

https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.133



幔源 CO₂对中非裂谷系油气成藏的影响:以 Palogue 油田为例

李威^{1,2,3}, 窦立荣^{2,3*}, 文志刚³, 程顶胜²

1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

3. 长江大学资源与环境学院, 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北武汉 430100

摘要: Melut 盆地 Palogue 油田的发现打开了中非裂谷系古近系勘探新方向, 证实了 Melut 盆地北部凹陷为富油气凹陷。Palogue 油田以下白垩统为主力烃源岩, 古近系为主力油藏的成藏组合, 幔源 CO₂ 气体对油气的聚集和改造具有不可忽略的作用。通过对 CO₂ 气体、原油特征、包裹体特征进行研究, 结合构造和烃源岩演化, 分析 CO₂ 气体与 Palogue 油气成藏之间的关系。结果表明: 古近纪末—新近纪发生的幔源 CO₂ 运移热事件对 Palogue 油田油气充注成藏具有重要影响。在构造—热事件作用下, 烃源岩热演化迅速进入成熟阶段, 发生强烈的生排烃作用, 生成大量原油并融入超临界 CO₂ 中, 富含原油的超临界 CO₂ 快速穿层运移, 发育大量高温混合烃类包裹体, 即表现为异常高热事件下的快速成藏事件; 富含超临界 CO₂ 的原油进入 Palogue 圈闭后, 因地层温压条件的变化, CO₂ 气体开始向上逐层从原油中析出, 携带轻质组分融入上层油藏中发生混合作用, 由此导致垂向上原油物性发生一系列变化。

关键词: Melut 盆地; Palogue 油田; 成藏过程; 蒸发分馏作用; 石油地质学。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2024)10-3488-11

收稿日期: 2022-12-23

Effect of Mantle-Derived CO₂ on Hydrocarbon Accumulation in Central African Rift System: A Case Study of Palogue Oilfield

Li Wei^{1,2,3}, Dou Lirong^{2,3*}, Wen Zhigang³, Cheng Dingsheng²

1. CNOOC Research Institute Co.Ltd., Beijing 100028, China

2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

3. College of Resources and Environment, Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of the Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: The discovery of Palogue oilfield in Melut Basin has opened a new exploration direction of the Central African Rift Paleogene and confirmed that the northern sag of Melut Basin is rich in oil and gas resources. The Lower Cretaceous source rock is the major source rock of Melut basin, the Palaeogene is its main seal-reservoir assemblage. The formation mechanism and model of oil and gas accumulated were proposed based on the specific tectonic-stratigraphic assemblages and evolution history of the

基金项目: 国家油气重大专项项目(No.2011ZX05029); 中国石油天然气股份有限公司科技专项(Nos. 2013D-0902, 2015D-0909).

作者简介: 李威(1988—), 男, 高级工程师, 从事油气藏形成与分布方面的研究工作。ORCID:0000-0002-1173-2675. E-mail: liwei173@cnooc.com.cn

* **通讯作者:** 窦立荣, E-mail: doulirong@cnpcint.com

引用格式: 李威, 窦立荣, 文志刚, 程顶胜, 2024. 幔源 CO₂ 对中非裂谷系油气成藏的影响: 以 Palogue 油田为例. 地球科学, 49(10): 3488-3498.

Citation: Li Wei, Dou Lirong, Wen Zhigang, Cheng Dingsheng, 2024. Effect of Mantle-Derived CO₂ on Hydrocarbon Accumulation in Central African Rift System: A Case Study of Palogue Oilfield. *Earth Science*, 49(10): 3488-3498.

Melut Basin. Oil and gas accumulations were influenced of mantle CO₂. Relationship between CO₂ and hydrocarbon accumulation was investigated using a suite of hydrocarbon generation and expulsion history, tectonic evolution history, fluid inclusions, CO₂ and crude by taking Palogue oil reservoir as an example. The results show that the Late Paleogene-Neogene, the occurrence of the mantle source CO₂ migration tectonic thermal event have an important influence on oil and gas accumulation in Palogue oilfield. Under the action of tectonic-thermal events, the thermal evolution of source rocks rapidly enters the mature stage, and intense hydrocarbon generation and expulsion occurs, CO₂ in supercritical state quickly blends into crude oil. The crude oil saturated with supercritical CO₂ quickly migrated through the reservoir and developed a large number of high-temperature mixed hydrocarbon inclusions, which showed the rapid accumulation event under the abnormal high heat event. After the crude oil full of supercritical CO₂ entered the Palogue trap, CO₂ gas began to separate out from the crude oil layer by layer due to the change of formation temperature and pressure conditions, CO₂ gas carries light components into the upper reservoir for mixing. This results in a series of changes in vertical physical properties.

Key words: Melut basin; Palogue oilfield; accumulation process; evaporative fractionation; petroleum geology.

全球范围内发现较多的幔源 CO₂ 气藏, 其中国内外针对中—新生代裂谷盆地的勘探发现, 幔源无机 CO₂ 气藏与油气藏存在明显的关系(何家雄等, 2005; Jin *et al.*, 2005; 张成等, 2005; 高玉巧等, 2007; 王磊等, 2018; 王文博等, 2021; 赵文斌等, 2021; 李威等, 2023). 南苏丹 Melut 盆地是中国石油海外风险勘探矿区中最完整的裂谷盆地, 亿吨级 Palogue 油田的发现, 促使 Melut 盆地的勘探地位得到极大的提升(窦立荣, 2005; Dou *et al.*, 2007, 2008; 史卜庆等, 2014), 在勘探史上具有里程碑的意义. 但也可以看到在 Melut 盆地勘探开发中, 北部 Palogue 油田及其周边不断发现高含量 CO₂ 气藏. 因此, 深入研究 CO₂ 对油气运聚的作用, 分析 CO₂ 与油气成藏的相互关系, 对 Melut 盆地的油气勘探具有重要意义. 本文以北部凹陷 Palogue 油田为例, 通过对富含 CO₂ 油气藏形成、改造等机制的解剖, 重点论述 CO₂ 对油气成藏的作用和影响, 恢复动态成藏过程, 从而为海外探区油气资源评价和勘探部署提供依据.

1 地质概况

Melut 盆地是中—新生代陆内裂谷盆地, 可划分为北部凹陷、中部凹陷、东部凹陷、西部凹陷、南部凹陷和西部凸起; 北部凹陷位于盆地西北部是最大的凹陷, 面积约 5 500 km² (窦立荣, 2005; Dou *et al.*, 2007, 2008; 史卜庆等, 2014) (图 1). Melut 盆地在早白垩世、晚白垩世—古新世和始新世—渐新世为裂陷阶段, 在中新世—第四纪为拗陷阶段 (Genik, 1993; Dou *et al.*, 2007, 2008). 受中非剪切带影响 Melut 盆地从白垩纪开始接受沉积 (张光亚等, 2019), 早白垩世为强烈断陷期, 盆地沉积受断层控

制作用明显, 控边断层陡立地层产状以单斜为主, 沉积一套全盆地最重要的厚套 Al Renk 组湖相泥岩主力烃源岩, 北部凹陷主要发育西倾地层, 烃源岩分布在凹陷西部 (图 1); 晚白垩世—古新世裂陷作用较弱, 盆地沉降作用不明显, 形成了上白垩统一古近系的砂岩储层, 缺乏区域分布的湖相泥岩 (史忠生等, 2017); 始新世—渐新世, 中非剪切带虽然停止活动, 但紧邻盆地东南端的红海和东非裂谷开始剧烈活动, 受其影响, 该时期盆地发育具有主动裂谷性质的裂陷活动, 产生大量新的断层并使前期断层活化, 在构造作用下, 盆地沉降明显水体变深, 沉积了一套全盆地最重要的 Adar+Lau 组盖层, 盆地内火山活动较为强烈, Adar+Lau 组地层中可见火山岩分布 (窦立荣, 2005; Dou *et al.*, 2007, 2008), 同时北部凹陷地层在该期断层的作用下, 西倾地层东掉明显, 在北部凹陷东部形成断背斜圈闭; 新近纪—第四纪为统一拗陷阶段, 形成巨厚富砂沉积.

构造环境决定了沉积体系, 沉积环境决定了生储盖组合特征. Melut 盆地所经历的 3 次裂陷和 1 次拗陷的构造沉积环境, 决定了盆地纵向上以下白垩统泥岩为主要源岩段、上白垩统一古新统砂岩为储层段、始新统泥岩为盖层段的生储盖组合格局 (图 1). 结合目前的勘探开发现状, 揭示了 Melut 盆地具有下白垩统 Al Renk 组构成烃源岩, 古近系 Yabus+Samma 组构成油气储层的跨时代运聚成藏模式 (窦立荣, 2005; Dou *et al.*, 2007, 2008).

2 油气藏特征

2.1 储层流体特征

Palogue 油田油气主要赋存在古近系 Yabus+

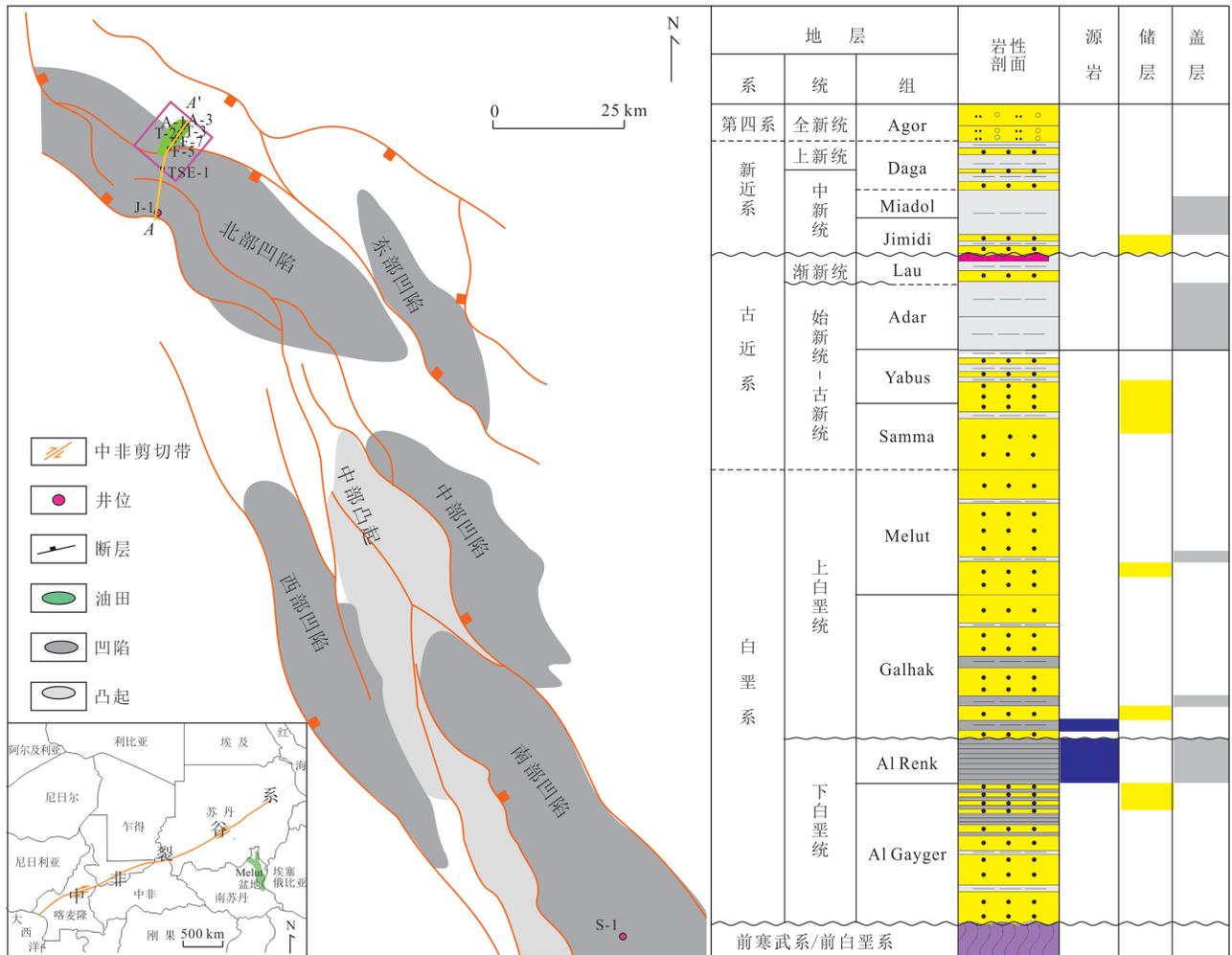


图1 Melut盆地构造单元划分及地层综合柱状图

Fig.1 Classification of structural units and strata column of Melut Basin

表 1 Palogue 油田原油物性

Table 1 Physical properties of crude oil in Palogue oilfield

井位	深度(m)	气油比(m ³ /m ³)	API度	倾点(°C)	含蜡量(%)	粘度(cp)	CO ₂ 含量(%)
TSE-1	1 956	9.69	29.62	35.50	17.26		32.38
F-5	1 362	11.60		33.00	20.00	909.30	48.25
F-7	1 373	13.03		39.00	27.60	532.60	56.48
T-2	1 232	16.37	25.20	42.00	31.20	203.90	63.40
T-3	1 209	14.52	22.70	41.11	31.31	389.00	63.04
A-1	1 206	14.69	23.00	37.50	30.00	89.16	62.00
A-3	1 220	20.27	22.50	39.00	36.42	110.00	57.25

Samma组地层中,具有连片底水油藏分布特征.油藏地层温度80~89 °C,该油藏大量的PVT资料表明,原油的溶解气含量普遍较低,GOR分布在9.69~20.27 m³/m³之间,油藏中含CO₂气体但不同井点含量不同,原油的饱和压力在2.1~4.8 MPa之间,远小于地层压力(11~14 MPa),表明油藏流体中气体不饱和,原油API分布在13.7°~33.5°之间,

含蜡量普遍大于15%,平均倾点为36 °C,表现为高蜡—高凝原油的特征.

Palogue油田南部靠近边界断层的J-1井Yabus组圈闭为纯CO₂气藏(图1),对J-1井Yabus组CO₂进行组分及同位素分析,CO₂含量高达90%以上,δ¹³C_{CO₂}‰分布在-3‰~-4‰;结合前人对该地区CO₂的成因判识(史卜庆等,2014),认为类似于我国

东部典型的幔源无机成因特征(Dai *et al.*, 1996; 田立新等, 2013; 马安来等, 2017), 说明北部凹陷 CO₂ 气体为无机幔源成因。

2.2 包裹体特征

20 世纪 80 年代以来, 流体包裹体逐渐应用于石油地质领域, 因其能较好地保存和记录流体温度、压力和流体环境等信息, 而成为油气源对比、油气运聚、成藏期次等研究的重要手段(Liu *et al.*, 2022; 于立栋等, 2022). 对于 Melut 盆地 Palogue 油田油气储层包裹体特征, 李威等(2022)通过对 F-2 井储层包裹体进行系统分析, 认为包裹体气液比分布在 6%~10% 之间, 主要分布在石英颗粒、石英加大边和石英愈合缝中, 发育浅褐色、蓝白色—无色两种荧光颜色; 包裹体拉曼光谱实验显示, 部分包裹体中无机 CO₂ 气体高达 85% 以上, 烃类成分占比 15%~49%, 测得的均一温度大于 200 °C, 远高于地层温度, 该类包裹体反映了无机 CO₂ 气体与原油在异常高热事件下同时快速成藏。

3 原油与 CO₂ 形成及运聚史分析

Melut 盆地古近纪末—新近纪初火山活动频繁, Wilson and Guiraud(1992)在苏丹 Darfur 隆起区测得的碱性玄武岩年龄为 23~14 Ma, 代表该期岩浆活动。Melut 盆地南部 Adar+Lau 组地层中可见玄武岩连片分布, 盆地北部岩浆活动主要集中在深入基底的边界断层附近。位于沉积盖层之下的岩浆房主要以宁静方式释放出大量 CO₂ 气体, 据 Gerlach 的估算, 全球陆相火山岩岩浆房以宁静方式放出 CO₂ 的

速率为 792 Mt/a, 而喷发放出 CO₂ 的速率为 66 Mt/a(Gerlach, 1991; 鲁雪松等, 2008)。北部凹陷属于断陷型凹陷, 为南段北超型, J-1 井位于南部边界断层附近, 沉降—沉积中心位于紧邻 J-1 井北部的 W-1 井区。从北部凹陷 CO₂ 含量平面分布来看(图 2), 西部边界断层附近 J-E 区为二氧化碳气藏, 说明该断层是基底断层, 连通了岩浆房, 从而使得幔源 CO₂ 气体首先充注进入 J-E 区有效圈闭中; 同时从分布来看, 北部凹陷沉降—沉积中心 W-1 井区位于岩浆房上部, 幔源 CO₂ 气体一方面顺着基底断层进入 J-E 区, 另一方面通过位于沉降中心部位的断层及砂体输导进入 W-1 井区附近, 并顺着砂体向上运移, 通过 Palogue 油田平面分区与 CO₂ 含量关系图来看(图 2), CO₂ 平面分布上具有沿 An-P-F-Te 区方向 CO₂ 含量逐渐增加的特征, 即平面上 CO₂ 气体沿着西南向北东方向运移, 剖面上即表现为 CO₂ 气体沿沉降—沉积中心 W-1 井区深部向凹陷边部浅层运移。

对于烃源岩热演化史, 往往结合地层埋藏热演化史来判断。在充分了解 Melut 盆地北部凹陷构造沉积背景的基础上, 采用镜质体反射率约束校正的方法对 Melut 盆地北部凹陷的地层埋藏史与热演化史进行了模拟。选取靠近北部凹陷中心区的 W-1 井进行地层热演化史恢复, 利用实测 Ro 数据作为约束条件。选取 EASYRo% 法, 结合地层数据等运用 PetroMod 软件进行模拟, 选取与 Ro 数据最吻合的模拟曲线为最终结果(图 3)。埋藏热演化史表明北部凹陷 Al Renk 烃源岩古近纪初 Ro 达到 0.6% 进入初始生烃期, 始新世末 Al Renk 烃源岩成熟度 Ro 达到 1.0%。在这一阶段中, 古新世 Yabus+Samma 组

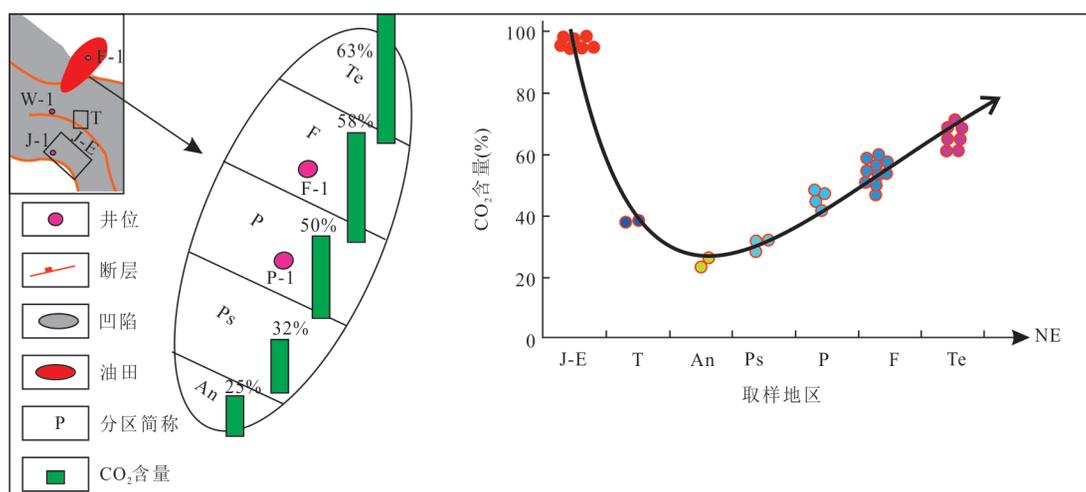


图 2 北部凹陷 CO₂ 平面分布特征

Fig.2 The distribution characteristics of CO₂ in northern sag

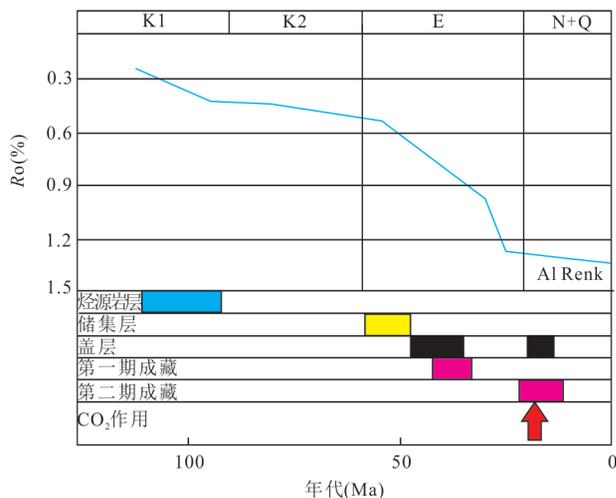


图3 W-1井埋藏热演化史及Palogue油田成藏事件图

Fig.3 Burial-thermal history in well W-1 and accumulation event of the Palogue oilfield

开始沉积形成厚层砂岩,始新世 Adar+Lau 组开始沉积形成泥岩为主的区域盖层,始新世末期形成有效的圈闭,开始聚集形成油气藏,即第1期中—低成熟原油油藏(图3),随后伴随构造抬升运动,油气充注结束。

古近纪末—新近纪初地层再次埋藏,受红海及东非裂谷活动影响,Melut 盆地发育火山活动等异常高热流体(23~14 Ma)(Wilson and Guiraud, 1992),研究区烃源岩成熟度 R_o 迅速达到并超过 1.0%,烃源岩开始二次生烃,受控于火山活动等异常高热流体烃源岩二次生烃在短时间内迅速演化,大量生排烃,形成爆发式生烃的特征,且受伴随火山活动的 CO_2 流体影响,油气迅速运移聚集,形成第2期充注成藏(图3)。因此从烃源岩热演化史、圈闭储层演化史来看,Melut 盆地北部凹陷烃源岩具有明显的二次生烃特征,第1次生烃属于中—低成熟阶段;第2次生烃为中—高成熟阶段,且第2次生烃具有爆发式生烃的特征,大量生成油质较轻的原油。

F-Te 区为 Yabus+Samma 圈闭背斜核部,沿着 An-P-F-Te 区方向,油藏油水界面逐渐变浅,油藏厚度逐渐变厚(Dou *et al.*, 2007, 2008),具有典型的由低向高、由翼部向核部运移的特征。李威等(2021)利用含氮化合物分析同样证明了油气的上述运移方向。例如,P1-井含氮化合物总浓度为 $8.4 \mu\text{g/g}$,高于 F-1 井的 $4.5 \mu\text{g/g}$,吡啶类、甲基吡啶类浓度及相关参数等均显示出原油运移方向由 P-1 井区向 F-1 井区。结合凹陷构造及油藏分布特征,认为油气运移方向在纵向上具有从生烃中心 W-1 井

区深部向背斜浅部储层运移的特征、平面上具有从凹陷中部向边部即西南向北东方向运移的特征。

4 非烃 CO_2 对油气成藏的影响

4.1 幔源 CO_2 对油气生成及运移的促进作用

幔源成因 CO_2 气体往往以异常高热流体事件的形式发生,研究区 CO_2 气体运移事件所对应的异常热事件对 Melut 盆地北部凹陷烃源岩生排烃具有明显的促进作用。通过甾烷系列($m/z=217$)谱图可以分辨原油母源类型,Palogue 油藏在规则甾烷系列 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 中表现为反“L”型,代表了高等植物为主的母源特征,同时在萜烷系列中($m/z=191$)25-降藿烷出峰明显,表明原油经受过较为严重的生物降解作用(Zhang *et al.*, 2012),但是在链烷烃系列中($m/z=57$)表现为基线水平的前峰型双峰态特征(图4)。基线水平分布、25-降藿烷/ C_{30} 藿烷参数值小于 10%、运用 25-降藿烷和三芳甾烷含量换算的充注比(杨杰等,2003)中降解原油占比小于 20%,均表明后期原油信息基本覆盖了前期降解油特征;而前峰型的双峰态分布明显不同于母源信息的特征,反映了成熟度信息的主导作用,对母源信息有一定的覆盖,甾烷异构化成熟度参数 $20S/(20S+20R)$ C_{29} 甾烷分布在 0.55~0.57 已进入平衡点范畴、轻烃参数折算(Mango, 1997)的成熟度达 1.0% 左右、前锋为主的分布特征等表明后期热事件下烃源岩爆发式生烃,生成大量的相对较高成熟度原油,聚集到油藏中占据绝对优势。

通过前文包裹体、烃源岩生排烃史认为 CO_2 气体与原油具有共生关系,表明 CO_2 气体与原油的同源性,主要为晚期形成。从 CO_2 气体与原油的运移方向来看,两者运移路径的方向具有完全一致性,而形成的包裹体中也是两者共生,因此认为 CO_2 气体对原油的运移具有明显的促进作用(曲希玉等,2011;李威等,2022),表现为岩浆房释放出的幔源 CO_2 以超临界状态(当温度高于 31.26°C ,压力大于 7.2 MPa)通过切穿沉降—沉积中心的断层向上快速运移,此时受热事件影响,烃源岩迅速生排烃,形成中—高成熟度原油,并全部融入超临界状态下的幔源 CO_2 ,从而降低了原油黏度及油水界面张力,促进油气快速进入 Palogue 圈闭中,形成轻质原油,表现在色谱—质谱图中 25-降藿烷出现而基线平整的前峰型分布特征。

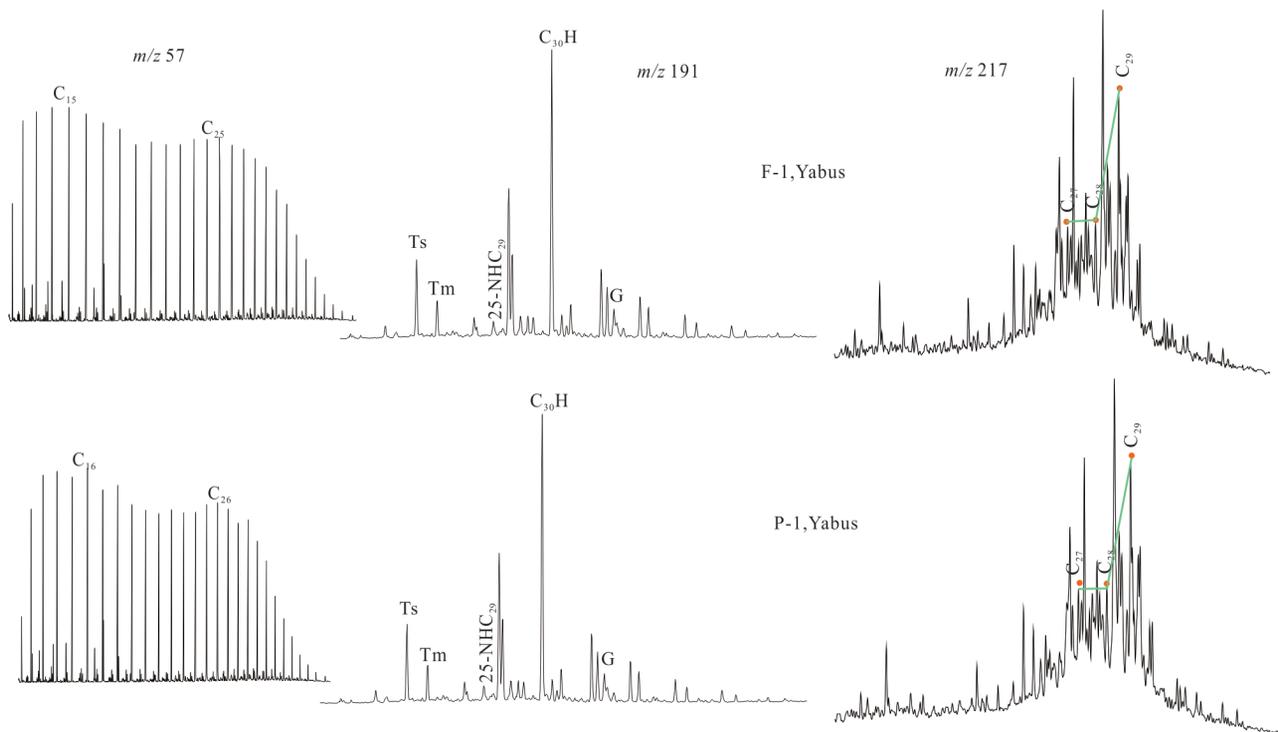


图 4 原油中正构烷烃、藿烷、甾烷分布

Fig.4 The distribution of alkanes and hopane and sterane in crude oil

Ts. 18 α -C₂₇三降藿烷; Tm. 17 α -C₂₇三降藿烷; 25-NHC₂₉. 25-降藿烷; C₃₀H. C₃₀藿烷; G. 伽马蜡烷; C₂₇、C₂₈、C₂₉、20R- $\alpha\alpha\alpha$ C₂₇、20R- $\alpha\alpha\alpha$ C₂₈、20R- $\alpha\alpha\alpha$ C₂₉

4.2 CO₂对早期油藏的次生蚀变作用

Palogue 油田原油物性及地化参数表现出油藏普遍遭受气洗分馏作用的特征(Thompson, 1979). 以纵向上密集取样的 F-1 井为例(图 5a):原油物性 API 度、全油色谱参数轻重比 C_{21+22}/C_{28+29} 与深度呈负相关性的变化趋势,可以发现随深度减小,原油轻质组分增多,与柴达木盆地英东地区、渤海湾盆地秦南凹陷表现相似(桂丽黎等, 2015; 李威等, 2023),说明研究区油气具有从深层到浅层向上运移的作用,原油运移至浅层发生脱气的现象. 伴随原油脱气现象往往易于发生分馏作用,当分馏作用不断增强时,轻质组分不断地分异并运移出去,残留的油会越来越富集重质组分,从而形成高含蜡原油; F-1 井纵向上原油含蜡量随深度变浅,含蜡量增大,从图 5b 所示的原油蜡含量与分馏指数 ($nC_{10}/(nC_{16}+nC_{25})$) 的关系则更加说明了蜡质含量与重质组分的关系,随着分馏作用的增强,被分馏的原油蜡质含量会逐渐增高(Zhang, 2000). 表现垂向上沿着天然气的侵入方向,晚期超临界 CO₂ 流体对早期油藏的气洗程度的加大,导致早期形成的原油重质组分残留,而轻质组分融入 CO₂ 流体中并向上运移,

即表现为原油中含蜡量增加,具有明显的“运移分馏”效应.

李威等(2022)研究认为 Palogue 油田原油高含蜡并不是由母源造成,因此含蜡量在纵向上依次增加更多的可能是后期次生作用. 从原油 GOR 及 CO₂ 含量垂向上变化来看,与深度具有明显的正相关性,处于同一油藏的 P-1 井原油中 CO₂ 含量随深度变浅也逐渐减小.

Palogue 油田 CO₂ 气体对油藏的蚀变作用另一个直观表现在正构烷烃分布关系上(图 6, 图 7). 一般未遭受次生改造的正常原油,其原始组成中正构烷烃的摩尔含量与其碳原子数呈指数分布关系,而发生气洗分馏等次生改造作用的原油,低分子量的正构烷烃往往偏移缺失(Kissin, 1987; Meulbroek *et al.*, 1998), Losh *et al.*(2002) 提出利用相对蒸发量(Q)参数量化气洗分馏强度. 图 6 反映 Palogue 油田原油色谱特征,可以看出原油中低分子化合物缺失明显,进一步从反映原油正构烷烃摩尔浓度与碳数分布关系图(图 7)可以发现,曲线中低碳数正构烷烃部分由于发生明显的损失而出现向下偏移的特征;其中 F-1 井计算的相对蒸发量(Q)为 70%~

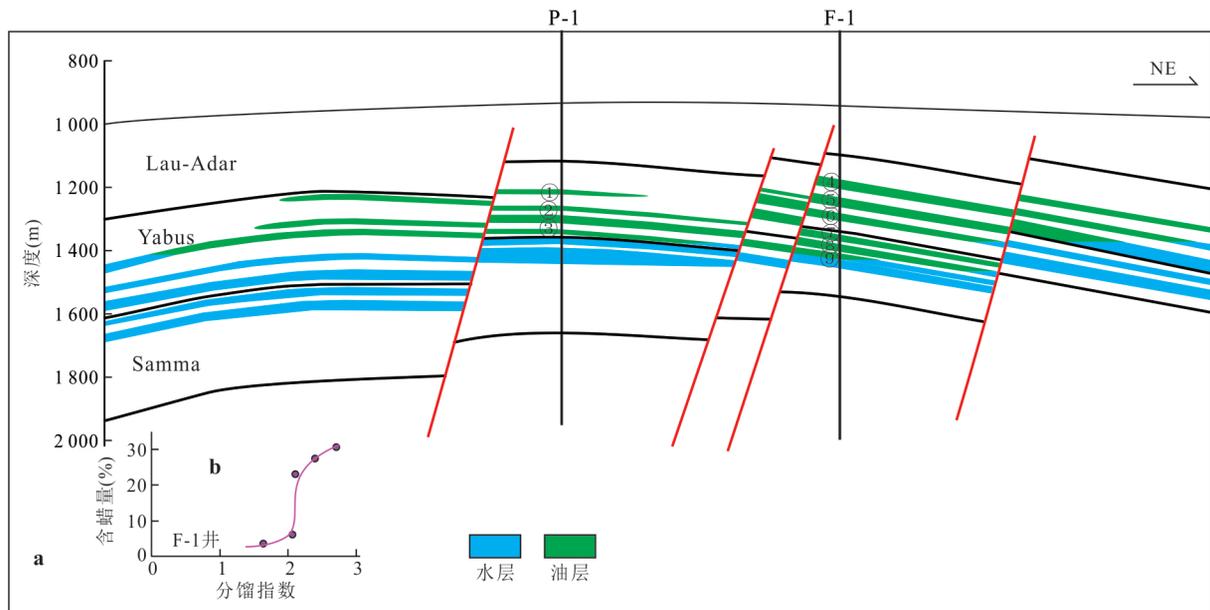


图 5 Palogue 油藏分布及物性特征

Fig. 5 Distribution and physical characteristics of Palogue oilfield

①A(43.6); w(15.0);G(91); CO₂:(37). ②A(24.0); W(17.8);G(85); CO₂(45). ③A(24.5); w(/);G(87); CO₂(51). ④A(23.3); W(26.6);C(2.3); G(47); CO₂(33.6). ⑤A(22.7); W(30.2);C(1.5);G(52); CO₂(39.6). ⑥A(21.8); W(25.8); C(/); G(56); CO₂(45.0). ⑦A(19.2); W(4.8);C(1.2);G(55); CO₂(54.1). ⑧A(18.2); W(3.1);C(/);G(64); CO₂(56.4); ⑨A(14.5); W(3.0);C(1.1); G(74); CO₂(63.8). A.API度;W.含蜡量(%);C.C₂₁+22/C₂₈+29; G.气油比(cf/bbl);CO₂含量(%)

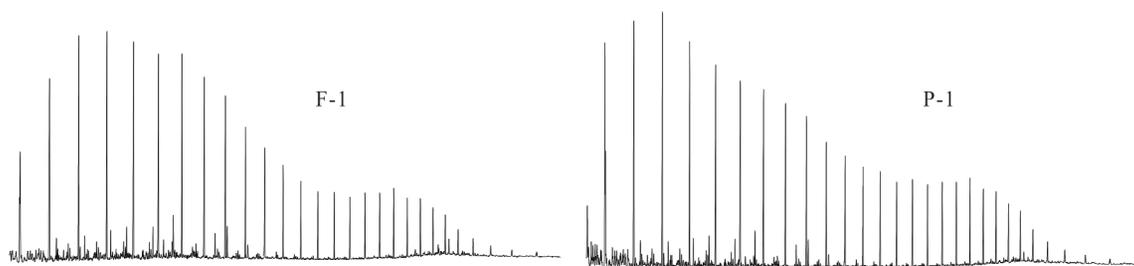


图 6 Palogue 油田原油色谱图

Fig.6 Typical oil chromatograms from the Palogue oilfield

85%(李威等,2022),对应到油藏纵向分布关系上表现为从下自上Q值增大,P-1井油藏纵向上具有相似的特征,印证了研究区早期形成的油气藏遭受了不同程度的气洗作用,且垂向上随着深度变浅气洗作用增强,脱气现象愈发明显.Dou *et al.* (2008)曾对F-1井油藏进行解剖例,发现原油中CO₂气体与CH₄等烃类气体呈现此消彼长的关系,结合F-1井各项地化参数及CO₂气体和API的变化特征(图5),推测CO₂气体由下至上运移脱气过程中,在逐层穿过紧邻的上层油藏时,CO₂气体一方面导致早期形成的油藏发生气洗分馏作用,同时CO₂气体所携带的轻质组分融入上层油藏中发生混合作用,由此导致垂向上物性发生一系列变化.

4.3 幔源 CO₂与油气成藏耦合过程

古近纪末—新近纪初,北部凹陷构造活动加强,断层呈开启状态;控凹断层持续活动并沟通地幔深部的CO₂气体从盆地底部沿断层向上运移,首先在靠近边界断层埋藏较深的J-E区圈闭中聚集成藏,同时沿晚白垩统一古近系渗透性砂岩地层横向运移(图8).该时期烃源岩强烈生排烃作用下,原油与超临界状态下的CO₂气体迅速溶合,并在CO₂气体作用下,降低储层中油水界面张力及原油黏度,大大加速了油气向上运移进程,提高了充注效率和聚集丰度,促进生烃和成藏.混合有CO₂的原油进入埋藏较浅的Palogue油田Yabus+Samma组背斜圈闭之后,开始聚集成藏,随后由于地层条件的变化,

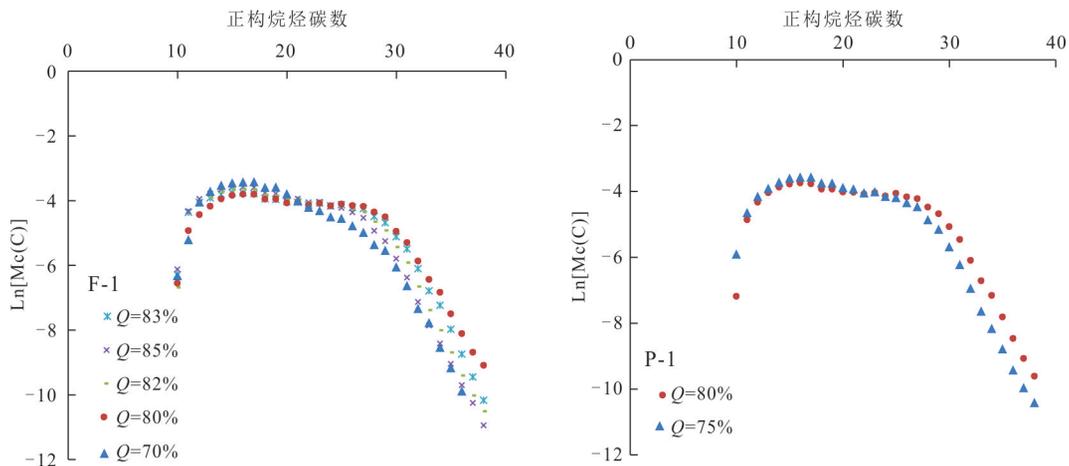


图 7 Palogue 油田原油正构烷烃摩尔浓度与碳数分布关系

Fig.7 Correlation between molar concentration and carbon number distribution of Palogue oilfield

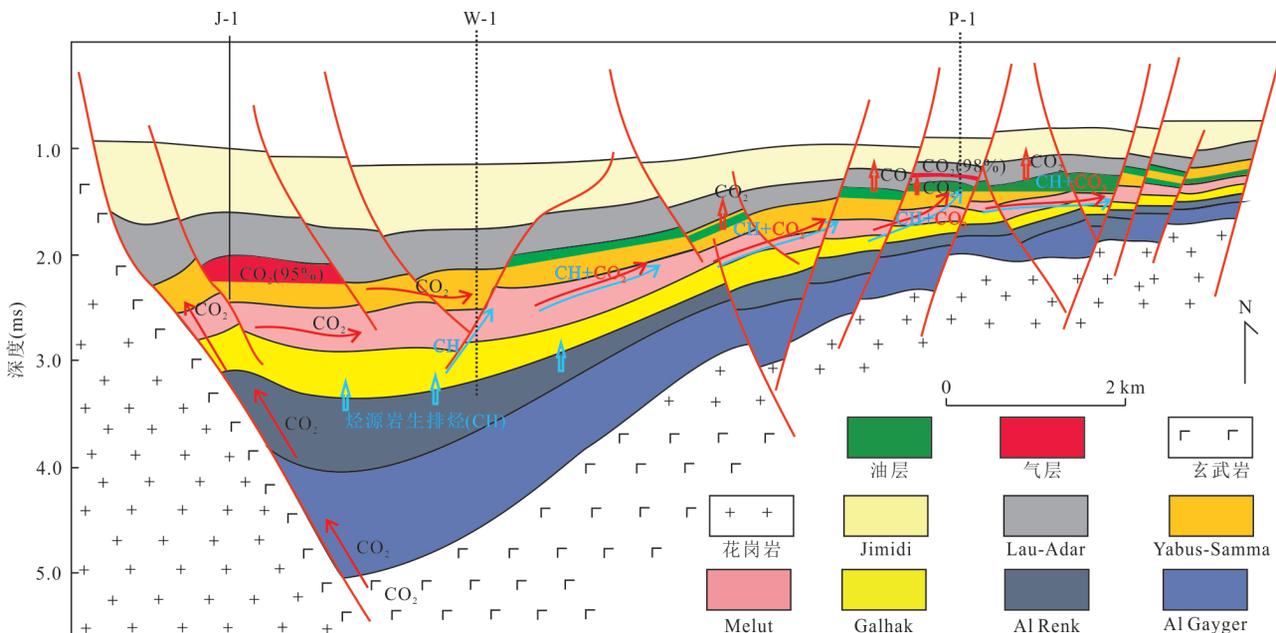


图 8 Melut 盆地 Palogue 油田油气充注演化模式

Fig.8 Oil and gas accumulation model for the Palogue oilfield in the Melut basin

CO₂气体开始向上逐层从原油中析出,同时带出原油中轻质组分发生气洗作用;但是由于 Adar 组埋藏浅,无法完全作为气藏的遮挡层,CO₂气体及轻质组分往往向上散失,只有局部地区存在于 Adar 组薄层透镜状砂岩中(图 8)。

因此幔源 CO₂气体在进入砂岩储层中后,往往迅速溶于同期生成的原油中,改善了原油二次运移条件,加速了运移过程;进入 Palogue 圈闭后由于地层条件的变化,CO₂气体开始析出并使原油发生气洗作用。

Melut 盆地在古近纪末—新近纪初油气运聚成藏的过程中,CO₂的充注驱油作用是普遍存在的,

但受具体的运聚输导条件、气源供给及充注动力大小等诸多成藏地质关键因素的控制。由于 CO₂大量存在,充注驱替的同时,往往容易发生气洗等化学改造作用,导致原来油气藏中油气的再分配和重新组合,形成了新的油气藏和油藏及气藏(王振峰等, 2004)。

Melut 盆地北部凹陷发育 CO₂,基底断层是首要运移通道,因此探寻 CO₂分布范围,结合基底断层的分布,分析 CO₂充注路径,进而有效规避 CO₂可能引起的对油藏的破坏及改造作用。从 Palogue 油田油气成藏过程来看,CO₂对晚期油气充注运移具有明显的促进作用,但是对于早期形成的油藏,晚期 CO₂

的进入引发气洗分馏作用,造成早期油藏原油物性变差.因此针对 Melut 盆地后续勘探,综合对比油气藏形成时间与 CO₂ 充注运移时间,对于早前形成的圈闭和油藏需要判断空间分布上是否发育 CO₂, CO₂ 的发育与否直接影响原油品质,进而关系都后续开发方案的选择.

5 结论

Palogue 油田具有两期充注成藏的特征.烃源岩在古新世开始生排烃,但是 Palogue 构造在始新世末期才形成有效的圈闭,并开始聚集形成第 1 期油气藏,该期油气藏中充注的原油主要是烃源岩在中—低成熟阶段生成的烃类,渐新世伴随构造运动,地层剥蚀,烃源岩停止生排烃,油气充注结束.古近纪末—新近纪初地层再次埋藏,受红海及东非裂谷活动影响, Melut 盆地发育火山活动等异常高热流体促进烃源岩二次生烃,并在短时间内迅速演化,排出大量中—高成熟烃类,形成爆发式生烃的特征,受伴随火山活动的 CO₂ 超临界流体影响,油气迅速运移聚集,短时间内形成第 2 期高强度的充注成藏事件.

超临界 CO₂ 流体携带中—高成熟原油进入 Palogue 圈闭后,因地层温压条件的变化,超临界 CO₂ 流体转变为 CO₂ 气体,含烃流体发生脱气作用,对第 1 期原油强烈气洗分馏作用,受控于圈闭盖层质量的影响,盖层无法完全封盖 CO₂ 气体,导致 CO₂ 气体向上溢散,在盖层中局部地区富集.

致谢:感谢各位审稿专家对论文的悉心指导和有益建议,一并致以诚挚谢忱.

References

- Da, J.X., Dai, Y., Song, C.S., 1996. Geochemistry and Accumulation of Carbon Dioxide Gases in China. *AAPG Bulletin*, 80(10): 1615—1626. <https://doi.org/10.1306/64eda0d2-1724-11d7-8645000102c1865d>
- Dou, L.R., 2005. Formation Mechanism and Model of Oil and Gas Accumulations in the Melut Basin, Sudan. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(1): 50—57(in Chinese with English abstract).
- Dou, L.R., Cheng, D.S., Li, M.W., et al., 2008. Unusual High Acidity Oils from the Great Palogue Field, Melut Basin, Sudan. *Organic Geochemistry*, 39(2): 210—231. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2007.09.001>
- Dou, L.R., Xiao, K.Y., Cheng, D.S., et al., 2007. Petroleum Geology of the Melut Basin and the Great Palogue Field, Sudan. *Marine and Petroleum Geology*, 24(3): 129—144. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.11.001>
- Gao, Y.Q., Liu, L., 2007. Time Recording of Inorganic CO₂ and Petroleum Infilling in Wuexun Depression, Hailaer Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(4): 574—582(in Chinese with English abstract).
- Genik, G.J., 1993. Petroleum Geology of Cretaceous—Tertiary Rift Basins in Niger, Chad, and Central African Republic. *AAPG Bulletin*, 77(8): 1405—1434. <https://doi.org/10.1306/bdff8eac-1718-11d7-8645000102c1865d>
- Gerlach, T.M., 1991. Present-Day CO₂ Emissions from Volcanos. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 72(23): 249—255. <https://doi.org/10.1029/90eo10192>
- Gui, L.L., Liu, K.Y., Liu, S.B., et al., 2015. Hydrocarbon Charge History of Yingdong Oilfield, Western Qaidam Basin. *Earth Science*, 40(5): 890—899(in Chinese with English abstract).
- He, J.X., Xia, B., Liu, B.M., et al., 2005. Origin, Migration and Accumulation of CO₂ in East China and Offshore Shelf Basins. *Petroleum Exploration and Development*, 32(4): 42—49(in Chinese with English abstract).
- Jin, Z.K., Bai, W.H., Zhang, X.X., 2005. Genetic Types and Distribution of CO₂ Gases in the Huanghua Depression. *Petroleum Science*, 2(2): 25—30.
- Kissin, Y.V., 1987. Catagenesis and Composition of Petroleum: Origin of N-Alkanes and Isoalkanes in Petroleum Crudes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(9): 2445—2457. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90296-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90296-1)
- Li, W., Dou, L.R., Wen, Z.G., et al., 2021. Rearranged Hopane: Molecular Tracers for Filling Pathway in Oil Reservoirs. *Earth Science*, 46(7): 2507—2514(in Chinese with English abstract).
- Li, W., Dou, L.R., Wen, Z.G., et al., 2022. Genetic Origin of CO₂-Rich Oil Reservoirs and Pool-Forming Period in Melut Basin, Southern Sudan. *Earth Science*, 47(4): 1459—1469(in Chinese with English abstract).
- Li, W., Xu, J.Y., Liu, Z.F., et al., 2023. Influence of Mantle-Derived CO₂ on Hydrocarbon Accumulation in Qinhuangdao 29 Tectonic Zone, Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 44(2): 418—428(in Chinese with English abstract).
- Liu, X.Y., Chen, H.H., Xiao, X.W., et al., 2022. Overpressure Evolution Recorded in Fluid Inclusions in the

- Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, North China. *Journal of Earth Science*, 33(4): 916–932. <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1375-x>
- Losh, S., Cathles, L., Meulbroek, P., 2002. Gas Washing of Oil along a Regional Transect, Offshore Louisiana. *Organic Geochemistry*, 33(6): 655–663. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(02)00025-6)
- Lu, X.S., Song, Y., Liu, S.B., et al., 2008. Progress in the Studies of Mantle-Derived CO₂ Degassing Mechanism, Degassing Model and Pool-Forming Mechanism. *Earth Science Frontiers*, 15(6): 293–302(in Chinese with English abstract).
- Ma, A.L., Sun, H.J., Zheng, L., et al., 2017. A Study on Forming Mechanisms of CO₂-Rich Reservoirs in Jupiter Oilfield, Santos Basin, Brazil. *Oil & Gas Geology*, 38(2): 371–378(in Chinese with English abstract).
- Mango, F. D., 1997. The Light Hydrocarbons in Petroleum: A Critical Review. *Organic Geochemistry*, 26(7–8): 417–440. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(97\)00031-4](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(97)00031-4)
- Meulbroek, P., Cathles, L. III, Whelan, J., 1998. Phase Fractionation at South Eugene Island Block 330. *Organic Geochemistry*, 29(1–3): 223–239. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(98\)00180-6](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(98)00180-6)
- Qu, X.Y., Liu, L., Yang, H.D., et al., 2011. Genesis of Oil-Associated CO₂ and Its Significance in Petroleum Geology. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 35(4): 41–46(in Chinese with English abstract).
- Shi, B.Q., Li, Z., Xue, L.Q., et al., 2014. Petroleum Accumulation Pattern and Exploration Targets in Hydrocarbon-Rich Sags of Melut Basin, Southern Sudan. *Xinjiang Petroleum Geology*, 35(4): 481–485 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z.S., Wang, T.Q., Xue, L., et al., 2017. Reservoir Characteristics and Enrichment Rule of Highly Sandy Formation in Melut Basin, Central Africa. *Natural Gas Geoscience*, 28(2): 262–271(in Chinese with English abstract).
- Thompson, K. F. M., 1979. Light Hydrocarbons in Subsurface Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43(5): 657–672. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90251-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90251-5)
- Tian, L.X., Yang, H.F., Wang, D.Y., et al., 2013. 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. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(2): 673–678(in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Tian, W., Wei, Z.H., et al., 2018. Volcanic Conduits of the Tarim Flood Basalt Province: 3D Structure and Thermogenic Gas Release. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 75–90(in Chinese with English abstract).
- Wang, W.B., Su, S.G., Wang, N., et al., 2021. The Possible Coupling Relationship among Large-Scale Magmatic Activity, Iron Deposit Formation and Global Climate Change in the Early Cretaceous. *Acta Petrologica Sinica*, 37(7): 2234–2244(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.F., He, J.X., Zhang, S.L., et al., 2004. Genesis of Carbon Dioxide and Geological Significance for Carbon Dioxide Infilling and Oil Displacement in the Northern Marginal Basin of South China Sea. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 48–53(in Chinese with English abstract).
- Wilson, M., Guiraud, R., 1992. Magmatism and Rifting in Western and Central Africa, from Late Jurassic to Recent Times. *Tectonophysics*, 213(1–2): 203–225. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90259-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90259-9)
- Yang, J., Huang, H.P., Zhang, S.C., et al., 2003. Semi-Quantitative Evaluation of Mixed Oil in Northern Uplift of the Tarim Basin. *Geochimica*, 32(2): 105–111(in Chinese with English abstract).
- Yu, L.D., Li, S.H., Zhang, J., et al., 2022. Experimental Study on the Effective Measurement of the Total Homogenization Temperature of High Internal Pressure CO₂-Rich Fluid Inclusions in Orogenic Gold Deposits: A Case Study of the Yufeng Gold Deposit, Eastern Tianshan Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 38(1): 267–280(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Wei, K.S., 2005. Sequence Characteristics and Reservoir Formation Condition in the Southern Wuerxun Depression. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 47–52(in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.Y., Huang, T.F., Liu, J.G., et al., 2019. Multi-Cycle Evolution of the Intracontinental Passive Rift Basins and Its Controlling on Accumulation of Oil & Gas: Taking Muglad Basin in Africa as an Example. *Acta Petrologica Sinica*, 35(4): 1194–1212(in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., 2000. The Migration Fractionation: An Important Mechanism in the Formation of Condensate and Waxy Oil. *Chinese Science Bulletin*, 45(14): 1341–1344. <https://doi.org/10.1007/BF03182916>
- Zhang, S. C., Zhang, B., Yang, H. J., et al., 2012. Adjustment and Alteration of Hydrocarbon Reservoirs during the Late Himalayan Period, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 712–

724. [https://doi.org/10.1016/s1876-3804\(12\)60096-2](https://doi.org/10.1016/s1876-3804(12)60096-2)
Zhao, W.B., Guo, Z.F., Liu, J.Q., et al., 2021. Fluxes and Genesis of Carbon Dioxide Emissions from Cenozoic Volcanic Fields in NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 37(4): 1255–1269(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

窦立荣, 2005. 苏丹迈努特盆地油气成藏机理和成藏模式. 矿物岩石地球化学通报, 24(1): 50–57.
高玉巧, 刘立, 2007. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷无机 CO₂ 与油气充注的时间记录. 沉积学报, 25(4): 574–582.
桂丽黎, 刘可禹, 柳少波, 等, 2015. 柴达木盆地西部英东地区油气成藏过程. 地球科学, 40(5): 890–899.
何家雄, 夏斌, 刘宝明, 等, 2005. 中国东部及近海陆架盆地 CO₂ 成因及运聚规律与控制因素研究. 石油勘探与开发, 32(4): 42–49.
李威, 窦立荣, 文志刚, 等, 2021. 重排藿烷: 示踪油藏充注途径的分子标志物. 地球科学, 46(7): 2507–2514.
李威, 窦立荣, 文志刚, 等, 2022. Melut 盆地富含 CO₂ 油气藏的成因及期次. 地球科学, 47(4): 1459–1469.
李威, 徐建永, 刘志峰, 等, 2023. 幔源 CO₂ 对渤海海域秦皇岛 29 构造带油气成藏的影响. 石油与天然气地质, 44(2): 418–428.
鲁雪松, 宋岩, 柳少波, 等, 2008. 幔源 CO₂ 释出机理、脱气模式及成藏机制研究进展. 地学前缘, 15(6): 293–302.
马安来, 孙红军, 郑磊, 等, 2017. 桑托斯盆地 Jupiter 油气田富含 CO₂ 油气藏形成机制. 石油与天然气地质, 38(2): 371–378.
曲希玉, 刘立, 杨会东, 等, 2011. 油伴生 CO₂ 气的成因及其石油地质意义. 中国石油大学学报(自然科学版), 35(4): 41–46.

史卜庆, 李志, 薛良清, 等, 2014. 南苏丹迈卢特盆地富油气凹陷成藏模式与勘探方向. 新疆石油地质, 35(4): 481–485.
史忠生, 王天奇, 薛罗, 等, 2017. 中非 Melut 盆地高砂地比地层成藏特征与富集规律. 天然气地球科学, 28(2): 262–271.
田立新, 杨海风, 王德英, 等, 2013. 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. 中南大学学报(自然科学版), 44(2): 673–678.
王磊, 田伟, 魏子寒, 等, 2018. 塔里木溢流玄武岩火山通道的三维结构及其热成因气体释放. 岩石学报, 34(1): 75–90.
王文博, 苏尚国, 王娜, 等, 2021. 全球早白垩世大规模岩浆活动、铁矿床形成及与气候变化的可能耦合关系. 岩石学报, 37(7): 2234–2244.
王振峰, 何家雄, 张树林, 等, 2004. 南海北部边缘盆地 CO₂ 成因及充注驱油的石油地质意义. 石油学报, 25(5): 48–53.
杨杰, 黄海平, 张水昌, 等, 2003. 塔里木盆地北部隆起原油混合作用半定量评价. 地球化学, 32(2): 105–111.
于立栋, 李胜虎, 张静, 等, 2022. 造山型金矿中富 CO₂ 高内压流体包裹体完全均一温度的有效测定实验研究: 以东天山玉峰金矿床为例. 岩石学报, 38(1): 267–280.
张成, 魏魁生, 2005. 乌尔逊凹陷南部层序地层特征及成藏条件. 石油学报, 26(2): 47–52.
张光亚, 黄彤飞, 刘计国, 等, 2019. 非洲 Muglad 多旋回陆内被动裂谷盆地演化及其控油气作用. 岩石学报, 35(4): 1194–1212.
赵文斌, 郭正府, 刘嘉麒, 等, 2021. 中国东北新生代火山区 CO₂ 释放规模与成因. 岩石学报, 37(4): 1255–1269.