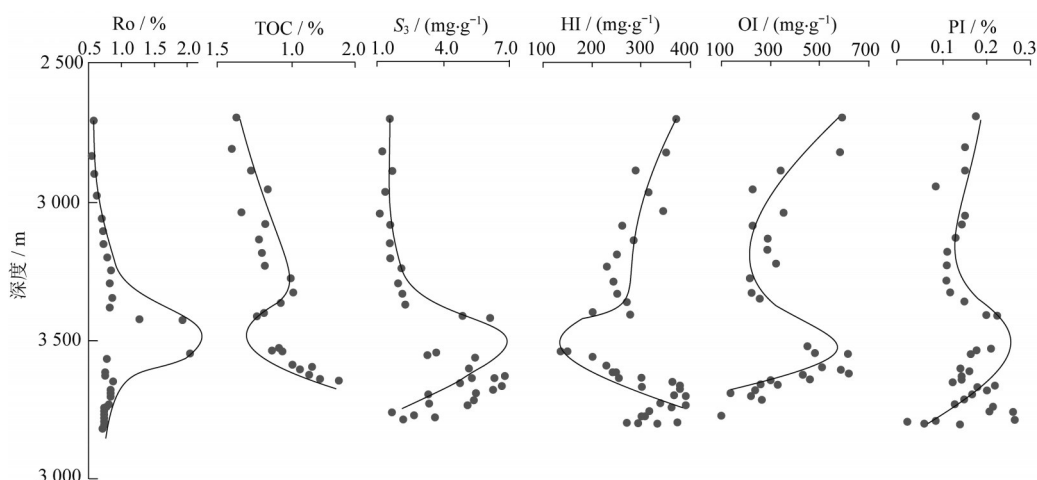


图6 渤中19-6构造带A井烃源岩地球化学剖面图

Fig.6 Geochemical profile of source rock in Well A of Bozhong 19-6 structure belt

3.3 岩浆活动对油气充注的影响

岩浆活动不仅带来大量的热,加速烃源岩的生排烃进程,同时岩浆热流体中还伴有 H_2O 、 CO_2 和 H_2S 等气体。渤中凹陷火山活动比较活跃的地区已发现的天然气藏中, CO_2 含量普遍较高,最高可达90.61%,通过分析认为 CO_2 气体为幔源的无机成因气^[22-23]。紧邻渤中19-6构造带的东南区发育有天然气藏,气藏同样分布于潜山中,气藏中 CO_2 含量介于34.6%~48.92%之间, CO_2 的碳同位素为-3.4‰,氮同位素的 R/R_0 比值超过2,为幔源无机成因^[23],表明渤中19-6构造带所在地区岩浆热流体中伴有大量的 CO_2 气体。

渤中19-6凝析气田中已取的5个天然气样品成分含量, CO_2 含量介于7%~20%之间, CO_2 的碳同位素分布在-7‰~2.5‰之间,属于典型的无机成因天然气,结合周边的 CO_2 气藏成因,认为渤中19-6构造带中 CO_2 属于幔源成因气。渤中19-6构造带包裹体中可见深灰色的天然气包裹体,主要沿石英斑晶微裂隙成带分布,拉曼测试为 CO_2 气体和 CH_4 气体(图7)包裹体中 CO_2 气体和 CH_4 气体为共存关系,说明油气运移过程中,岩浆热流体所伴生的 CO_2 气体同期充注,对油气的运移产生了很大的影响。

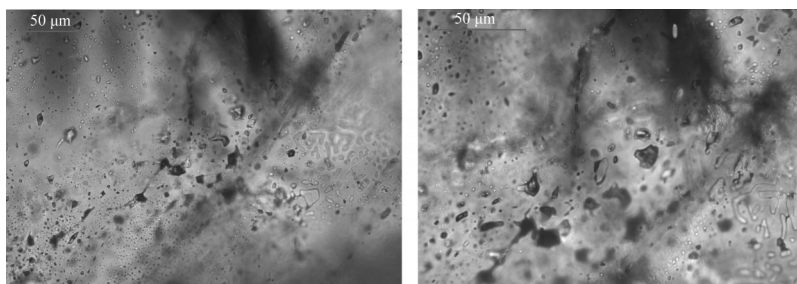


图7 渤中19-6构造带天然气包裹体特征

Fig.7 Characteristics of natural gas inclusions in Bozhong 19-6 structure belt

岩浆热液流体在地下深处通常具有较高的温度和压力,并富含 CO_2 ,是其能溶解携带油气、促使油

气向浅部运移的决定性因素。 CO_2 的临界温度和压力分别为30.98℃和7.38MPa,超临界状态下, CO_2

密度接近于液体、黏度接近于气体、对有机物质的溶解能力非常强^[24]。对油气运移充注来说,超临界态的CO₂是一个非常好的溶剂,能溶解携带油气向浅部地层运移。同时由于CO₂为非极性分子,对烃源岩生成的烃类组分具有相容性,因此从分子极性来说油气也较易于溶解到超临界态的CO₂流体。超临界的CO₂的流体除增加油气在热液流体中的溶解能力之外,还能使油水之间的界面张力降低、降低原油黏度、减小油气运动阻力等,有利于油气的快速运移充注^[16]。

渤中19-6构造带位于构造活动区,地温梯度为36 °C·km⁻¹左右,地层压力达到51 MPa,满足CO₂的临界温度和压力。据Gerlach的估算,全球陆相火山岩岩浆房放出CO₂的速率为792 Mt·a⁻¹,而喷发放出CO₂的速率为66 M·a⁻¹^[25-26]。在渤中凹陷,晚期构造活动活跃期,位于沉积盖层之下的岩浆房在断层的沟通作用下,伴随岩浆的上涌释放出大量幔源CO₂气体,在地层温度和压力条件下,CO₂将以超临界状态通过基底深大断裂向上运移,迅速融入渤中凹陷烃源岩所生成的原油中,并降低原油黏度及油水界面张力促进油气二次运移。

3.4 渤中19-6构造带成藏模式

渤中19-6构造带3 500 m以深的潜山部位富集凝析油气,即现今的渤中19-6凝析气田;构造带上部浅层馆陶组、明化镇组富集原油,形成现今的渤中19-4油藏;油藏与凝析气藏之间发育巨厚的东营组、沙河街组地层,形成渤中19-6构造带上油下气的分布格局。

对比深层和浅层的原油地球化学参数,可以发现在表征母质来源的参数C₂₇/C₂₉甾烷、aaaC₂₇/C₂₉甾烷分布范围一致,均分布在1.0~1.4之间(表1),表明原油母质来源相似;在表征母质环境的参数C₃₀DH/C₂₉T_s、G/C₃₀H^[27],深层和浅层的原油参数分布范围也相似(表1),进一步证实深层和浅层的母源一致。从成熟度参数来看,饱和烃参数C₂₉规则甾

烷的各类异构体分子化合物比值是常用的参数,深层和浅层的参数值均分布在平衡值0.55附近,表明深层和浅层的原油均成熟(表1),考虑到C₂₉规则甾烷异构体参数表征的主要是烃源岩的热演化R_o小于1.0%的阶段生成的产物,因此该参数只能表明渤中19-6构造带深部和浅部原油均成熟,具体的成熟度差异,本文主要利用芳烃甲基菲参数F1进行计算,从计算结果来看,深部原油成熟度主要在1.5%左右,浅层的原油成熟度主要分布在0.9%左右(表1),即说明深部的原油成熟度高于浅部原油。

综合深浅层原油的母源、环境、成熟度进行对比,认为深层和浅层的原油来源相似,生成阶段不同,深层原油为烃源岩高熟阶段生成,而浅部原油为烃源岩成熟阶段形成。

在考虑岩浆对烃源岩烘烤作用的基础上,利用斯伦贝谢公司的PetroMod软件Easy%R_o模型,对渤中19-6构造带渤中南次洼烃源岩进行热成熟度模拟,并利用渤中19-6构造带的烃源岩实测R_o进行热演化标定;同时选取渤中凹陷中岩浆岩不发育的次洼烃源岩进行成熟度模拟,两者进行对比。

烃源岩成熟度演化史表明(图8),南次洼烃源岩在40 Ma左右,热演化R_o达到0.5%,进入生烃阶段,35 Ma左右,热演化R_o达到0.6%左右,烃源岩进入生排烃阶段,油气开始进入裂缝、储层等疏导体中运移,20 Ma左右烃源岩热演化R_o达到0.9%左右,开始大量排烃,所形成的原油成熟度也主要为0.9%左右,成熟原油向渤中19-6构造带运移、聚集,在历史时期中形成目前渤中19-4油田的烃类主体;15 Ma开始,烃源岩热演化加速,10 Ma烃源岩热演化程度达到1.5%左右,处于生成湿气阶段,排烃作用下凝析气向渤中19-6潜山圈闭运移,开始聚集成藏并持续充注,形成现今的渤中19-6凝析气田烃类主体。而从岩浆岩不发育的地区烃源岩热演化来看,烃源岩成熟度演化是稳步上升的,20 Ma左右进

表1 渤中19-6构造带油气地球化学参数表

Tab.1 Hydrocarbon geochemical parameters table of Bozhong 19-6 structure belt

油田	样品	规则甾烷 C ₂₇ /C ₂₉	aaaC ₂₇ /C ₂₉ 甾烷	C ₃₀ DH/C ₂₉ T _s	G/C ₃₀ H	C ₂₉ aaaS/(S+R)	C ₂₉ αββ/(αββ+aaa)	R _c (2.242×F ₁ -0.166)
渤中19-4油田	a	1.11	1.21	0.58	0.11	0.52	0.53	0.95
	b	1.05	1.12	0.60	0.14	0.51	0.54	0.91
	c	1.06	1.19	0.61	0.16	0.52	0.51	0.96
渤中19-6凝析气田	a	1.27	1.51	0.84	0.09	0.58	0.60	1.60
	b	1.08	1.28	0.81	0.14	0.58	0.56	1.55
	c	1.12	1.28	0.69	0.06	0.59	0.61	1.46
	d	1.13	1.35	0.80	0.07	0.57	0.61	1.59

注:C₃₀DH:C₃₀重排藿烷;C₂₉T_s:C₂₉降新藿烷;G:伽马蜡烷;C₃₀H:C₃₀藿烷;F1:甲基菲指数

入大量生烃阶段,到10 Ma左右烃源岩仍处于成熟—高熟阶段, R_o 未达到1.5%;从两个区域烃源岩

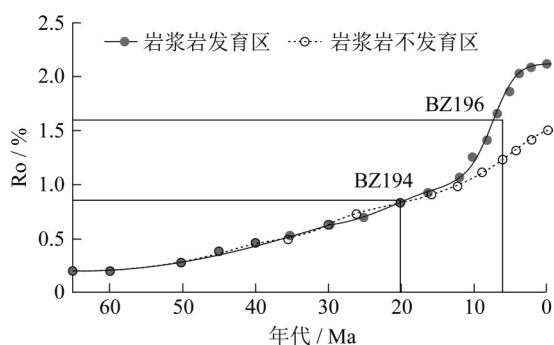


图8 渤中19-6构造带烃源岩热成熟度演化史

Fig.8 Source rocks maturity history in Bozhong 19-6 structure belt

热演化纵向对比来看,从10 Ma左右开始,受岩浆岩烘烤作用明显的渤中19-6区域烃源岩热演化明显加速,在不到5 Ma的时间内, R_o 从1.0%左右增大到

1.6%左右,而未受岩浆烘烤的区域 R_o 在不到5 Ma的时间内,从1.0%左右增大到1.3%左右;即岩浆的烘烤作用对烃源岩具有明显的促进作用,短期内让烃源岩快速进入湿气阶段,形成大量的湿气。

渤中19-6凝析气田主要赋存于太古界潜山中,潜山之上直接覆盖古近纪沉积地层。对于基岩潜山储层的形成具有重要作用的主要是印支运动和燕山运动,强烈挤压、走滑作用,造成渤中19-6构造带褶皱隆升,遭受剥蚀,下古生界剥蚀殆尽,太古界变质岩出露地表,风华淋滤作用强烈^[3,16]。古近纪期间,渤中19-6构造带开始接受沉积,基岩潜山上逐渐被古近系地层覆盖,其中在部分区域沉积有孔店组地层;构造带大部分区域从沙河街组开始接受沉积,发育有沙河街组三段、沙河街组一段、东营组三段等三套烃源岩层。对渤中19-6构造带进行构造演化恢复,同时结合洼陷烃源岩热演化史分析渤中19-6构造带油气成藏模式(图9)。

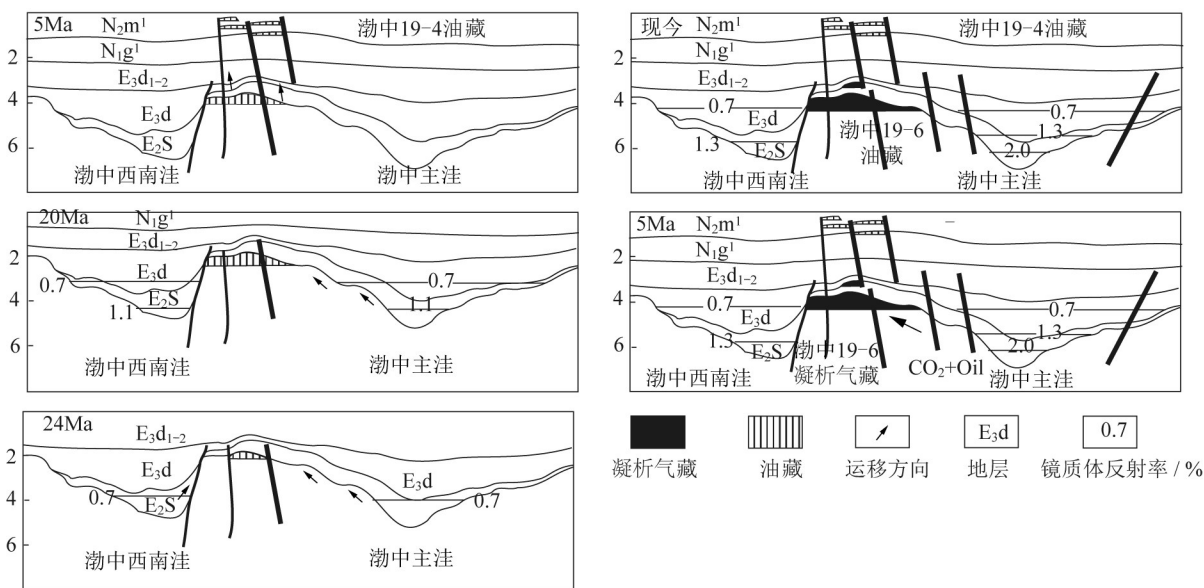


图9 渤中19-6构造带潜山油藏成藏演化史过程

Fig.9 Process recovery of buried hill oils accumulation history in in Bozhong 19-6 structure belt

新近纪时期,馆陶组沉积初期(24 Ma左右),渤中19-6构造带周缘次洼烃源岩成熟度达到0.7%及以上,开始生排烃,油气沿着断层及风化壳向潜山圈闭中运移;20 Ma左右烃源岩演化程度达到1.0%左右,大量生排烃,形成成熟原油,进入断层及风化壳等疏导体系中快速二次运移,在持续的正常成熟原油的充注作用下,渤中19-6潜山圈闭中形成原生正常成熟油藏;中新世新构造运动发育,断裂等构造活跃,潜山圈闭被断层切割,赋存于潜山圈闭中的成熟原油沿着圈闭向上运移,进入浅层明化镇组,形成现今的渤中

19-4中型油藏,现今在渤中19-6潜山圈闭顶层中可见到沥青等,沥青等效反射率为0.9%左右^[1],与现今渤中19-4油藏原油成熟度一致,同时从目前已发现的渤中19-4油藏的原油特征来看,原油以偏稠油藏为主,色谱图中鼓包发育正构烷烃降解、25-降藿烷普遍发育等特征,均表明,现今渤中19-4油藏是前期赋存于渤中19-6潜山圈闭中的原生油藏后期发生次生调整作用形成的。新构造运动的影响不仅沟通了潜山圈闭和浅层圈闭,使得潜山中发育的原生油藏向上调整为偏稠油油藏,同时沟通了岩浆房,岩浆上涌,带来大

量热量,烘烤古近系烃源岩,烃源岩快速高熟化,爆发式生成大量的凝析油气,在超临界状态 CO_2 的作用下,改善了原油二次运移条件,加速了运移过程,凝析油气沿着断层及风化壳等迅速进入渤中19-6潜山圈闭中,形成现今的渤中19-6凝析气藏;造成现今上油下气的分布格局(图9)。岩浆沿断裂上涌,一方面促进烃源岩热演化、凝析油运移,同时对古油藏具有一定的破坏作用。岩浆活动的高温作用促使古油藏迅速蒸发分馏,渤中19-4油藏芳香度为1.5远高于下部渤中19-6凝析气藏的芳香度0.7,同时从渤中19-4油藏的正构烷烃分布来看,碳原子数小于20的部分大量散失,表现为油藏高含非烃、沥青质,低含饱和烃的特征;表明渤中19-6古油藏在形成渤中19-4油藏的过程中明显受到岩浆热作用,普遍发生了蒸发分馏作用,大量轻组分散失;从现今渤中19-4油藏的分布范围来看,局限在渤中19-6构造带中间西部浅层,充满度不高,属于中小型油田。

4 结论

(1)渤中19-6构造带凝析气田不同深度的包裹体具有相似的盐度和均一温度分布范围,且不同深度的均一温度主峰温度均表现为高于地层的温度,显示了油气充注属于事件性成藏,具有穿层、瞬时、高温的特征。

(2)渤中19-6构造带岩浆活动发育,以辉绿岩等侵入岩为主,岩浆侵入对烃源岩的影响显著,加速了有机质的成熟,促使烃源岩在短时间内大量形成凝析油;伴随岩浆侵入的大量超临界状态幔源 CO_2 流体,与渤中凹陷烃源岩所生成的原油迅速融合,降低原油黏度及油水界面张力,改善了原油二次运移条件,加速了运移过程。

(3)渤中19-6潜山构造带在新近纪早期24 Ma左右开始形成古油藏,新近纪晚期,受新构造运动的影响,形成大量断层,古油藏被破坏,向上运移调整形成现今的渤中19-4油田;同时在新构造运动的影响下,断层沟通岩浆房,岩浆上侵,产生大量异常热量,对烃源岩进行烘烤,极大的加速了烃源岩的成熟进程,短时间内大量形成凝析油气,充注进入渤中19-6潜山圈闭,形成现今的渤中19-6凝析气田。

作者贡献声明:

邓运华:负责学术指导,论文审阅。

李威:负责论文撰写、图件绘制。

参考文献:

- [1] XU Changgui, YU Haibo, WANG Jun, *et al.* Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1):1.
- [2] 施和生,王清斌,王军,等. 渤中凹陷深层渤中19-6构造大型凝析气田的发现及勘探意义[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(1):36. SHI hesheng, WANG Qingbin, WANG Jun, *et al.* Discovery and exploration significance of large condensate gas fields in BZ19-6 structure in deep Bozhong sag [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(1):36.
- [3] 薛永安,李慧勇. 渤海海域深层太古界变质岩潜山大型凝析气田的发现及其地质意义[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(3):1. XUE Yong'an, LI Huiyong. Large condensate gas field in deep Archean metamorphic buried hill in Bohai sea: discovery and geological significance [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(3):1.
- [4] 胡安文,牛成民,王德英,等. 渤海湾盆地渤中凹陷渤中19-6构造凝析油气特征与形成机制[J]. *石油学报*, 2020, 41(4):403. HU Anwen, NIU Chengmin, WANG Deying, *et al.* The Characteristics and formation mechanism of condensate oil and gas in Bozhong 19-6 structure, Bozhong sag, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(2): 403.
- [5] 李慧勇,徐云龙,王飞龙,等. 渤海海域深层潜山油气地球化学特征及油气来源[J]. *天然气工业*, 2019, 39(1):51. LI Huiyong, XU Yunlong, WANG Feilong, *et al.* Geochemical characteristics and sources of oil and gas in deep buried hills, Bohai Sea area [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(1):51.
- [6] 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. 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.
- [7] 薛永安. 渤海海域深层天然气勘探的突破与启示[J]. *天然气工业*, 2019, 39(1):11. XUE Yong'an. The breakthrough of the deep-buried gas exploration in the Bohai Sea area and its enlightenment [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(1):11.
- [8] 李威,李友川,兰蕾,等. 渤海湾盆地渤中19-6气田凝析油特征及油气关系[J]. *地质学报*, 2021, 95(3):913. LI Wei, LI Youchuan, LAN Lei, *et al.* Genetic type of condensates oil and oil-gas relationship in the Bozhong 19-6 gas field, Bohai Bay basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(3):913.
- [9] 谢玉洪. 渤海湾盆地渤中凹陷太古界潜山气藏BZ19-6的气源条件与成藏模式[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5):858. XIE Yuhong. Gas resources and accumulation model of BZ19-6 Archean buried-hill large-scale gas reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5):858.
- [10] 薛永安,王奇,牛成民,等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 891. XUE Yong'an, WANG Qi, NIU Chengmin, *et al.*

- Hydrocarbon charging and accumulation of BZ 19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea[J]. *Oil&Gas Geology*, 2020, 41(5): 891.
- [11] 文志刚,李威,窦立荣,等. Bongor盆地Baobab地区潜山油气成藏期次[J]. *石油学报*, 2018,39(8):869.
WEN Zhigang, LI Wei, DOU Lirong, *et al.* Buried-hill hydrocarbon accumulation of Baobab areain Bongor Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018,39(8): 869.
- [12] 席胜利,李文厚,李荣西. 烃源岩生烃期次与油气成藏—以鄂尔多斯盆地西缘马家滩地区长7烃源岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2008,35(6):657.
XI Shengli, LI Wenhou, LI Rongxi. Hydrocarbon generation and reservoir formation : A case from Chang 7 source rock in Majiatan area, west margin of Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008,35(6):657.
- [13] PIRONON J, BARRES Q. Semi-quantitative FT-IR microanalysis limits: Evidence from synthetic hydrocarbon fluid inclusions in sylvite [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54:509.
- [14] 李峰,姜振学,李卓,等. 库车坳陷迪北气藏流体包裹体特征及油气充注历史[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016,47(2):515.
LI Feng, JIANG Zhenxue, LI Zhuo, *et al.* Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon charge history of Dibeigas reservoir in the Kuqa depression [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016,47(2):515.
- [15] 陈刚,丁超,徐黎明,等. 多期次油气成藏流体包裹体间接受定年—以鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气藏为例[J]. *石油学报*, 2012,33(6):1003.
CHEN Gang, DING Chao, XU Liming, *et al.* Indirect dating of multi-stage hydrocarbon accumulations by fluid inclusion data: a case study of the Permian hydrocarbon accumulation in the northeast Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012,33(6):1003.
- [16] JIN Zhijun, ZHU Dongya, MENG Qingqiang, *et al.* Hydrothermal activities and influences on migration of oil and gas in Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013,29(3):1048.
- [17] 徐长贵,杜晓峰,刘晓健,等. 渤海海域太古界深埋变质岩潜山优质储集层形成机制与油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1):235.
XU Changgui, DU Xiaofeng, LIU Xiaojian, *et al.* Formation mechanism of high-quality deep buried-hill reservoir of Archaean metamorphic rocks and its significance in petroleum exploration in Bohai Sea area [J]. *Oil&Gas Geology*, 2020, 41(1): 235.
- [18] 金小燕,杜晓峰,王清斌,等. 渤海海域火山热流体及其对碳酸盐岩优质储层的控制作用[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(6):800.
JIN Xiaoyan, DU Xiaofeng, WANG Qingbin. Volcanic hydrothermal fluid activity and its influence on carbonate reservoirs in Bohai Sea area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(6):800.
- [19] 李楠,王龙颖,刘丽芳,等. 渤中凹陷南部火成岩体精细雕刻及火山喷发模式研究[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(5): 59.
LI Nan, WANG Longying, LIU Lifang, *et al.* Fine engraving of eruptive bodies and study on volcanic eruption model in southern bozhong sag [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2017, 24(5): 59.
- [20] 张旗,金维浚,王金荣,等. 岩浆热场对油气成藏的影响[J]. *地球物理学进展*, 2016,31(4): 1525.
ZHANG Qi, JIN Weijun, WANG Jinrong, *et al.* Relationship between magma—thermal field and hydrocarbon accumulation [J]. *Progress in Geophysics*, 2016,31(4): 1525.
- [21] 王民,王岩,卢双舫,等. 岩浆侵入体热作用对烃源岩生烃影响的定量表征——以松辽盆地南部英台断陷为例[J]. *断块油气田*, 2014, 21(2): 171.
WANG Min, WANG Yan, LU Shuangfang, *et al.* Thermal influence of magma intrusion on hydrocarbon generation of source rock: Taking south Yingtai Fault Depression of Songliao Basin as an example [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2014, 21(2): 171.
- [22] 田立新,杨海风,王德英,等. 渤海海域古近系油气藏高含量CO₂的成因及成藏期研究:以秦南凹陷Q油气田为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013,44(2):673.
TIAN Lixin, YANG Haifeng, WANG Deying, *et al.* Study on genesis of high contents of CO₂ and hydrocarbon accumulation period in Paleogene, Bohai Sea: an example in Q oil—gas field of Qinnan Sag [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013,44(2):673.
- [23] 刘子林,王璞珺,徐建永,等. 渤海海域断裂组合样式与幔源CO₂分布的关系[J]. *世界地质*, 2017, 36(4): 1199.
LIU Zilin, WANG Pujun, XU Jianyong, *et al.* Relationship between fault combination styles and mantle source CO₂ distribution in Bohai area [J]. *Global Geology*, 2017, 36(4): 1199.
- [24] HYATT JA. Liquid and supercritical carbon dioxide as organic solvents [J]. *Journal of Organic Chemistry*, 1984, 49(26):5097.
- [25] 鲁雪松,宋岩,柳少波,等. 幔源CO₂释出机理脱气模式及成藏机制研究进展[J]. *地学前缘*, 2008,15(6):293.
LU Xuesong, SONG Yan, LIU Shaobo, *et al.* Progress in the studies of mantle-derived CO₂ degassing mechanism, degassing model and pool-forming mechanism [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6):293.
- [26] GERLACH T M. Present-day CO₂ emissions from volcanoes [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1991,72(23):249.
- [27] 李威,窦立荣,文志刚,等. 重排藿烷:示踪油藏充注途径的分子标志物[J]. *地球科学*, 2021, 46(7):2507.
LI Wei, DOU Lirong, WEN Zhigang, *et al.* Rearranged Hopane: molecular tracers for filling pathway in oil reservoirs [J]. *Earth Science*, 2021, 46(7):2507.