



引文格式: 张翔, 官斌, 崔军平, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组流体包裹体特征及天然气成藏期次[J]. 西北地质, xxxx, x(x): 1-14. DOI: 10.12401/j.nwg.2025053

Citation: ZHANG Xiang, GUAN Bin, CUI Junping, et al. Characteristics of fluid inclusions and natural gas accumulation stages in Majiagou Formation of Ordovician in middle-eastern Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, xxxx, x(x): 1-14.
DOI: 10.12401/j.nwg.2025053

鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组流体包裹体特征 及天然气成藏期次

张翔¹, 官斌¹, 崔军平^{2,*}, 李超¹, 陶华², 张建¹, 赵凡凡², 王志伟¹, 万晓飞¹

(1. 延长石油(集团)有限责任公司, 延长气田采气三厂, 陕西 延安 717199; 2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室,
陕西 西安 710069)

摘要: 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组海相碳酸盐岩层系天然气勘探潜力大, 但成藏机理复杂, 研究该层系的成藏期次与模式对区域油气勘探意义重大。本文选取盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩样品开展包裹体岩相学及均一温度分析, 并用 PetroMod 软件恢复奥陶系热演化史。结果显示, 马家沟组碳酸盐岩层系发育两期烃类流体包裹体: 第 1 期主赋存于方解石及白云石溶蚀孔, 均一温度 110~130 °C, 对应天然气充注时期为 210~165 Ma(三叠世末到中侏罗世末); 第 2 期主赋存于白云石脉体或晚期方解石, 均一温度 160~170 °C, 对应天然气充注时期为 123~97 Ma(早白垩世末期)。盆地中东部奥陶系经历了三个热演化阶段: 晚二叠世前的缓慢升温阶段、晚二叠世末至早白垩世末的快速升温阶段、早白垩世后降温阶段。两期天然气充注都在快速升温阶段, 平均升温速率 0.86 °C/Ma。奥陶系碳酸盐岩储层上部与上古生界煤系烃源岩直接接触, 下部又有盐下海相烃源岩的自生自储式输入, 天然气沿孔缝运移, 在白云岩岩性圈闭聚集成藏。晚白垩世以来, 盆地抬升冷却, 平均冷却速率 0.63 °C/Ma, 烃源岩生烃作用停止。

关键词: 鄂尔多斯盆地中东部; 奥陶系; 均一温度; 成藏期次

中图分类号: TE122; P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(xxxx)xx-xxxx-14

Characteristics of fluid inclusions and natural gas accumulation stages in Majiagou Formation of Ordovician in middle-eastern Ordos Basin

ZHANG Xiang¹, GUAN Bin¹, CUI Junping^{2,*}, LI Chao¹, TAO Hua², ZHANG Jian¹, ZHAO Fanfan²,
WANG Zhiwei¹, WAN Xiaofei¹

(1. Yanchang Gas Field Gas Production Plant No. 3, Yanchang Petroleum(Group) Co., Ltd., Yan'an 717199, Shaanxi, China; 2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

收稿日期: 2024-05-28; 修回日期: 2025-04-07; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 延长石油(集团)有限责任公司科技计划项目“吴仓堡地区下古生界马家沟组马五 5 储层天然气富集规律研究”(ycsy2023ky-C-21)资助。

作者简介: 张翔(1983-), 男, 高级工程师, 主要从事石油天然气勘探开发研究。E-mail: 29825063@qq.com。

* 通讯作者: 崔军平(1978-), 男, 西北大学副教授, 博士生导师, 主要从事盆地热演化史与油气成藏相关教学与科研工作。

E-mail: cuijp@nwu.edu.cn。

Abstract: The marine carbonate rock series of the Ordovician Majiagou Formation in the central and eastern part of the Ordos Basin has great natural gas exploration potential. However, the hydrocarbon accumulation mechanism is complex. Studying the hydrocarbon accumulation stages and patterns of this formation series is of great significance for regional oil and gas exploration geological evaluation. In this paper, petrography of inclusions and homogenization temperature analysis were carried out on the carbonate rock samples of the Ordovician Majiagou Formation in the basin, and the PetroMod software was used to restore the thermal evolution history of the Ordovician. The results show that two phases of hydrocarbon fluid inclusions have developed in the carbonate rock series of the Majiagou Formation. The first phase is mainly hosted in the dissolution pores of calcite and dolomite, with a homogenization temperature of 110~130 °C, and the corresponding natural gas charging period is 210~165 Ma (from the end of the Triassic to the end of the Middle Jurassic). The second phase is mainly hosted in the dolomite veins or late-stage calcite, with a homogenization temperature of 160~170 °C, and the corresponding natural gas charging period is 123~97 Ma (the end of the Early Cretaceous). The Ordovician in the central and eastern part of the basin has experienced three thermal evolution stages: a slow heating stage before the Late Permian, a rapid heating stage from the end of the Late Permian to the end of the Early Cretaceous, and a cooling stage after the Early Cretaceous. The charging of natural gas in both phases occurred during the rapid heating stage, with an average heating rate of 0.86 °C/Ma. The Ordovician carbonate rock reservoir is in direct contact with the coal-measure source rocks of the Upper Paleozoic in the upper part, and has a self-generation and self-reservoir input from the sub-salt marine source rocks in the lower part. The natural gas migrates along the pores and fractures and accumulates in the lithologic traps of dolomite. Since the Late Cretaceous, the basin has been uplifted and cooled, with an average cooling rate of 0.63 °C/Ma, and the hydrocarbon generation of the source rocks has ceased.

Keywords: The central-eastern Ordos Basin; Ordovician; homogenization temperature; accumulation stages

鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩层系是一套重要的产气目的层段(黄正良等, 2014; 徐旺林等, 2019; 付金华等, 2019), 盆地中东部米探1井在奥陶系马家沟组钻获高产工业气流, 实现了奥陶系天然气勘探的重大突破(魏柳斌等, 2021; 孟强等, 2023), 指示奥陶系马家沟组天然气勘探潜力巨大(杨华等, 2011)。油气在成藏过程中会受到构造热演化的影响(任战利等, 2008), 下古生界奥陶系碳酸盐岩层系经历了多期构造运动、成藏条件复杂, 明确其成藏期次、充注时间及成藏模式是进一步指导天然气勘探的关键(赵兴齐等, 2023)。目前研究含油气盆地成藏期次有各种手段(李儒峰等, 2010), 流体包裹体作为分析含油气盆地成藏期次的重要工具之一, 其中蕴含着丰富的地质信息, 被广泛应用于成藏年代学的研究。

流体包裹体是矿物结晶生长过程中, 因晶体发生缺陷而捕获一部分流体, 至今仍保存于矿物中, 没有内外介质的交换, 它们是油气运移充注过程的遗迹化石记录, 记录了当时地层的古环境情况等(陶士振, 2006; Chen et al., 2013; 邵晓州, 2020)。包裹体均一温

度是研究地层古地温和油气充注期次的关键(陈刚等, 2012, 2013; 罗枭等, 2015; 李伟等, 2020)。流体包裹体均一温度是通过人工加热, 使室温下呈两相或多相的包裹体变成均匀单一相流体时的瞬时温度(Song et al., 2015; 昌婷, 2019; 张钰等, 2023)。前人应用流体包裹体法对鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩系储层成藏期次进行研究获得了一些成果, 其中赵卫卫等人对鄂尔多斯盆地北部苏里格地区下古生界奥陶系成藏期次进行了研究, 确定该区存在两期天然气充注, 分别为晚三叠早侏罗世及晚侏罗世早期(赵卫卫等, 2011)。钟金银等人对鄂尔多斯盆地南部奥陶系成藏期次进行了研究, 提出存在两期充注, 时期分别为早侏罗世末期及早白垩世末期(钟金银等, 2012)。陈志雄等人对鄂尔多斯盆地西缘下古生界奥陶系成藏期次进行研究, 通过包裹体分析、盆地模拟提出奥陶系主要存在两期油气充注, 分别为早侏罗世晚期和早白垩世早中期(陈志雄等, 2023)。前人的研究说明鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩层系主要存在两期天然气充注, 但北部、南部及西部的成藏时间均不尽相同, 说明盆地

内不同区域的成藏时期存在差异, 同时盆地奥陶系热演化史与油气充注期次之间耦合关系不明确, 烃源来源存在争议(杨华等, 2011, 2014; 郭彦如, 2014), 故开展鄂尔多斯盆地中东部奥陶系成藏期次及成藏模式的研究十分必要, 对指导下古生界的天然气勘探具有重要意义。

笔者选取鄂尔多斯盆地中东部地区奥陶系 12 口井中的 14 块马家沟组岩石样品, 进行包裹体镜下观察并通过实验测量包裹体均一温度。对包裹体的大小、产状、宿主矿物类型等进行详细记录, 选取与烃类包裹体同期次的盐水包裹体进行测温, 得出包裹体均一温度的分布特征。而后利用 petromod 软件对盆地中东部奥陶系马家沟组单井埋藏史-热演化史、有机质成熟度演化史进行恢复, 综合分析鄂尔多斯盆地中东部奥陶系天然气形成期次及成藏模式。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部, 是一个构造变形边强内弱、多旋回演化、多沉积类型的大型沉积盆地, 也是中国第二大含油气盆地(刘池洋等, 2006;

Zhao et al., 2015)。鄂尔多斯盆地地跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区, 北起阴山、大青山南抵秦岭西至贺兰山、六盘山, 分布面积广, 约 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$, 为我国重要的能源盆地之一, 石油、天然气及煤炭等矿产资源极为丰富(杨俊杰, 1988)。整个盆地内部断裂不发育, 沉积地层相对平缓, 倾角一般小于 1° (姚泾利等, 2009)。根据构造特征可划分为西缘冲断构造带、天环坳陷、陕北斜坡、渭北隆起、晋西挠褶带、伊盟隆起 6 个一级构造地质单元(任战利, 1996; Darby et al., 2002) (图 1a)。

盆地内不同地区奥陶系发育特征不同, 地层划分方案有所差异, 对应的岩石地层名称也不尽统一。由于早古生代怀远运动和加里东运动的影响, 奥陶系经历了剥蚀, 奥陶系顶部与上古生界本溪组之间存在不整合面, 致使不同地区地层厚度具有差异性。目前, 根据鄂尔多斯盆地沉积环境及构造演化背景方面的差异, 一般将盆地奥陶系分为南部、西部及中东部三个区域。其中, 南部奥陶系上统、中统、下统均发育; 西部奥陶系上统被剥蚀, 中统和下统均发育; 中东部奥陶系上统和中统被剥蚀, 下统主要发育马家沟组, 从上至下可划分为马一-马六共六段, 其中马五段又细

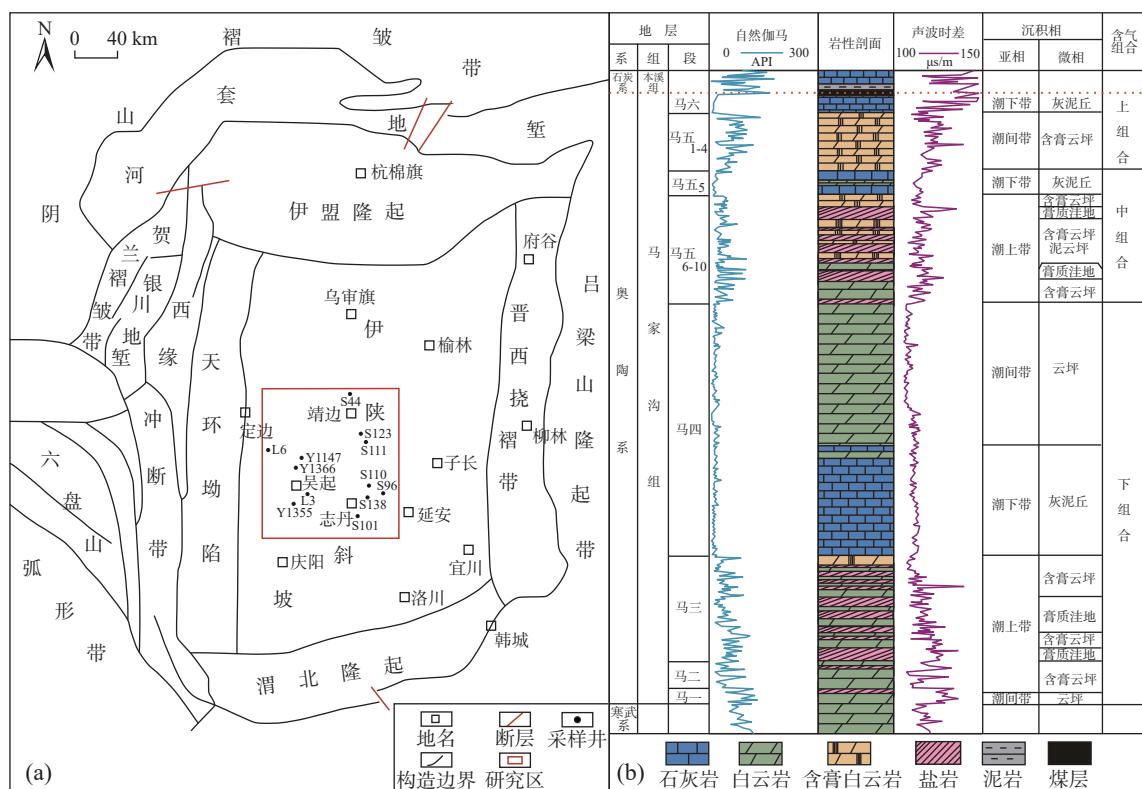


图1 研究区位置图及马家沟组地层柱状图

Fig. 1 Location map of the study area and stratigraphic columnar chart of the Majiagou Formation

分为马五₁₀至马五₁亚段(任军峰等, 2021; 党文龙等, 2022)。

盆地石炭系本溪组发育煤层及暗色泥岩, 有机质类型主要为腐殖型(Ⅲ型)干酪根, 泥页岩有机碳含量平均 2.49%, 煤层有机碳含量平均 72.53, *Ro* 平均值为 1.78%(牛小兵等, 2023), 在盆地内分布稳定, 盆地中部及陕北斜坡东部的烃源岩生烃强度最高(张雯等, 2023), 奥陶系马家沟组碳酸盐岩-膏盐岩交替发育(王禹诺等, 2015; 苏中堂等, 2017; 吴东旭等, 2023)(图 1b), 马一段主要以发育灰黄色白云岩为主, 马二段岩性主要为石灰岩与白云岩, 部分地区发育少量的膏岩, 马三段主要发育一套白云岩、膏岩和盐岩组合地层, 马四段沉积了一套白云岩与石灰岩地层, 其中广泛发育有斑状白云岩, 马五段主要为白云岩、灰岩与硬石膏互层, 马六段地层以灰岩沉积为主。马家沟组烃源岩主要为马一及马三段, 为泥质碳酸盐岩, 盆地中东部烃源岩厚度可达 10 m, 有机质类型为腐泥型(I型)干酪根, 有机碳含量最高可达 3.5%, *Ro* 介于 1.8%~3% (郭彦如等, 2016)。

2 储层特征

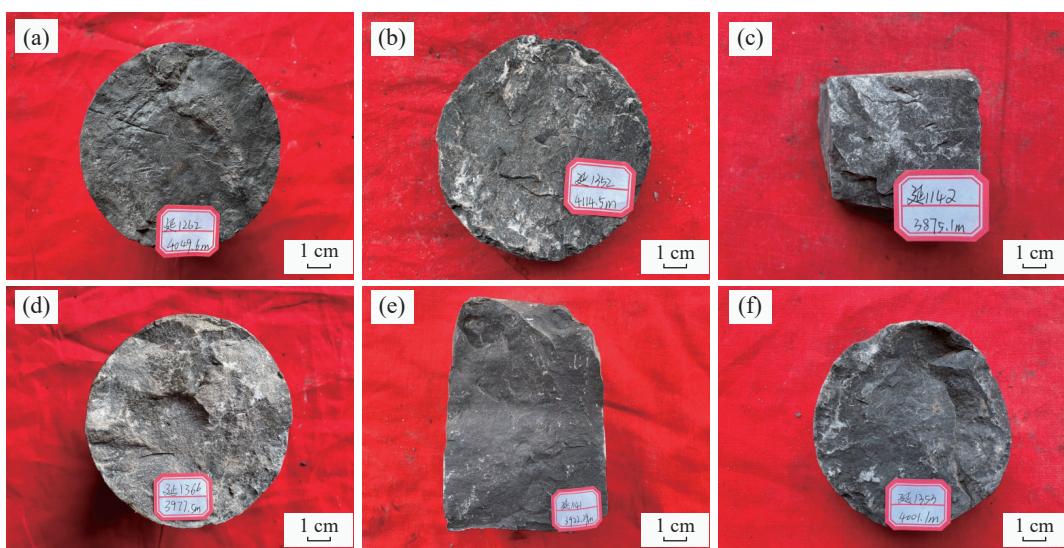
鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组发育碳酸盐岩-膏盐岩层系, 岩石类型主要为白云岩、部分灰岩, 云质灰岩(图 2)。岩石主要由白云石、方解石、泥质、

硅质、黄铁矿等矿物组成, 其中白云石含量最高, 平均为 71.58%, 其次为方解石, 平均含量为 24.42%, 泥质平均含量为 3.08%, 硅质、黄铁矿等其他矿物含量极少普遍低于 1%(图 3)。白云石以细粉晶为主, 见少量泥晶、粗粉晶, 呈半自形菱形粒状胶结颗粒分布(图 4a); 偶见方解石呈它形胶结颗粒; 见膏岩假晶, 呈板状分布, 被方解石全交代(图 4b)。颗粒见砾屑、砂屑, 呈细粉晶或泥晶结构(图 4c), 磨圆为次圆状, 分选好, 岩石结构致密、均一。储层孔隙类型主要为晶间孔(图 4d)、溶蚀孔隙(图 4e~图 4g)和裂缝(图 4h~图 4i), 溶孔多被方解石、泥质等充填, 储层中孔隙及裂缝的发育为马家沟组天然气的充注提供了基础, 是有效的储集体。马家沟组储层的孔隙度呈近似对数正态分布, 主要介于 1%~8%, 峰值位于 2%, 平均 3.5%(图 5a), 渗透率同样具对数分布特征, 主要介于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 峰值位于 $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 5b)。

3 包裹体特征

3.1 岩相学特征

鄂尔多斯盆地中东部奥陶系烃类流体包裹体广泛发育, 利用徕卡 4500P 多功能显微镜对包裹体特征进行观察可知, 包裹体产出类型和特征比较复杂, 在方解石、白云石中均发育不同大小和形态的流体



a. 黑色细粉晶云岩, Y1262, 4 049.6 m; b. 灰黑色泥晶云岩, Y1352, 4 114.5 m; c. 灰黑色不等晶云岩, Y1142, 3 875.1 m;
d. 浅灰色粗粉晶云岩, Y1366, 3 997 m; e. 灰黑色泥晶云质灰岩, Y1141, 3 922.29 m; f. 细粉晶泥质灰岩, Y1353, 4 001.1 m

图2 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组岩心照片

Fig. 2 Core Photos of the Ordovician Majiagou Formation in the Central and Eastern Parts of the Ordos Basin

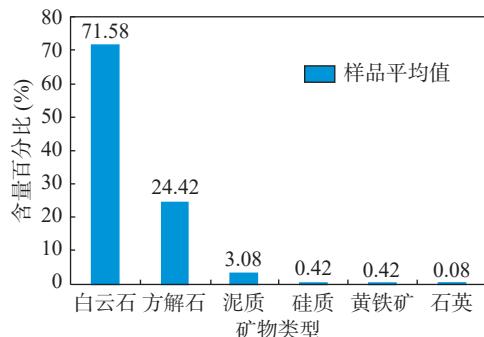
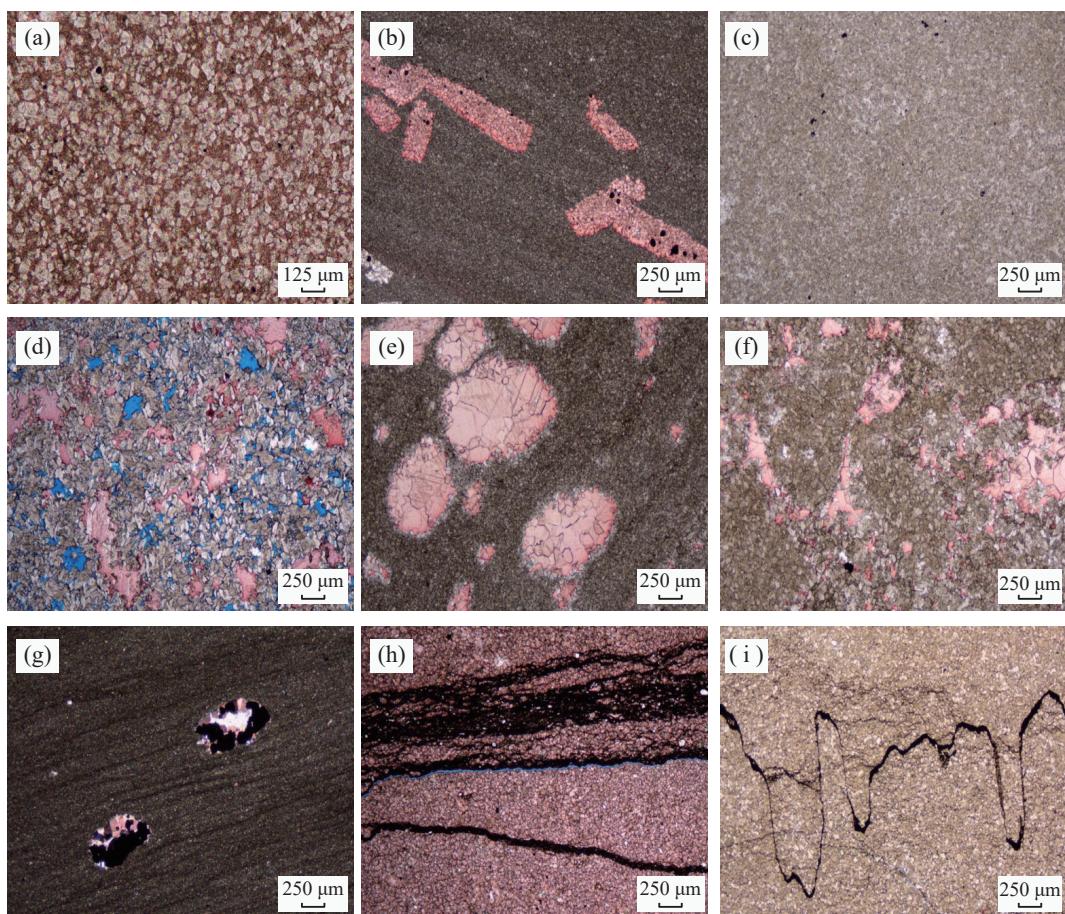


图3 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组矿物含量分布
Fig. 3 Distribution of mineral contents in the Ordovician Majiagou Formation in the Central and Eastern parts of the Ordos Basin

包裹体,形态呈规则形、不规则形、浑圆或三角形,长度一般 $<10\text{ }\mu\text{m}$,宽度一般 $<5\text{ }\mu\text{m}$ 。早期烃类流体

包裹体主要发育在溶蚀孔中,以充填亮晶方解石、缝洞白云石的形式存在,少数发育在早期裂隙的重结晶方解石中(刘二虎等,2022;吴小力等,2022)。晚期烃类流体包裹体多发育在白云石脉体或充填膏模孔的晚期方解石之中,少数发育在晚期裂隙的亮晶方解石中。

奥陶系马家沟组碳酸盐岩储层粒间孔隙油气侵染,粒间孔隙荧光,部分粒间孔隙弱黄绿色、弱黄褐色荧光(图6a~图6c)。其中发育油气包裹体、气包裹体及盐水包裹体,油气包裹体呈灰黑色,弱黄绿色荧光或弱红褐色荧光(图6d~图6i),平均占比58%;气包裹体呈黑色或灰黑色,无荧光(图6j~图6l),平均占比41.7%;与油气伴生的盐水包裹体呈无色,无荧光,油气包裹体丰度低 $\text{GOI} \leq 1\%$ 。



a. 自形菱形粒状白云石, Y1141, 3 922.29 m, 单偏光; b. 板状膏岩假晶发育, 被方解石全交代, Y1207, 3 931.72 m, 单偏光; c. 细粉晶结构, Y1232, 4 007 m, 单偏光; d. 储层发育大量晶间孔, Y1366, 3 977.5 m, 单偏光; e. 圆形溶孔被亮晶方解石全充填, Y1207, 3 932.8 m, 单偏光; f. 晶间溶孔被亮晶方解石全充填, 单偏光; g. 溶孔被方解石、黄铁矿、泥质全充填, Y1362, 4 023.3 m, 单偏光; h. 构造裂缝发育, 部分被有机质浸染, Y1353, 4 001.1 m, 单偏光; i. 压溶缝合线发育, Y1142, 3 865.5 m, 单偏光

图4 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组储层镜下照片

Fig. 4 Microscopic photos of the reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation in the Central and Eastern parts of the Ordos Basin

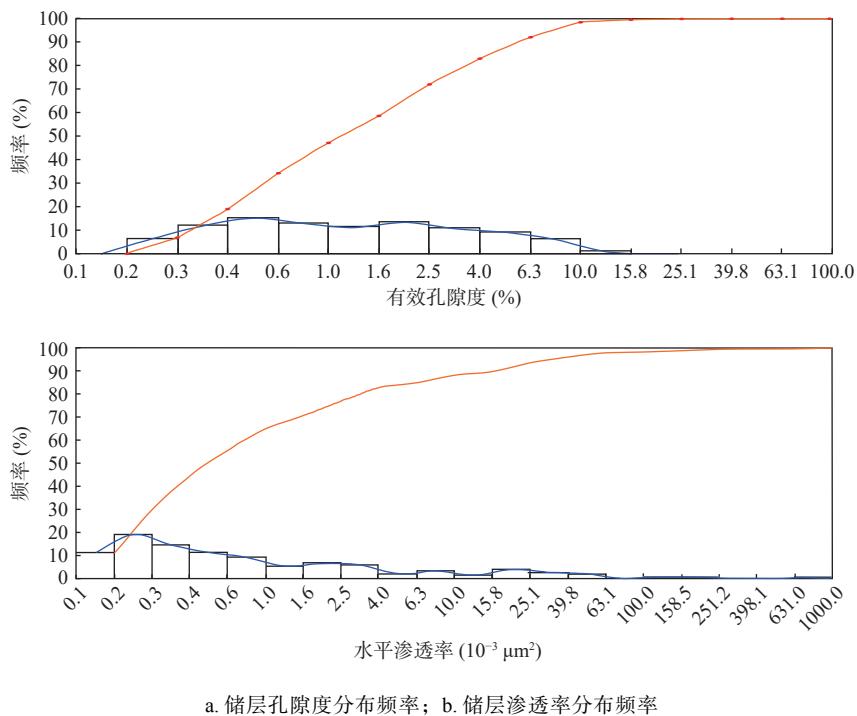


图5 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组物性特征

Fig. 5 Physical properties characteristics of the Ordovician Majiagou Formation in the Central and Eastern parts of the Ordos Basin

3.2 均一温度特征

对鄂尔多斯盆地中东部地区 12 口井 14 块样品的 158 个测点进行了流体包裹体测温研究, 均一温度的测定采用 Likam THMSG600 型显微冷热台进行。测试方法如下: 将包裹体薄片放入热台, 调节显微镜使之聚焦找到同一期次形成的、宿主矿物相同的一群体积较大、形状和边界清晰明显的包裹体, 进行显微测温分析。测量均一温度时, 控制升温速度在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ – $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 时刻注意观察流体包裹体中相态的细微变化, 温度每上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 暂停观察一次。在包裹体接近均一时, 升温速度降低为小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 观察流体包裹体的气相或液相消失时的温度, 即为均一温度, 考虑到在流体包裹体内壁可能有细微的气泡附着, 在达到均一相时应继续加热 $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 为避免此过程中发生爆裂, 温度要缓慢上升, 以确定真正达到均一相后降温到室温。

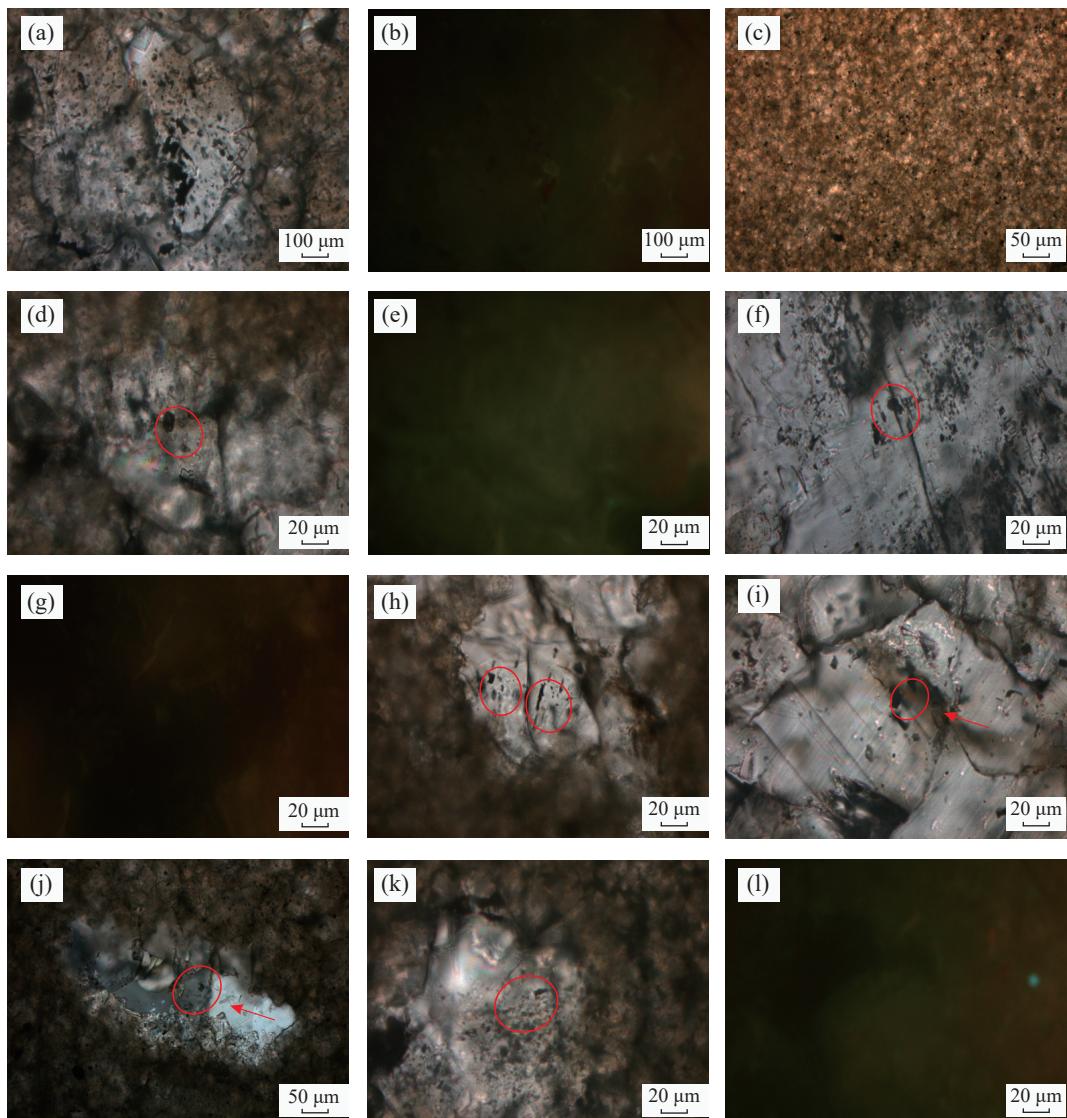
油气包裹体内含有大量有机质, 在加热加压的情况下组分不够稳定, 测定结果会受到影响而产生误差, 而与烃类伴生的盐水包裹体的组分更加稳定, 测定其均一温度能够更好地反映捕获温度, 以此来代表油气充注时的地层温度(Chi et al., 2003; 时保宏等, 2012; 唐胜利等, 2021; 陶华等, 2022)。具体测试数据如表 1 所示。应用统计学原理对包裹体均一温度结果整理

并制作分布直方图, 研究区奥陶系碳酸盐岩包裹体均一温度从 $76\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $182\text{ }^{\circ}\text{C}$ 连续分布, 在 $110\text{--}130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $160\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两个区间内出现峰值, 说明研究区奥陶系主要有两期天然气充注(图 7)。

4 天然气成藏特征

4.1 成藏期次

鄂尔多斯盆地构造热演化对油气生成、运移、聚集与成藏有重要控制作用, 是分析油气资源潜力和勘探前景的关键问题(崔军平等, 2011; 周勇水等, 2021)。应用 Petromod 软件结合 EasyRo% 法对鄂尔多斯盆地中东部奥陶系及上古生界有机质成熟度演化史进行恢复, 首先在 Petromod 软件中输入相关模拟数据, 包括地层、年代、剥蚀厚度、地温梯度及古水深等, 再设定初始热流值(任战利等, 2007; 宗奕等, 2010; 田刚, 2017; 邹德, 2020), 在软件内计算古地温与 Ro ; 然后比较计算的 Ro 与实测 Ro , 当二者拟合度差时, 则调整热流模型, 重新开始模拟; 当计算的 Ro 趋势与实测 Ro 数据拟合程度最好时, 则可输出该井的热演化史、成熟史等相关模拟图件。单井热史模拟结果表明研究区晚二叠世前, 地层缓慢沉降, 温度较低, 相应有机质成熟度低。二叠世至至早白垩世末, 地层温度快速升



a. 粒间孔隙油气侵染, Y1355, 4 093.68 m; b. 部分粒间孔隙弱的的黄绿色荧光, 与 a 同一视域; c. 部分粒间孔隙弱黄绿色、黄褐色荧光, Y1362, 4 023.3 m; d. 缝洞白云石中发育油气包裹体, Y1147, 4 057.85 m; e. 与 d 同一视域, 油气包裹体发弱黄绿色荧光; f. 白云石脉中发育灰黑色油气包裹体, Y1355, 4 093.68 m; g. 与 f 同一视域, 油气包裹体发弱红褐色荧光; h. 方解石脉中发育灰黑色油气包裹体, Y1366, 3 976 m; i. 缝洞方解石中灰黑色油气包裹体, 盐水包裹体, Y1366, 3 976 m; j. 缝洞方解石中灰黑色气包裹体和盐水包裹体, Y1366, 3 976 m; k. 缝洞白云石中灰黑色气包裹体, Y1147, 4 057.85 m; l. 与 k 同一视域下, 气包裹体和盐水包裹体无荧光

图6 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组流体包裹体显微照片

Fig. 6 Microscopic photos of fluid inclusions in the Ordovician Majiagou Formation in the Central and Eastern parts of the Ordos Basin

高, 深部地层如奥陶系及上古生界地层中有机质成熟, 液态烃生成, 在晚白垩世达到高-过成熟阶段, 以生天然气为主(图 8a)。

上古生界烃源岩在中三叠世进入生烃门限, Ro 达到 0.5%, 中三叠世-早白垩世末(260~100 Ma)属于快速升温阶段, 烃源岩进一步成熟, 地层埋深达到最大, Ro 达到 2%。晚白垩世(100 Ma), 盆地遭受大规模抬

升剥蚀, 地温快速降低, Ro 不再升高(图 8b)。奥陶系烃源岩在中三叠世进入生烃门限, Ro 达到 0.5%, 中三叠世—早白垩世末(290~100 Ma)属于快速升温阶段, 烃源岩进一步成熟, 地层埋深达到最大, Ro 达到 2%。晚白垩世(100 Ma), 盆地遭受大规模抬升剥蚀, 地温快速降低, Ro 不再升高(图 8c)。

流体包裹体均一温度法是解决油气成藏期次问

表1 包裹体均一温度测试结果

Tab. 1 Test results of the homogenization temperature of inclusions

井号	深度(m)	层位	宿主矿物	形态	包体产状	气液比(%)	均一相态	成因	均一温度(℃)	测点数
Y1147	4 057.85	O _{lm}	白云石	规则	脉体、孔洞充填	≤5	液相	原生	128~150	4
Y1355	4 093.68	O _{lm}	白云石	规则	脉体、孔洞充填	≤5	液相	原生	125~155	6
Y1366	3 976	O _{lm}	方解石	规则	脉体、孔洞充填	≤5	液相	原生	122~182	14
L3	4 183.7	O _{lm}	方解石	不规则	脉体充填	3~8	液相	原生	90~155	13
S101	4 065	O _{lm}	方解石	不规则、三角形	孔洞充填	3~8	液相	原生	85~140	11
S96	3 298	O _{lm}	方解石	不规则	孔洞充填	3~8	液相	原生	112~168	15
S110	3 575.5	O _{lm}	方解石	不规则	孔洞充填	3~8	液相	原生	105~138	12
S110	3 579.8	O _{lm}	方解石	不规则	孔洞充填	3~8	液相	原生	102~163	10
S111	3 522.9	O _{lm}	方解石	浑圆、三角形	孔洞充填	3~8	液相	原生	78~116	9
S123	3 850.5	O _{lm}	方解石	不规则	孔洞充填	3~8	液相	原生	96~170	14
S138	3 787.4	O _{lm}	方解石	不规则	孔洞充填	3~8	液相	原生	78~146	12
L6	4 351	O _{lm}	方解石	不规则、三角形	孔洞充填	3~8	液相	原生	98~148	13
L6	4 508.9	O _{lm}	方解石	不规则、三角形	孔洞充填	3~8	液相	原生	106~116	10
S44	4 089	O _{lm}	方解石	浑圆、三角形	孔洞充填	3~8	液相	原生	103~178	15

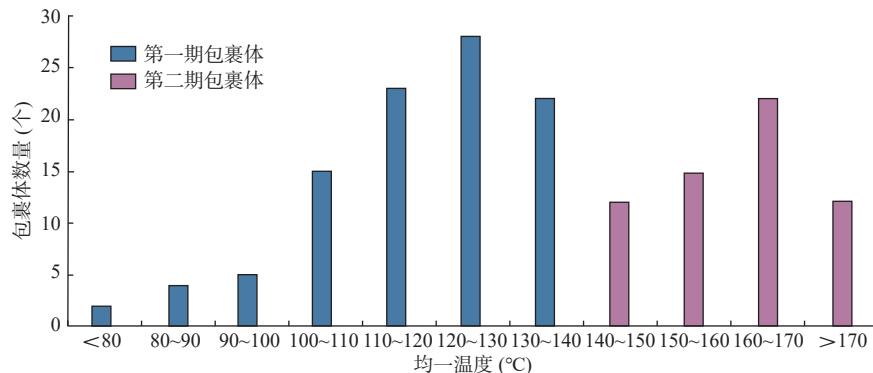


图7 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系储层包裹体的均一温度分布

Fig. 7 Distribution of the homogenization temperature of inclusions in the Ordovician reservoirs in the Central and Eastern Parts of the Ordos Basin

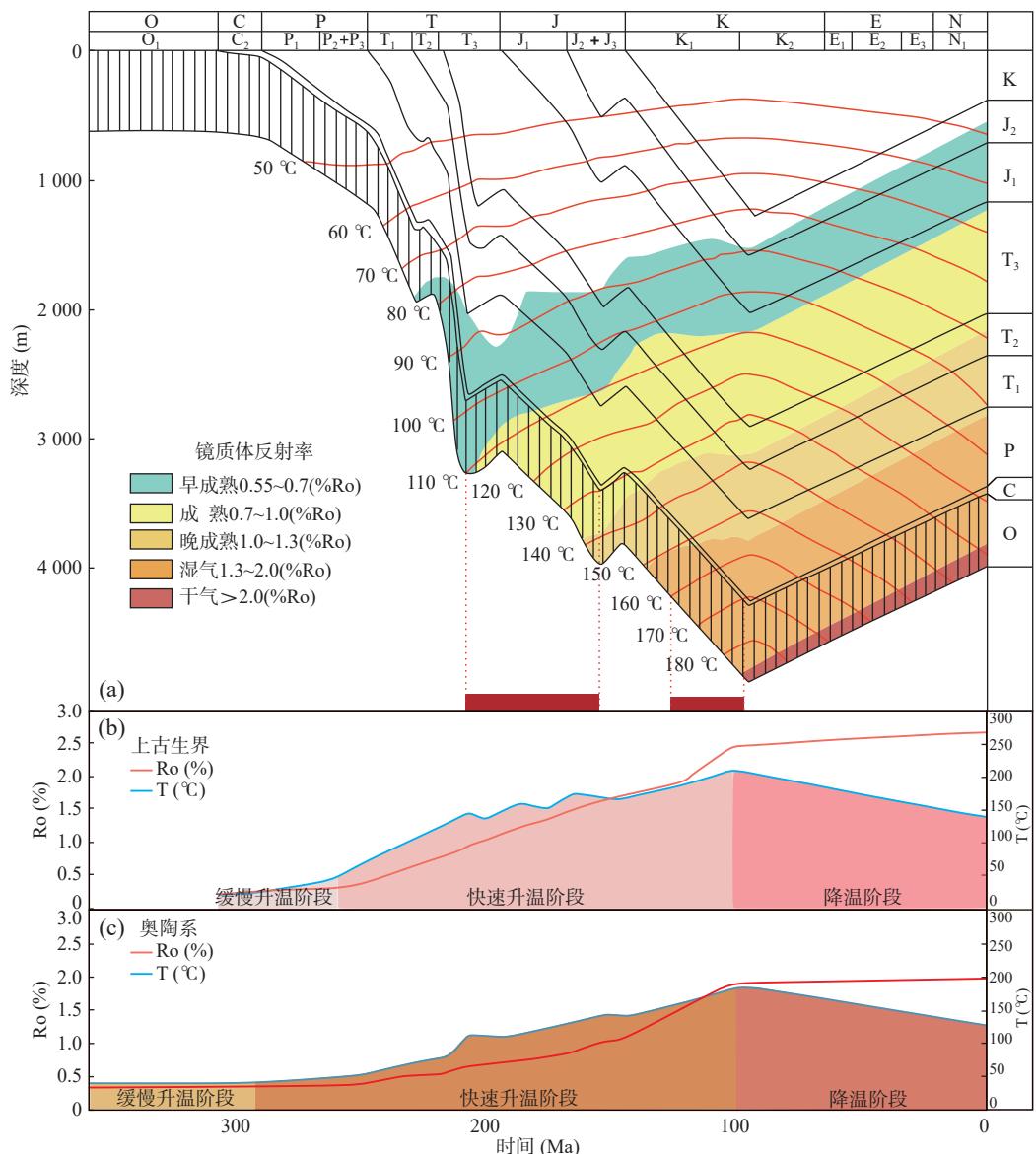
题的一种可靠有效的方法,将实验测得的流体包裹体均一温度峰值在埋藏-热演化史图上进行投点,确定达到相应温度的地质历史时间,进而判断油气充注时期(Hu et al., 2010; Guo et al., 2015; 赵桂萍, 2017)。通过对比得到:马家沟组第一期包裹体形成时间较早,包裹体均一温度峰值为110~130 °C,充注时间距今210~165 Ma,为晚三叠世末到中侏罗世末;第二期包裹体均一温度峰值为160~170 °C,充注时间距今123~97 Ma,为早白垩世末期(图8a)。两次大规模天然气充注时期恰好对应于中三叠世-早白垩世末的地

层快速升温阶段,并与前人的研究具有较好的一致性(胡国艺, 2003; 李贤庆等, 2004)。

综上天然气充注期次与烃源岩成熟史演化阶段具有良好的对应性,两期天然气充注均处于地层快速升温、有机质成熟度快速增长的阶段,该阶段生烃强度大,地层温压条件好,为天然气的大规模充注奠定了基础。

4.2 成藏模式

鄂尔多斯盆地中东部地区奥陶系主要发育以马家沟组为代表的碳酸盐岩层系,顶部与底部地层分别



a. 奥陶系埋藏史及热史恢复; b. 上古生界烃源岩温度与有机质成熟度演化; c. 奥陶系烃源岩温度与有机质成熟度演化

图8 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系构造热演化史与天然气充注期次

Fig. 8 Tectonic thermal evolution history and natural gas charging stages of the Ordovician in the Central and Eastern parts of the Ordos Basin

与石炭系本溪组和奥陶系冶里组呈不整合接触。马家沟组在纵向上构成良好的生储盖配置, 马一及马三段沉积期海水收缩, 以云坪、含膏云坪、膏、盐湖沉积为主(张涛等, 2023), 发育以泥质白云岩、生物白云岩为主的烃源岩层系, 赋存于白云岩与膏盐岩层组合(周进高, 2023); 马四段沉积期区域海平面上升, 主要发育了一套白云岩和石灰岩地层(于洲等, 2023), 储集性能好; 马五段沉积期海平面下降, 岩性主要为白云岩、灰岩与硬石膏互层, 构成了盐下马四段气藏的区域性盖层。

晚奥陶世, 奥陶系整体遭受抬升经历了长期的风化剥蚀, 马四段大面积暴露(姚泾利等, 2015; 谢康等, 2020; 魏柳斌等, 2021)。晚石炭世盆地再次沉降, 使上古生界煤系烃源岩与马四段直接接触, 形成源-储对接的供烃窗口, 加里东风化壳区域地层剥蚀使得供烃窗口大范围稳定分布, 存在于整个生烃过程(杨华等, 2014)。随着煤系烃源岩的逐步成熟, 天然气也逐渐生成, 并在早白垩世达到生排烃高峰期, 产生巨大的生烃增压作用(包洪平, 2020), 大量天然气在压力作用下, 通过中央古隆起剥蚀区侧向运移进入盐下储层,

中央古隆起剥蚀区是盐下侧向供烃的高效窗口。

天然气组分及碳同位素资料进行气源对比分析表明,奥陶系马家沟组天然气为以上古生界煤系烃源岩生成的煤型气为主,下古生界碳酸盐岩烃源岩生成的油型气为辅的混源天然气(李军等,2016)。盆地中东部位于奥陶系尖灭线附近(党文龙等,2022),上古

生界生成的天然气通过剥蚀区窗口向下伏马家沟组直接输入并向东发生侧向运聚,马家沟组海相烃源岩生成的天然气通过断裂缝隙发生向上运移在马五段及马四段上倾方向白云岩岩性圈闭中聚集成藏。盆地中东部奥陶系位于陕北斜坡构造单元具有东高西低的构造背景,更有利于天然气的运移聚集(图9)。

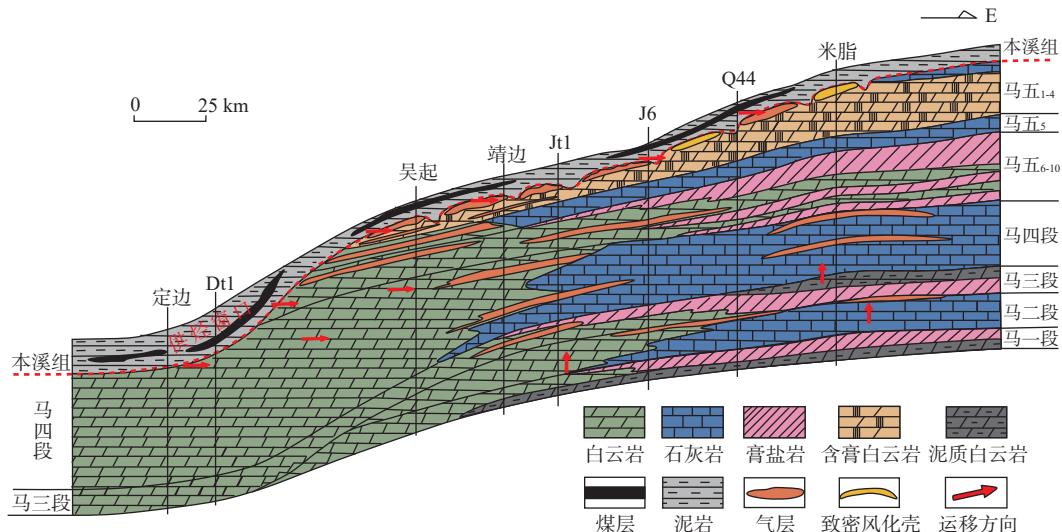


图9 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系天然气成藏模式图

Fig. 9 Diagram of the natural gas accumulation model of the Ordovician in the Central and Eastern parts of the Ordos Basin

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系为碳酸盐岩-膏盐岩层系, 储层发育油气包裹体、气包裹体及伴生盐水包裹体, 主要分布于碳酸盐岩储层缝洞白云石、白云石脉、缝洞方解石及方解石脉中。包裹体均一温度介于 76~182 °C, 呈两段峰值。第一期峰值 110~130 °C, 对应天然气充注时期为 210~165 Ma(晚三叠世末到中侏罗世末); 第二期峰值 160~170 °C, 对应天然气充注时期为 123~97 Ma(早白垩世末期)。

(2) 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系主要经历三个热演化阶段: 1. 晚二叠世前缓慢升温阶段, 有机质未成熟; 2. 晚二叠世末至早白垩世末快速升温阶段, 有机质成熟-过成熟, 平均升温速率 $0.86\text{ }^{\circ}\text{C/Ma}$, 两期天然气充注均处于此阶段; 3. 早白垩世末快速降温, 盆地抬升剥蚀, 地温骤降, 平均降温速率 $0.63\text{ }^{\circ}\text{C/Ma}$, 生烃停止。天然气成藏烃源来自上覆石炭系煤系烃源岩和下部海相烃源岩自生自储式运移, 天然气经储层孔隙及断缝运移, 最终在地层上倾方向岩性相变带附近的白云

岩岩性圈闭中聚集成藏。

参考文献(References):

- 包洪平, 黄正良, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下侧向供烃成藏特征及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 134–145.

BAO Hongping, HUANG Zhengliang, WU Chunying, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration potential of Ordovician pre-salt formations by lateral hydrocarbon supply in the central-eastern Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 134–145.

昌婷, 许浩, 周海燕, 等. 松辽盆地泰康隆起带青二、三段储层流体包裹体特征与成藏期次[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(2): 8–15.

CHANG Ting, XU Hao, ZHOU Haiyan, et al. Characteristics of the fluid inclusion and classification of the hydrocarbon accumulation period in Member Qing 2-3 of Taikang Uplift Belt in Songliao Basin[J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2019, 38(2): 8–15.

陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 多期次油气成藏流体包裹体间接定年——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): 1003–1011.

- 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): 1003–1011.
- 陈刚, 李书恒, 章辉若, 等. 鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气成藏的时间和期次[J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1453–1465.
- CHEN Gang, LI Shuheng, ZHANG Huiruo, et al. Timing and stages of the Permian oil-gas accumulations in northeastern Ordos Basin[J]. *Chinese Geological*, 2013, 40(5): 1453–1465.
- 陈志雄, 张凤奇, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地西缘下古生界奥陶系包裹体特征及油气充注史[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(6): 1028–1038.
- CHEN Zhixiong, ZHANG Fengqi, ZHAO Zhenyu, et al. Characteristics of Lower Paleozoic Ordovician inclusions and oil and gas filling history in the western margin of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Earth Science*, 2023, 34(6): 1028–1038.
- 崔军平, 任战利, 陈玉林. 海拉尔盆地贝尔凹陷热演化史与油气关系研究[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 388–394.
- CUI Junping, REN Zhanli, CHEN Yulin. Study on the Relations between Geothermal History and oil-Gas Generation in Beier Depression of Hailaer Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 388–394.
- 党文龙, 高岗, 刘建平, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组盐下天然气成因类型及来源[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 207–217.
- DANG Wenlong, GAO Gang, LIU Jianping, et al. Genetic types and sources of the subsalt natural gas in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Earth Science*, 2022, 33(2): 207–217.
- 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 418–430.
- FU Jinhua, FAN Liyong, LIU Xinshe, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 418–430.
- 郭彦如, 付金华, 魏新善, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩成藏特征与模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(4): 393–403.
- GUO Yanru, FU Jinhua, WEI Xinshan, et al. Natural gas accumulation and models in Ordovician carbonates, Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(4): 393–403.
- 郭彦如, 赵振宇, 张月巧, 等. 鄂尔多斯盆地海相烃源岩系发育特征与勘探新领域[J]. *石油学报*, 2016, 37(8): 939–951.
- GUO Yanru, ZHAO Zhenyu, ZHANG Yueqiao, et al. Development characteristics and new exploration areas of marine source rocks in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(8): 939–951.
- 胡国艺. 鄂尔多斯盆地奥陶系天然气成藏机理及其与构造演化关系 [D]. 广州: 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所), 2003.
- HU Guoyi. Natural Gas Reservoir Formation Mechanism of Ordovician And Its Relation With Tectonic Evolution In Ordos Basin[D]. Guangzhou: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 2003.
- 黄正良, 刘燕, 武春英, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段中组合下段成藏特征[J]. *海相油气地质*, 2014, 19(3): 57–65.
- HUANG Zhengliang, LIU Yan, WU Chunying, et al. Characteristics of Hydrocarbon Accumulation in the Middle and Lower Sections of Middle Assemblages of Lower Ordovician Majiagou Member-5, Ordos Basin[J]. *Marine Oil-gas Geology*, 2014, 19(3): 57–65.
- 李军, 赵靖舟, 王大兴, 等. 鄂尔多斯盆地中央古隆起东侧奥陶系中组合天然气成因与来源[J]. *石油学报*, 2016, 37(7): 821–831.
- LI Jun, ZHAO Jingzhou, WANG Daxing, et al. Genesis and source of the Ordovician mid-assemblage natural gas in the east side of the central paleouplift, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 821–831.
- 李儒峰, 陈莉琼, 李亚军, 等. 苏北盆地高邮凹陷热史恢复与成藏期判识[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 151–159.
- LI Rufeng, CHEN Liqiong, LI Yajun, et al. The thermal history reconstruction and hydrocarbon accumulation period discrimination of Gaoyou Depression in Subei Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 151–159.
- 李伟, 江斌, 刘森, 等. 内蒙古赤峰山湾子金矿流体包裹体和年代学研究[J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 394–405.
- LI Wei, JIANG Bin, LIU Miao, et al. A study of the fluid inclusions and chronology of the Shanwanzi gold deposit in Chifeng, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 47(2): 394–405.
- 李贤庆, 胡国艺, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系碳酸盐岩储层流体包裹体特征及对天然气成藏的意义[J]. *天然气地球科学*, 2004(2): 120–124.
- LI Xianqing, HU Guoyi, LI Jian, et al. The characteristics of fluid inclusion and its pool-forming significance of naturalgas from ordovician carbonate reservoirs in central Ordos Basin[J]. *Natural Gas Earth Science*, 2004(2): 120–124.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. *地质学报*, 2006(5): 617–638.
- LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-Time Coordinate of the Evolution and Reformation and Mineralization Response in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006(5): 617–638.
- 刘二虎, 陈志鹏, 王起琮, 等. 鄂尔多斯盆地靖边地区马家沟组中上组合天然气成因类型[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(2): 324–334.

- LIU Erhu, CHEN Zhipeng, WANG Qicong, et al. Genetic types of natural gas from upper & middle assemblage of Maiiagou Formation in Jingbian area, Ordos Basin[J]. *Journal of Xian University of Science And Technology*, 2022, 42(2): 324–334.
- 罗枭, 姜振学, 李卓, 等. 英买入地区中生界—新生界油气藏石油包裹体特征及成藏期次[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 60–66.
- LUO Xiao, JIANG Zhenxue, LI Zhuo, et al. The properties of petroleum inclusions and stages of hydrocarbon accumulation in Mesozoic-Cenozoic reservoirs in Yingmaili area of Tabei uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(1): 60–66.
- 孟强, 史江龙, 赵恒, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组米探 1 井天然气成因与来源[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(10): 1696–1709.
- MENG Qiang, SHI Jianglong, ZHAO Heng, et al. Genesis and source of natural gas in Well Mitan-1 of Ordovician Majiagou Formation, middle-eastern Ordos Basin, China[J]. *Natural Gas Earth Science*, 2023, 34(10): 1696–1709.
- 牛小兵, 赵伟波, 史云鹤, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组天然气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1240–1257.
- NIU Xiaobing, ZHAO Weibo, SHI Yunhe, HU Xinyou, et al. Natural gas accumulation conditions and exploration potential of Benxi Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1240–1257.
- 任军峰, 刘新社, 喻建, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下天然气成藏特征及勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6): 125–140.
- REN Junfeng, LIU Xinshe, YU Jian, et al. Characteristics of natural gas accumulation and exploration target of the Ordovician sub-salt in the central and eastern Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration of China*, 2021, 26(6): 125–140.
- 任战利, 刘丽, 崔军平, 等. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(4): 502–506.
- REN Zhanli, LIU Li, CUI Junping, et al. Application of tectonic-thermal evolution history to hydrocarbon accumulation timing in sedimentary basins[J]. *Oil and Gas Geology*, 2008, 29(4): 502–506.
- 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. *中国科学 (D 辑地球科学)*, 2007, 37(S1): 23–32.
- REN Zhanli, ZHANG Sheng, GAO Shengli, et al. The tectonic and thermal evolution history of the Ordos Basin and its significance for reservoir formation and mineralization[J]. *Science China (Series D Earth Sciences)*, 2007, 37(S1): 23–32.
- 任战利. 鄂尔多斯盆地热演化史与油气关系的研究[J]. *石油学报*, 1996(1): 17–24.
- REN Zhanli. Study on the relationship between thermal evolution history and oil and gas in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996(1): 17–24.
- 邵晓州, 李勇, 张文选, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长 8 致密砂岩流体包裹体特征与石油成藏[J]. *中国地质*, 2020: 1–15.
- SHAO Xiaozhou, LI Yong, ZHANG Wenxuan, et al. The Fluid Inclusion Characteristics and Petroleum Accumulation of Chang 8 Tight Sandstone in Northern Shaanxi, Ordos Basin[J]. *Chinese Geological*, 2020: 1–15.
- 时保宏, 张艳, 张雷, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 致密储层流体包裹体特征与成藏期次[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(6): 599–603.
- SHI Baohong, ZHANG Yan, ZHANG Lei, et al. Hydrocarbon accumulation dating by fluid inclusion characteristics in Chang 7 tight sandstone reservoirs of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(6): 599–603.
- 苏中堂, 张丽雯, 李娟娟, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组白云岩包裹体特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(5): 843–849.
- SU Zhongtang, ZHANG Liwen, LI Jingjuan, et al. Characteristics of Fluid Inclusions in Dolomite of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin and Their Significance[J]. *Mineral Rock Geochemical Bulletin*, 2017, 36(5): 843–849.
- 唐胜利, 唐佳阳, 史勇, 等. 川南煤田古叙矿区龙潭组煤层受热-生烃史及气体成因[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(2): 298–306.
- TANG Shengli, TANG Jiayang, SHI Yong, et al. Heat-hydrocarbon generating history and gas origin of Longtan Formation in Guxu mining area in South Sichuan coalfield[J]. *Journal of Xian University of Science And Technology*, 2021, 41(2): 298–306.
- 陶华, 王建民. 陕北富县地区晚三叠世包裹体特征及烃类充注期次[J]. *西安科技大学学报*, 2022, 42(3): 537–545.
- TAO Hua, WANG Jianmin. Characteristics of Late Triassic inclusions and hydrocarbon source charging stages in Fuxian area, northern Shaanxi[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2022, 42(3): 537–545.
- 陶士振. 自生矿物序次是确定包裹体期次的根本依据[J]. *石油勘探与开发*, 2006(2): 154–160.
- TAO Shizhen. Sequence of diagenetic authigenic mineral: the basis of timing the inclusions formation in sedimentary rocks[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006(2): 154–160.
- 田刚. 鄂尔多斯盆地中元古界热史及其含油气系统分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
- TIAN gang. Analysis of the Proterozoic thermal history and petroleum system in the basin Erdos[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- 王禹诺, 任军峰, 杨文敬, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组天然气成藏特征及勘探潜力[J]. *海相油气地质*, 2015,

- 20(4): 29–37.
- WANG Yunuo, REN Junfeng, YANG Wenjing, et al. Gas Accumulation Characteristics and Potential of Ordovician Majiagou Reservoirs in the Center-East of Ordos Basin[J]. *Marine Oil-gas Geology*, 2015, 20(4): 29–37.
- 魏柳斌,包洪平,严婷,等.鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组五段5亚段微生物碳酸盐岩发育特征及储集意义[J].*石油学报*,2021,42(8):1015–1025.
- WEI Liubin, BAO Hongping, YAN Ting, et al. Development characteristics and significance of microbial carbonate reservoirs in the fifth submember of Member 5 of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(8): 1015–1025.
- 魏柳斌,赵俊兴,苏中堂,等.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合微生物碳酸盐岩分布规律及沉积模式[J].*石油勘探与开发*,2021,48(6):1162–1174.
- WEI Liubin, ZHAO Junxing, SU Zhongtang, et al. Distribution and depositional model of microbial carbonates in the Ordovician middle assemblage Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(6): 1162–1174.
- 吴东旭,周进高,任军峰,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组沉积环境恢复与源储配置关系[J].*地球科学*,2023,48(2):553–567.
- WU Dongxu, ZHOU Jingao, REN Junfeng, et al. Reconstruction of Depositional Environment and Source-Reservoir Configuration Relationship of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(2): 553–567.
- 吴小力,徐旺林,李荣西,等.鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组硫化氢成因——来自流体包裹体的证据[J].*石油学报*,2022,43(2):250–261.
- WU Xiaoli, XU Wanglin, LI Rongxi, et al. Genesis of hydrogen sulfide in Ordovician Majiagou Formation, mid-eastern Ordos Basin: evidence from fluid inclusions[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(2): 250–261.
- 谢康,谭秀成,冯敏,等.鄂尔多斯盆地苏里格气田东区奥陶系马家沟组早成岩期岩溶及其控储效应[J].*石油勘探与开发*,2020,47(6):1159–1173.
- XIE Kang, TAN Xiucheng, FENG Min, et al. Eogenetic karst and its control on reservoirs in the Ordovician Majiagou Formation, eastern Sulige gasfield, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1159–1173.
- 徐旺林,胡素云,李宁熙,等.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合内幕气源特征及勘探方向[J].*石油学报*,2019,40(8):900–913.
- XU Wanglin, HU Suyun, LI Ningxi, et al. Characteristics and exploration directions of inner gas source from the middle assemblage of Ordovician in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(8): 900–913.
- 杨华,包洪平,马占荣.侧向供烃成藏-鄂尔多斯盆地奥陶系膏盐岩下天然气成藏新认识[J].*天然气工业*,2014,34(4):19–26.
- YANG Hua, BAO Hongping, MA Zhanrong, et al. Reservoir-forming by lateral supply of hydrocarbon: A new understanding of the formation of Ordovician gas reservoirs under gypsum in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(4): 19–26.
- 杨华,包洪平.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J].*天然气工业*,2011,31(12):11–20.
- YANG Hua, BAO Hongping. Characteristics of hydrocarbon accumulation in the middle Ordovician assemblages and their significance for gas exploration in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(12): 11–20.
- 杨华,付金华,魏新善,等.鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J].*石油学报*,2011,32(5):733–740.
- YANG Hua, FU Jinhua, WEI Xinshan, et al. Natural gas exploration domains in Ordovician marine carbonates, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 733–740.
- 杨俊杰,张伯荣.陕甘宁盆地油气区及油气藏序列[J].*石油学报*,1988(1):1–8.
- YANG Junjie, ZHANG Borong. Oil and gas area and oil and gas reservoir sequence in Shan-Gan-Ning Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1988(1): 1–8.
- 姚泾利,包洪平,任军峰,等.鄂尔多斯盆地奥陶系盐下天然气勘探[J].*中国石油勘探*,2015,20(3):1–12.
- YAO Jingli, BAO Hongping, REN Junfeng, et al. Exploration of Ordovician Subsalt Natural Gas Reservoirs in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration of China*, 2015, 20(3): 1–12.
- 姚泾利,黄建松,郑琳,等.鄂尔多斯盆地东北部上古生界天然气成藏模式及气藏分布规律[J].*中国石油勘探*,2009,14(1):10–16.
- YAO Jingli, HUANG Jiansong, ZHENG Lin, et al. Forming Patterns and Distribution Laws of Gas Reservoir in Northeastern Ordos Basin during Paleozoic[J]. *Petroleum Exploration of China*, 2009, 14(1): 10–16.
- 于洲,王维斌,魏柳斌,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段构造-岩相古地理新认识及勘探意义[J].*地质学报*,2023,97(8):2645–2658.
- YU Zhou, WANG Weibin, WEI Liubin, et al. Tectonic paleogeographic framework of the fourth Member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos basin and its significance for oil and gas exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2645–2658.
- 张涛,张亚雄,金晓辉,等.鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩-蒸发岩层系层序地层模式及其对源-储的控制作用[J].*石油与天然气地质*,2023,44(1):110–124.
- ZHANG Tao, ZHANG Yaxiong, JIN Xiaohui, et al. Sequence stratigraphy models of carbonate-evaporite successions and their controls on source rocks and reservoirs in the Ordovician Majiagou

- Formation, Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2023, 44(1): 110–124.
- 张雯, 刘文汇, 王晓锋, 等. 鄂尔多斯盆地中东部下古生界天然气地球化学特征差异性机理[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(10): 1842–1854.
- ZHANG Wen, LIU Wenhui, WANG Xiaofeng, et al. Geochemical characteristics of natural gas in Upper Middle and Lower Paleozoic assemblages in the Middle East, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(10): 1842–1854.
- 张钰, 曹自成, 陈红汉, 等. 顺北地区不同走滑断裂带奥陶系油气成藏期次及其贡献度差异性[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2168–2188.
- ZHANG Yu, CAO Zicheng, CHEN Honghan, et al. Difference of Hydrocarbon Charging Events and Their Contribution Percentages to Ordovician Reservoirs among Strike-Slip Fault Belts in Shunbei Area, Tarim Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2168–2188.
- 赵桂萍. 鄂尔多斯杭锦旗地区上古生界储层流体包裹体特征与天然气成藏时期[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5): 905–912.
- ZHAO Guiping. Characterization of fluid inclusions and timing of gas accumulation in Upper Paleozoic reservoirs of Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2017, 38(5): 905–912.
- 赵卫卫, 郭峰, 王宝清, 等. 苏里格地区下古生界储层流体包裹体特征及其成藏作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2011, 47(1): 6–11.
- ZHAO Weiwei, GUO Feng, WANG Baoqing et al. Characteristics of fluid inclusions and determination of gas accumulation period in the lower paleozoic reservoirs of Sulige region[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2011, 47(1): 6–11.
- 赵兴齐, 陈践发, 石杰, 等. 塔里木盆地轮南低凸起奥陶系深层天然气地球化学特征及成藏模式[J]. *天然气工业*, 2023, 43(9): 49–60.
- ZHAO Xingqi, CHEN Jianfa, SHI Jie, et al. Geochemical characteristics and accumulation model of Ordovician deep gas in Lunnan low uplift of the Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(9): 49–60.
- 钟金银, 颜其彬, 杨辉廷, 等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系气藏成藏期次[J]. *新疆地质*, 2012, 30(4): 447–450.
- ZHONG Jinyin, YAN Qibin, YANG Huiting, et al. Study on Accumulation Stage of Ordovician Gas Pool in Southern Part of Ordos Basin[J]. *Geology of Xinjiang*, 2012, 30(4): 447–450.
- 周进高, 李明瑞, 吴东旭, 等. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统马家沟组盐下含气系统特征与勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2023, 43(3): 34–45.
- ZHOU Jingao, LI Mingrui, WU Dongxu, et al. Characteristics and exploration potential of subsalt gas-bearing system in Majiagou Formation of Middle Ordovician in the eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(3): 34–45.
- 周勇水, 李红磊, 史大海, 等. 银根-额济纳旗盆地烃源岩特征及油气富集规律[J]. *石油学报*, 2021, 42(8): 1026–1038.
- ZHOU Yongshui, LI Honglei, SHI Dahai, et al. Characteristics of source rocks and enrichment laws of hydrocarbons in Yin'gen-Ejinaqi Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(8): 1026–1038.
- 宗奕, 邹华耀, 于开平. 辽东湾地区古近系烃源岩热演化模拟[J]. *天然气工业*, 2010, 30(7): 21–24.
- ZONG Yi, ZOU Huayao, YU Kaiping. Thermal evolution simulation of the Paleogene source rocks in the Liaodong Bay area[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(7): 21–24.
- 邹德. 南祁连盆地木里坳陷中侏罗统油气成藏特征分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- ZOU De. Analysis of hydrocarbon accumulation characteristics of Middle Jurassic in Muli Depression of South Qilian Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- Chen G, Li Sh, Zhang Hr, et al. Timing and stages of the Permian oil-gas accumulations in northeastern Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2013, 40: 1453–1465.
- Chi Guoxiang, Chou I-ming, Lu Hz. An overview on current fluid-inclusion research and applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19: 201–212.
- Darby Brian, Ritts B. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage: The intraplate Western Ordos fold-thrust belt, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 205: 13–24.
- Guo Xiaowen, Liu Keyu, He Sheng, et al. Petroleum generation and charge history of the northern Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China: Insight from integrated fluid inclusion analysis and basin modelling[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 33(1): 21–35.
- Hu Guoyi, Li Jin, Shan Xiuqin, et al. The origin of natural gas and the hydrocarbon charging history of the Yulin gas field in the Ordos Basin, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 81: 381–391.
- Song Tushun, Liu Li, Li Fulai, et al. The Study of The Tight Sandstone Reservoir's Characteristics and The Fluid Inclusions in Fuyu Oil Layer, Daqing Placanticline[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2015, 89: 79–80.
- Zhao Junfeng, Mountney Nigel, Liu Chiyang, et al. Outcrop Architecture of a Fluvio-Lacustrine Succession: Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 68.