

鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用

任战利^{1,2}, 祁凯¹, 李进步³, 霍小菊⁴, 崔军平¹, 杨鹏¹, 王琨¹, 陈占军^{2,5}, 杨桂林¹

(1. 西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 中国石油 长庆油田公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710018; 4. 中国石油 长庆油田公司 第二采油厂, 甘肃 庆阳 745100; 5. 陇东学院, 甘肃 西峰 745000)

摘要:鄂尔多斯盆地热演化史及热岩石圈厚度恢复表明, 中生代晚期早白垩世存在构造热事件及深部热岩石圈减薄的动力学过程, 盆地南部岩石圈厚度薄, 热流值及地温梯度高。不同层位烃源岩在盆地南部热演化程度高, 热异常明显。烃源岩热模拟实验以及盆地深部热动力演化史研究表明, 早白垩世热事件及形成的热异常使烃源岩生烃量明显增加, 是盆地油气富集的重要原因之一。不同层位烃源岩在早白垩世大规模生油、生气及成藏, 主要受早白垩世岩石圈减薄的深部热动力学过程及构造热事件控制。古生界和中生界不同层位的油气田分布主要受烃源岩、热演化程度及储层控制。从烃源岩发育层系及热演化程度来看, 盆地南部延长组7段致密油、页岩油热演化程度高, 分布面积广, 勘探潜力巨大; 石炭系-二叠系煤系烃源岩全盆地大面积分布, 天然气勘探前景广阔; 深层下古生界奥陶系碳酸盐岩层系具有形成大气田的条件, 需要进一步明确烃源岩生烃潜力; 深层中-新元古界值得进一步勘探, 关键是明确规模断陷分布及烃源岩的生烃规模。

关键词:生烃量; 热异常; 构造热事件; 岩石圈厚度; 热动力; 成藏期; 油气富集; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.3 **文献标识码:** A

Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin

Ren Zhanli^{1,2}, Qi Kai¹, Li Jinbu³, Huo Xiaojie⁴, Cui Junping¹, Yang Peng¹, Wang Kun¹, Chen Zhanjun^{2,5}, Yang Guilin¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Exploitation, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

3. Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

4. The second oil Production Plant of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Qingyang, Gansu, 745100, China;

5. Longdong University, Xifeng, Gansu 745000, China)

Abstract: The thermal history and thermal lithospheric thickness restoration for the Ordos Basin indicate that tectonic thermal events and dynamic processes of deep thermal lithosphere thinning in the Early Cretaceous result in thin lithosphere, high heat flow values and geothermal gradient at the southern part of the basin. Source rocks at different horizons there also show high maturity and obvious thermal anomalies. Thermal simulation for the source rocks and thermodynamic history of the basin indicate strong influence of the thermal events and thermal anomalies in the Early Cretaceous on the significantly increasing amount of hydrocarbon generation, which is also interpreted to be one of the important reasons behind the high oil and gas enrichment in the basin. The large-scale hydrocarbon generation and accumulation from these source rocks in the Early Cretaceous are mainly controlled by the deep thermodynamic process of lithosphere thinning and tectonic thermal events during the period. The distribution of oil and gas fields in different Paleozoic and Mesozoic layers is mainly controlled by the distribution of source rocks and their thermal maturity as well as reservoirs. From the perspective of source rock development and thermal maturity, tight oil and shale oil in the Chang 7 member (Yanchang Formation) of southern basin have high thermal maturity, and are widely distributed, making the

收稿日期: 2021-02-03; 修订日期: 2021-02-18。

第一作者简介: 任战利(1961—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 盆地热演化史与油气、地热资源评价及勘探开发。E-mail: renzhanli@nwwu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630312); 国家重点研发计划项目(2017YFC0603106); 长庆油田分公司科技重大专项; 陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室开放课题项目。

member a quite promising exploration target. The Carboniferous-Permian with its basin-wide occurring coal-measure source rocks has high exploration potential for natural gas. The deep Lower Paleozoic Ordovician carbonate sequences have the conditions favorable for large gas fields to form but further study is needed to clarify the hydrocarbon generation potential of source rocks. The deep Proterozoic is also worthy of an exploratory gaze with the distribution of fault depressions and the hydrocarbon generation capacity of source rocks being recommended as the focuses.

Key words: hydrocarbon generation amount, thermal anomaly, tectonic thermal event, lithospheric thickness, thermodynamics, accumulation period, hydrocarbon enrichment, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地为大型叠合盆地,油气资源丰富。仅延长组7段(简称长7段)剩余页岩油资源量就达 $59.49 \times 10^8 \text{ t}^{[1-2]}$ 。2020年中国石油长庆油田油气产量已突破 $6\,000 \times 10^4 \text{ t}$,延长集团油气产量突破 $1\,100 \times 10^4 \text{ t}$,中国石化华北分公司油气产量接近 $500 \times 10^4 \text{ t}$,盆地油气总产量超过 $7\,600 \times 10^4 \text{ t}$ 。鄂尔多斯盆地发育多套烃源岩,有多套含油层系。盆地热演化史对油气生成、成藏有重要控制作用。鄂尔多斯盆地现今为中温型盆地,盆地后期强烈抬升,遭受剥蚀,处于降温过程。笔者研究发现中生代晚期构造热事件对油气生成及成藏具有重要控制作用,并对其进行了深入的研究^[3-5],热事件及热演化史研究在油气成藏评价及指导勘探中发挥了重要作用^[6-7]。但从深部岩石圈热动力学形成机制及演化角度,研究鄂尔多斯盆地热动力学演化与油气分布、富集规律工作相对较薄弱^[5]。

随着油气勘探工作及深部岩石圈结构研究的深入,很有必要将盆地热演化程度、热演化史与深部岩石圈热动力学演化相结合,从更大范围及更深层次来研究油气分布及富集规律。在国家自然科学基金重点项目及国家科技重大专项等的支持下,近年来笔者对鄂尔多斯盆地岩石圈热动力学演化特征进行了研究,研究表明盆地早白垩世热岩石圈厚度明显减薄,早白垩世构造热事件具有明显的深部热背景,盆地热岩石圈动力学演化及早白垩世构造热事件对油气生成、成藏及富集有重要控制作用^[5,8]。本文根据鄂尔多斯盆地油气勘探新进展,从盆地深部热动力学及盆地热演化史角度研究了盆地中生代晚期早白垩世岩石圈深部热动力对油气生成、成藏期的控制作用,探讨了热异常对生烃量的影响及油气富集原因,从盆地深部热动力学及盆地热演化史角度指出了鄂尔多斯盆地今后油气勘探的方向。

1 盆地构造热事件与岩石圈热演化史

鄂尔多斯盆地为大型叠合盆地,经历了长期的演化,不同时期盆地范围、盆地性质、沉积储层差异大^[9-10]。不同时期的盆地纵向叠置,发育多套烃源

岩,形成了多套含油层系。盆地主体部位热演化程度镜质体反射率(R_o)随深度增加而逐渐增高,不同深度及层位并未出现热演化程度的明显错断现象,不同区块镜质体反射率随深度变化曲线差异主要是曲线斜率及后期剥蚀厚度的差异,表明盆地热演化程度是随深度增加而逐渐增高的,为连续增温型(图1),盆地在早白垩世末达到最大埋深及最高热演化程度^[3-4]。

鄂尔多斯盆地现今地温梯度及热流值较低,不同时期盆地类型、范围及动力学背景不同,根据作者提出的叠合盆地热演化史恢复原理及恢复方法,对鄂尔多斯盆地构造热演史研究发现中生代晚期早白垩世地温梯度及大地热流明显增高,存在构造热事件(图2)^[3-4,11],表明鄂尔多斯盆地并非一直稳定,在中生代晚期经历了强烈改造,表现出活化的特征,在地热场表现明显^[3-5]。根据热传导方程及不同圈层岩石热参数,对不同时期热岩石圈厚度进行了恢复。恢复结果表明盆地现今热岩石圈厚度分布在90~170 km,早白垩世热岩石圈厚度为50~75 km,相比现今岩石圈厚度发生了明显的减薄,在盆地渭北隆起、陕北斜坡南部岩石圈

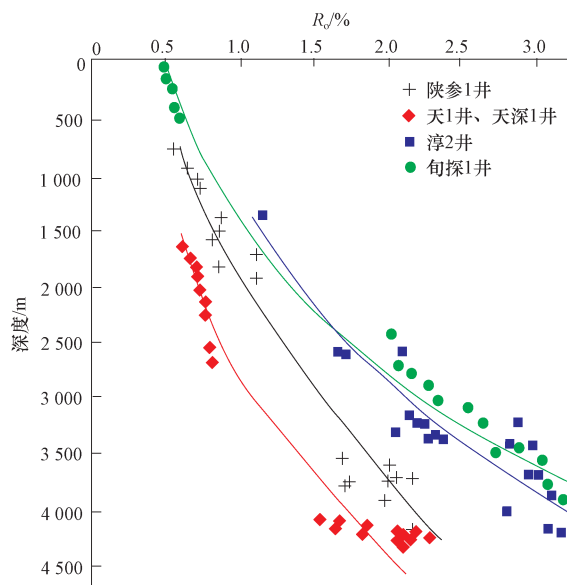


图1 鄂尔多斯盆地典型井镜质体反射率与深度关系
Fig.1 Vitrinite reflectance vs. depth of samples from typical wells, Ordos Basin

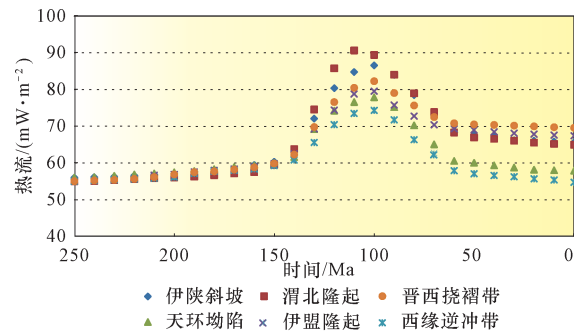


图2 鄂尔多斯盆地大地热流演化史

Fig. 2 Evolution history of terrestrial heat flow in the Ordos Basin

厚度更薄(图3)。早白垩世构造热事件的发生时间与华北克拉通破坏时间具有同时性,构造热事件是盆地深部热活动性增强、岩石圈减薄的结果^[8,12-14]。伊盟隆起上出露的早白垩世玄武岩、晋西挠褶带早白垩世紫金山岩体、盆地西南缘早白垩世桐城岩体等提供了软流圈上涌岩石圈减薄的直接证据。鄂尔多斯盆地早白垩世岩石圈厚度明显减薄,晚白垩世以来岩石圈厚度为逐渐加厚的过程^[8,12]。

2 热成熟度异常与生烃量增加

2.1 热演化程度及异常分布

鄂尔多斯盆地早白垩世由于岩石圈减薄,地温梯度、热流值高,多套烃源岩在早白垩世达到最大埋深及

最高热演化程度,盆地南部不同层位烃源岩热演化程度普遍高于北部。南部下古生界烃源岩热演化程度普遍高于北部。南部下古生界烃源岩热演化程度高, R_o 值可达3.0%;上古生界煤系烃源岩 R_o 普遍大于2.0%,高值可达2.8%以上;三叠系延长组烃源岩 R_o 值普遍大于0.8%,高值达到1.1%以上;侏罗系延安组 R_o 值最高可达0.8%。盆地不同层位热演化程度 R_o 值高值区及热异常主要分布于盆地中南部(图4)^[5,8,12,15]。

如果按照正常地温梯度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 计算,早白垩世末延长组烃源岩在南部热演化程度 R_o 值可达0.70%,上古生界煤系烃源岩 R_o 值可达1.30%,下古生界烃源岩 R_o 值可达1.75%。盆地现今不同层位烃源岩热演化程度是在早白垩世末达到的,现今热演化程度高值异常区明显高于正常地温梯度值达到的热演化程度。以延长组为例计算热异常程度,现今延长组最高热演化程度减去按正常地温梯度计算在早白垩世末达到的热演化程度为热异常值,以此绘制热异常程度分布图(图5),可以看出鄂尔多斯盆地延长组热异常区近乎全盆分布,热异常程度高值区主要分布于盆地中南部,热演化程度 R_o 差值普遍大于0.28%,在盆地南部异常幅度更大,热异常程度高值区与不同层位热演化程度高值区有明显的对应关系(图4)。

2.2 热异常增加的生烃量探讨

由于早白垩世构造热事件的存在,在盆地中南部形成了明显的热异常,热异常的存在提高了热演化程

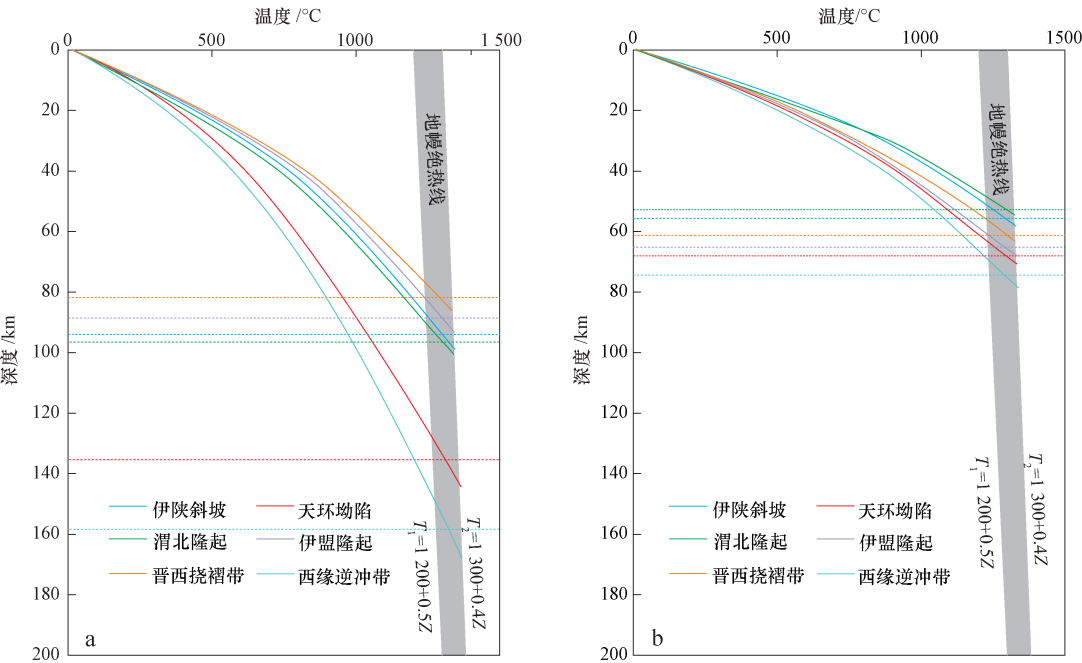


图3 鄂尔多斯盆地现今(a)及早白垩世(b)不同构造单元热岩石圈厚度

Fig. 3 Thermal lithospheric thickness of different structural units at present (a) and in the Early Cretaceous (b), Ordos Basin

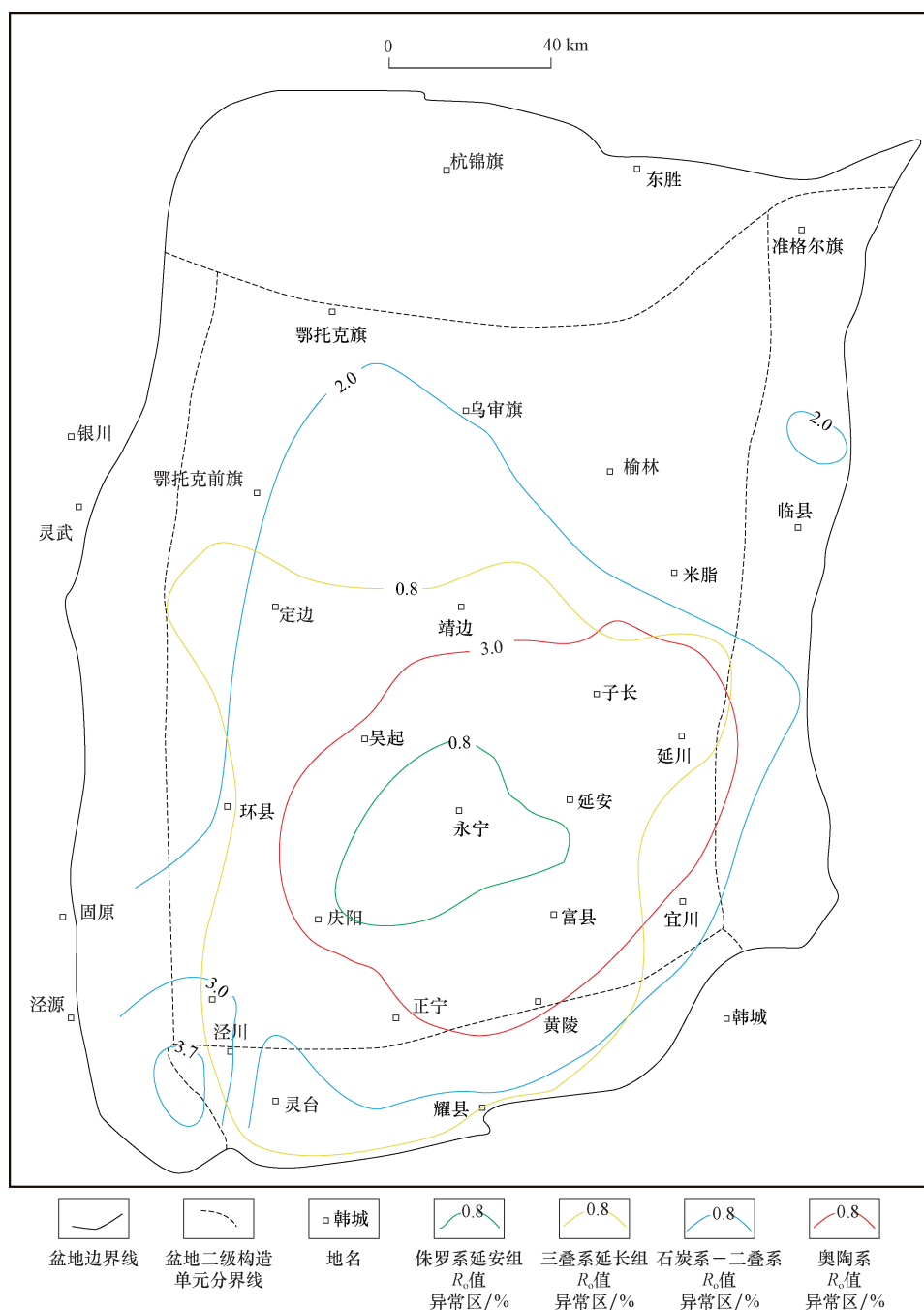


图4 鄂尔多斯盆地不同层位热演化程度叠合分布

Fig. 4 Overlapped thermal maturity contours of different layers, Ordos Basin

度。热事件导致的热演化程度的增加对生烃量有明显的影响,但这方面缺乏分析及讨论。

根据盆地热演化史模拟结果,长7段有效烃源岩在中侏罗世末期开始生烃,主要在早白垩世由于达到最大埋深及发生构造热事件而大量生排烃,而晚白垩世以来发生的盆地整体构造抬升,盆地周缘抬升早,盆地新生代以来快速抬升^[5,16-18],古地温明显高于今地温,使得生烃作用停止^[3-5]。长7段优质源岩在盆地南部已达到成熟-高成熟演化阶段(R_o 值为0.90%~

1.15%),模拟实验结果表明长7段优质油源岩液态烃产出高峰对应的温度在280~320℃(等效 R_o 为0.71%~1.30%),液态烃产率达357~417 mg/g^[19],按照正常热演化程度 R_o 为0.71%,异常热演化程度 R_o 为1.14%计算,则由于热演化程度的增高,液态烃生成量约为100.7 mg/g。从长7段烃源岩不同加热速率的模拟实验重烃产率变化来看,长7段烃源岩生油高峰期 R_o 约为1.00%,按照正常热演化程度 R_o 为0.70%,则正常生成液态烃为81 mg/g,以异常热演化

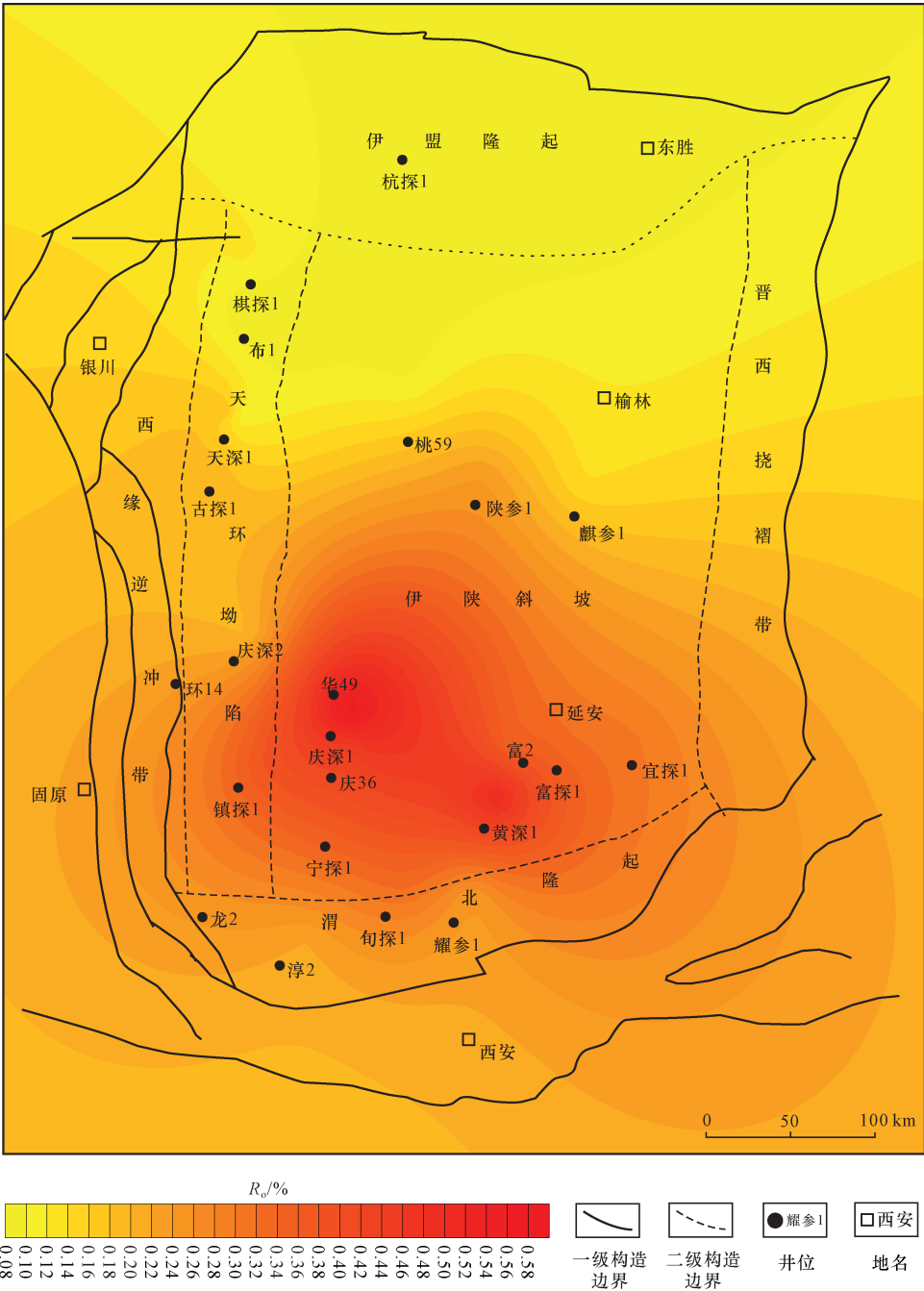


图 5 早白垩世热事件导致鄂尔多斯盆地中生界延长组热演化异常程度分布

Fig. 5 Abnormal maturity distribution of the Yanchang Formation caused by thermal events in the Early Cretaceous, Ordos Basin

程度 R_o 为 1.00% 计算,热异常时生成的液态烃量为 230 mg/g,由于热演化程度的增高液态烃多生成量约为 149 mg/g^[20]。根据齐玉林等对长 7 段不同类型的烃源岩热模拟实验表明黑色页岩主要生烃期对应的 R_o 值为 0.70% ~ 0.87%,低于暗色泥岩(主要生烃期对应 R_o 值为 1.06% ~ 1.72%),且以生油为主,黑色页岩的总烃产率、生油量均高于暗色泥岩^[21],黑色页岩已完全进入主生烃期大量生油阶段,黑色页岩生烃高峰对应的 R_o 值低于暗色泥岩,由于热演化程度的增

高,黑色页岩单位重量有机碳液态烃生成的量约为 200 mg/g,液态烃生成量比暗色泥岩更高。长 7 段烃源岩不同加热过程的热模拟实验分析表明,随着热演化程度的增高,生油量明显增加,生烃曲线最高值出现在 R_o 值为 1.28% (图 6)。根据模拟结果由于热异常增加了烃源岩的热演化程度,每克干酪根由于热异常成熟度增加多生成的液态烃量约为 129 mg/g,单位质量的烃源岩由于热异常多生成的液态烃量可达 7 mg/g 以上。

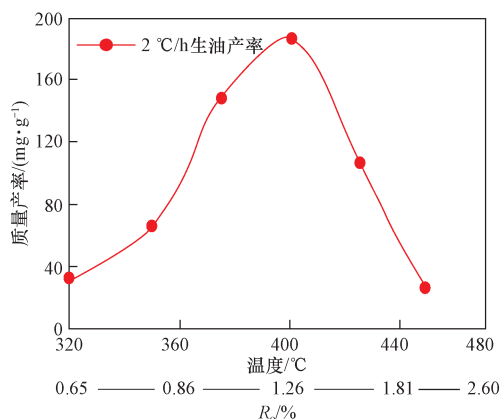


图6 鄂尔多斯盆地中生界延长组烃源岩热演化程度与生成液态烃量关系对比

Fig. 6 Thermal maturity vs. liquid hydrocarbon generation amount of source rocks in the Yanchang Formation, Ordos Basin

对于下古生界奥陶系烃源岩由于热异常烃源岩镜质体反射率按正常 1.75% 增加到异常 2.50% 计算, 根据模拟实验结果中间值计算, 则由于热异常单位质量有机碳多产气约 $330 \text{ m}^3/\text{t}$ (图 7)^[22-23]。上古生界石炭系-二叠系煤层热演化程度镜质体反射率按正常值 1.30% 计算, 异常值按 2.00% 计算, 残煤产气率按模拟曲线中间值分别为 60 及 $125 \text{ m}^3/\text{t}$ 计算, 镜质体反射率从 1.30% 增加到 2.00% 单位质量有机碳多产气 $65 \text{ m}^3/\text{t}$ (图 8)^[24-25]。由此可见由于热异常提高了烃源岩热演化程度, 导致单位质量的烃源岩生烃量明显增加。仅以中生界长 7 段黑色页岩为例来计算由于热异常多产生的生烃量, 长 7 段暗色泥岩两类烃源岩, 黑色页岩有机质类型好, 有机质丰度高, 黑色页岩和暗色泥岩构成了中生界大规模成藏的丰富油源物质基础。盆地南部长 7 段优质烃源岩黑色泥岩厚度取较小值 11.2 m, 热异常区优质烃源岩分布范围按小值 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 热异常值 R_o 值按 1.0%, 油页岩密度为 2.21 g/cm^3 ^[26], 根据我们的热模拟结果结合前人研究结果, 中生界长 7 段黑色页岩烃源岩由于热异常液态烃多生成量低值为 4 mg/g ^[27], 高值在 $28 \sim 47.7 \text{ mg/g}$ ^[19-21], 分别用 4 mg/g 及 28 mg/g 值计算, 由于热异常仅长 7 段黑色页岩烃源岩多增加的生烃量计算在 $(23.52 \sim 164.64) \times 10^8 \text{ t}$ 。由此可见早白垩世热事件导致烃源岩生烃量显著增加。黑色页岩的单位重量有机碳含量是暗色泥岩的 2~3 倍, 长 7 段暗色泥岩生烃量还未计算在内, 如果加上暗色泥岩生烃量则总生烃量会更大。

上古生界煤层及中生界延长组烃源岩大面积分布, 由于盆地热异常分布面积大, 热异常明显的增大了不同层位烃源岩的生烃量。盆地南部虽然煤层较薄,

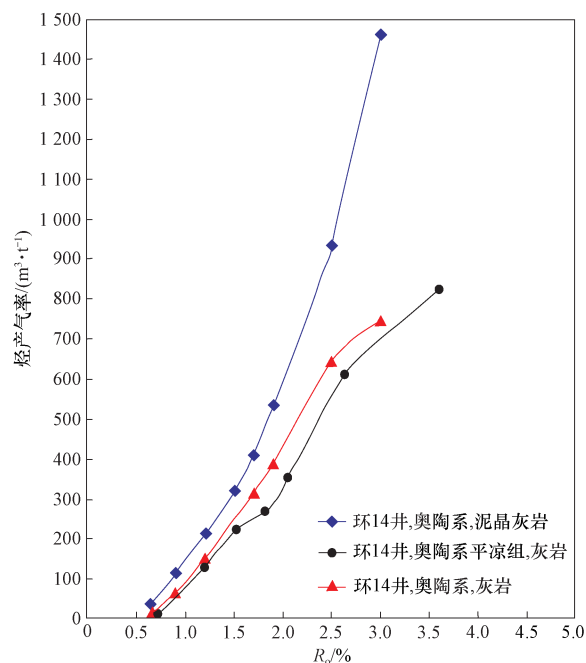


图7 鄂尔多斯盆地古生界奥陶系碳酸盐岩热模拟产气量对比^[22-23]

Fig. 7 Gas productivity curves of thermal simulations on different Ordovician carbonate rock samples, Ordos Basin^[22-23]

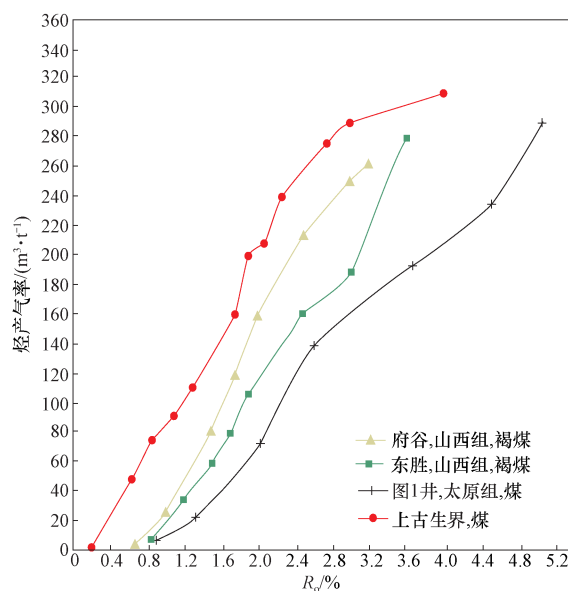


图8 鄂尔多斯盆地古生界煤层热模拟产气量对比^[24-25]

Fig. 8 Gas productivity curves of thermal simulations on the Upper Paleozoic coal seam samples, Ordos Basin^[24-25]

但由于构造热事件导致煤层热演化程度增加, 明显增加的生烃量在某种程度上可以弥补煤层厚度的不足。

鄂尔多斯盆地由于中生代晚期早白垩世岩石圈减薄发生的构造热事件, 产生了明显的热异常, 导致不同层位烃源岩热演化程度增高及烃源岩生烃量显著增加。因此深部热岩石圈减薄, 构造热事件的存在也是

鄂尔多斯盆地油气更加富集的重要原因之一。

3 盆地热动力学演化对油气生成、成藏及富集的控制作用

盆地热动力学演化过程控制了盆地的热演化史,进而控制了油气的生成、成藏、富集及分布^[8,28-29]。

3.1 热动力演化与生烃、成藏关系

根据多种古地温恢复方法及热传导方程,恢复了盆地的热演化史及热岩石圈动力学演化,研究结果表明在古生代及中生代早期,盆地地温梯度、大地热流较低,热岩石圈厚度较大,中生代晚期早白垩世存在热岩石圈减薄及区域构造热事件^[3-5,15]。

根据多种方法确定了鄂尔多斯盆地油气藏主要充注期及形成时期为早白垩世^[4-5,8,30],油气藏有中、晚侏罗世及早白垩世两期充注。下古生界奥陶系烃源岩主要在晚三叠世一早、中侏罗世生油,早白垩世生成的油发生裂解及烃源岩进入过成熟大量生气阶段,形成气藏。上古生界煤系烃源岩在中、晚侏罗世一早白垩世大量生成天然气,有中晚侏罗世及早白垩世两期充注,主要在早白垩世充注及成藏。奥陶系、石炭系-二叠系大规模生气及成藏时期、中生界延长组湖相烃源岩大规模生油时期及主要成藏时期均在早白垩世。晚白垩世-新生代,主要是盆地内部已形成油气藏的调整及盆地边缘油气的逸散。鄂尔多斯盆地不同层位烃源岩在早白垩世大规模生油、生气及成藏主要受早白垩世岩石圈减薄深部热动力学背景及构造热事件控制(图9)^[4-5,8]。

3.2 热成熟度对油气富集的控制作用

鄂尔多斯盆地地下古生界近年来天然气勘探取得重要进展,在中央古隆起西斜坡区奥陶系乌拉力克组碳酸盐岩中发现了天然气藏及页岩气藏^[31-32],发现了一批高产井,含气范围不断扩大。下古生界原生天然气藏主要分布于中央古隆起西北斜坡、东部斜坡、南部隆起北斜坡及东部盐洼。古生界烃源岩主要分布于中央古隆起西部、东部、南部及东部盐洼,镜质体反射率在盆地南部最高达3.0%以上。可以看出下古生界原生气藏分布主要受下古生界及上古生界烃源分布、热演化程度、储层及古构造控制,热演化程度及深部热异常对天然气分布有重要控制作用。

上古生界煤系烃源岩热演化程度南高北低,北部

镜质体反射率为1.2%~2.0%,南部可达3.0%^[12,15]。华北公司在盆地北部、长庆油田在盆地西南及东北部、延长油田在盆地南部均发现了气田,盆地具有满盆含气的特点^[31,33-35]。气田主要分布于镜质体反射率达1.3%~2.8%的热演化程度较高地区,天然气藏分布受煤系烃源岩分布、热演化程度及储层控制(图10)。盆地南部煤层厚度较薄,过去认为含气性差,笔者对盆地南部古生界烃源岩分布与热演化史的关系及生排烃特征进行了研究,虽然上古生界煤层厚度较薄,但热演化程度高,热演化程度提高可以明显增加生气量。盆地南部发育上古生界煤系烃源岩及下古生界两套烃源岩,因此具有天然气勘探潜力^[36]①,煤层分布区及热演化程度控制了气田分布,预测结果被以后的天然气勘探实践及大气田发现证实^[31,35]。

长7段烃源岩热演化程度分布具有南高北低的特点,南部镜质体反射率已达0.9%~1.1%,已进入生油高峰阶段^[3-5]。盆地南部也是长7段湖盆中心,烃源岩发育。中生界延长组油田镜质体反射率为0.8%~1.0%,正好处于盆地南部的热异常区。油田的分布主要受烃源岩、热演化程度及砂体控制。盆地深部热动力条件增强,烃源岩的生油量明显增加,这也是盆地南部油更丰富的原因之一(图11)。

4 从热演化程度及热演化史看油气勘探方向

鄂尔多斯盆地为大型叠合盆地,不同时代盆地的叠合在纵向上形成了多套烃源岩^[37],不同时代盆地由于后期的叠置,多套烃源岩达到最高热演化程度及大规模生烃成藏时期主要为中生代晚期的早白垩世^[3-5,8]。从前面论述可知盆地油气分布主要受烃源岩、热演化程度及储层控制。因此本文从烃源岩发育层系及热演化程度角度分析认为今后油气勘探需要重视以下方向。

4.1 长7段致密油、页岩油勘探潜力巨大,是石油勘探的重要接替领域

鄂尔多斯盆地延长组致密油剩余资源量为 34.90×10^8 t,页岩油剩余资源量为 59.49×10^8 t^[1],资源丰富,勘探潜力大。盆地南部深湖区长7段烃源岩分布面积大,厚度大,热演化程度高,处于高峰生油阶段,是致密油、页岩油今后主要勘探区(图11)^[38]。特别是随着油气勘探开发技术的进步,长7段页岩油勘

① 任战利,李浩,陈西洋,等.陕北斜坡东部古生界烃源岩评价[R].陕西:陕西延长石油(集团)有限责任公司,2013.

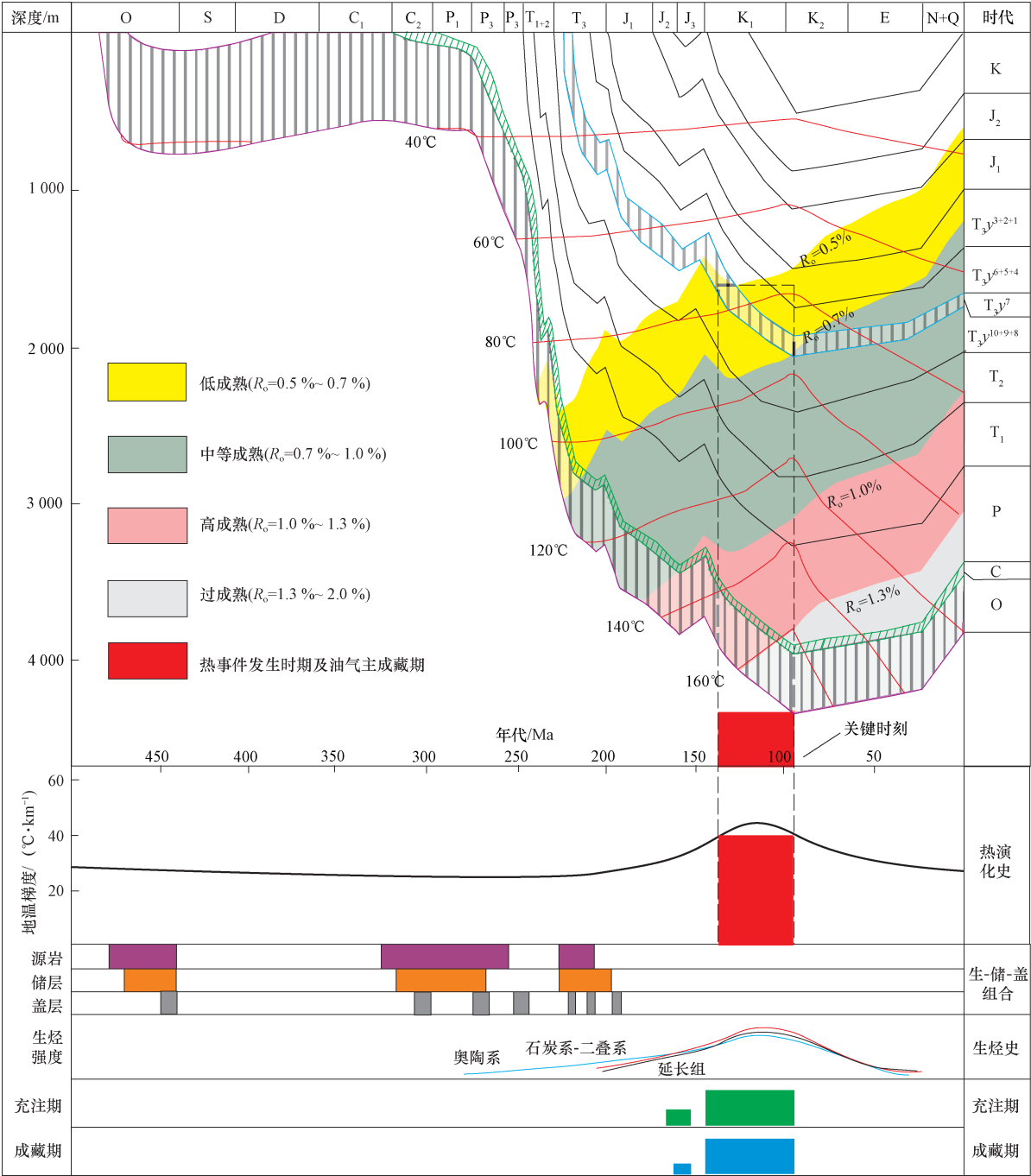


图 9 鄂尔多斯盆地油气成藏时期与热事件对应关系

Fig. 9 Corresponding relationship between hydrocarbon accumulation periods and thermal events in the Ordos Basin

探开发具有巨大潜力^[39],是石油勘探的重要接替领域。长 7 段页岩有机质热成熟度对气油比有重要控制作用,影响着页岩油资源的可采性,值得进一步研究。长 7³ 亚段是烃源岩最发育层段,更为致密,砂岩不发育,页岩油需要继续攻关,盆地南部长 7³ 亚段热演化程度高,气油比高,长 7 段黑色页岩发育区是实现页岩油转化的有利区,页岩油原位转化是未来努力的方向。

4.2 上古生界石炭系 - 二叠系煤系地层天然气勘探前景广阔

上古生界石炭系 - 二叠系煤系烃源岩广泛分布,东北厚西南薄,热演化程度南高北低,是大气田形成的物质基础。煤系烃源岩的分布、热演化程度及储层控制了天然气藏的分布,天然气分布具有全盆广泛分布的特点(图 10)。盆地南部煤层较薄但热演化程度高,

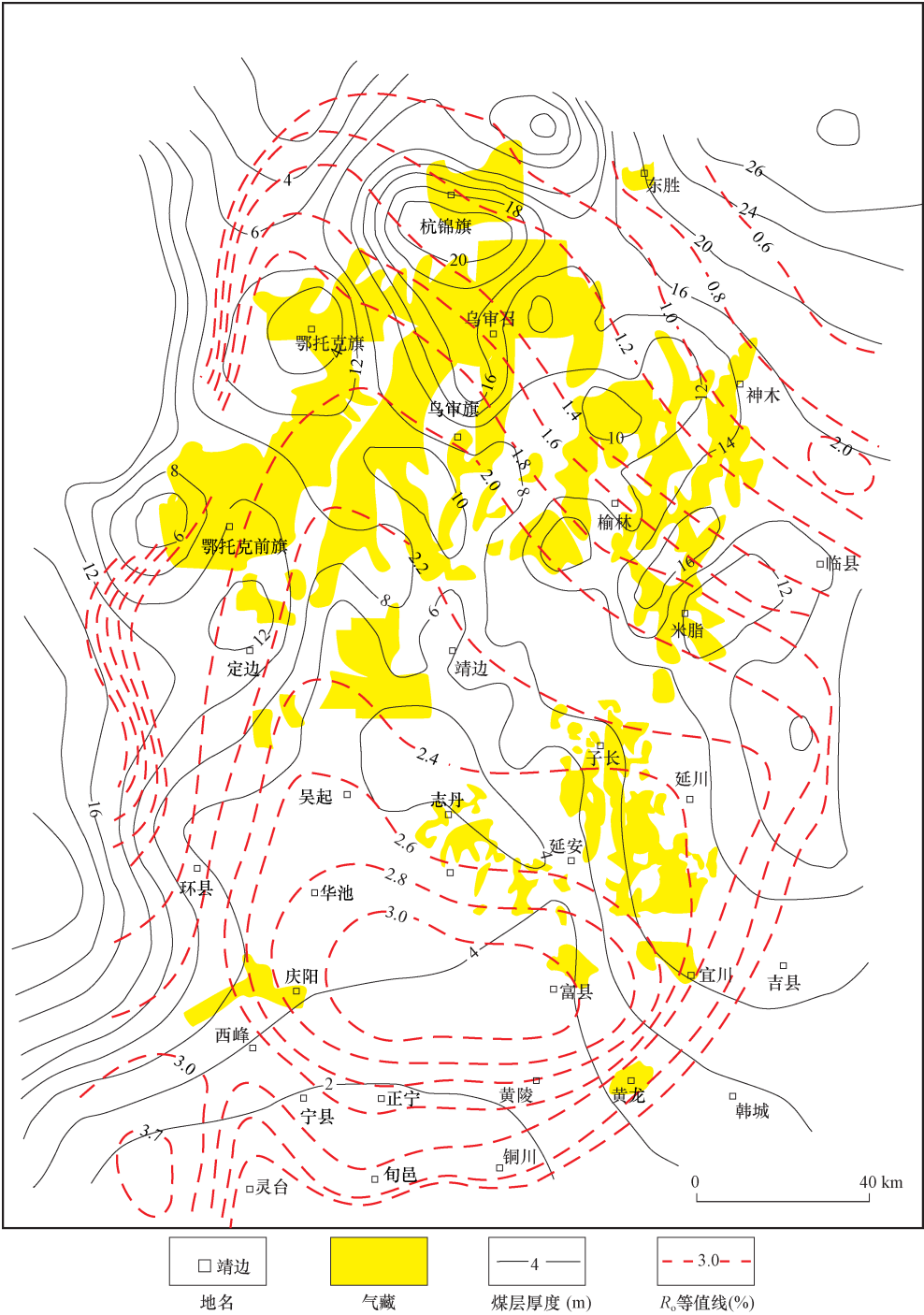


图 10 鄂尔多斯盆地上古生界石炭系 - 二叠系煤层厚度、热演化程度与气田分布关系
Fig. 10 Relationship between the coal thickness, thermal maturity and gas field distribution of the Upper Paleozoic, Ordos Basin

可明显的增加生烃量,煤层虽薄但热演化程度高可在某种程度弥补厚度的不足。石炭系 - 二叠系煤系烃源岩全盆地分布,具有雄厚的天然气资源基础,天然气勘探具有良好的前景。盆地北部神木 - 米脂地区及盆地南部陇东、宜川 - 黄龙勘探新区具有良好的勘探潜力,已获勘探突破就是例证^[31]。

4.3 深层下古生界碳酸盐岩层系具有形成大气田的条件

下古生界碳酸盐岩层系发育,其中寒武系张夏组、奥陶系烃源岩较好,烃源岩热演化程度高,盆地南部镜质体反射率已达 3.00% 以上。马家沟期中央古隆起

烃源岩,有机质丰度较高^[41-44],在盆地周缘区崇信蕨县系也发现有一定规模沥青,说明中-新元古界有生油及聚集过程。但在盆地内部发现的长城系烃源岩厚度小,有机质丰度低,缺乏规模烃源岩的发现,需要进一步研究确定规模烃源岩分布及生烃潜力。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地热岩石圈厚度恢复表明中生代晚期早白垩世构造热事件具有深部软流圈上涌,热岩石圈减薄的动力学背景。不同层位烃源岩在盆地中南部热演化程度高,热流值及地温梯度高,热异常明显,盆地中南部岩石圈厚度在早白垩世明显减薄。

2) 烃源岩热模拟实验及盆地热动力演化史研究揭示早白垩世热事件及热异常明显地提高了不同层位烃源岩的热演化程度,使不同层位烃源岩生烃量明显增加。以长7段黑色页岩为例计算的因于热异常多而增加的生烃量就达 $23.52 \times 10^8 \sim 164.64 \times 10^8$ t。热事件及热异常是鄂尔多斯盆地油气富集的重要原因之一。

3) 早白垩世深部岩石圈减薄热动力学过程控制了不同层位烃源岩在早白垩世达到最高热演化程度,并发生大规模生油、生气与成藏。古生界、中生界不同层位油气田分布主要受烃源岩分布、热演化程度及储层控制。

4) 从烃源岩发育层位及热演化程度来看,盆地中南部长7段烃源岩热演化程度较高,分布面积广,致密油、页岩油勘探潜力巨大,是石油勘探的重要接替领域;石炭系-二叠系煤系烃源岩全盆地分布,热演化程度高,处于生气阶段,天然气勘探前景广阔;深层下古生界碳酸盐岩层系具有形成大气田条件,需要进一步明确烃源岩生烃潜力;深层中-新元古界值得进一步勘探,关键是明确规模烃源岩的分布及生烃潜力。

参 考 文 献

- [1] 胡素云,李建忠,王铜山,等. 中国石油油气资源潜力分析与勘探选区思考[J]. 石油实验地质,2020,42(5):813-823.
Hu Suyun, Li Jianzhong, Wang Tongshan, et al. CNPC oil and gas resource potential and exploration target selection[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 813-823.
- [2] 付金华,李士祥,牛小兵,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发,2020,47(5):870-883.
Fu Jinhua, Li Shixiang, Niu Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 870-883.
- [3] 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,1996,17(1):17-24.
Ren Zhanli. Research on the relations between geothermal history and oil-gas accumulation in the Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(1): 17-24.
- [4] 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(S1):23-32.
Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos Basin[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2007, 50(S1): 27-38.
- [5] 任战利,于强,崔军平,等. 鄂尔多斯盆地热演化史及其对油气的控制作用[J]. 地学前缘,2017,24(3):137-148.
Ren Zhanli, Yu Qiang, Cui Junping, et al. Thermal history and its controls on oil and gas of the Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 137-148.
- [6] 付金华,魏新善,任军峰. 伊陕斜坡上古生界大面积岩性气藏分布与成因[J]. 石油勘探与开发,2008,35(6):664-667+691.
Fu Jinhua, Wei Xinshan, Ren Junfeng. Distribution and genesis of large-scale Upper Palaeozoic lithologic gas reservoirs on Yi-Shaan Slope[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(6): 664-691.
- [7] 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.
- [8] 任战利,祁凯,刘润川,等. 鄂尔多斯盆地早白垩世构造热事件形成动力学背景及其对油气等多种矿产成藏(矿)期的控制作用[J]. 岩石学报,2020,36(4):1213-1234.
Ren Zhanli, Qi Kai, Liu Runchuan, et al. Cretaceous tectonic thermal events and its control on various mineral accumulations such as oil and gas in the Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(4): 1213-1234.
- [9] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
Yang Junjie. Tectonic evolution and hydrocarbon distribution of Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [10] 赵重远,刘池洋. 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存[M]. 西安:西北大学出版社,1990.
Zhao Zhongyuan, Liu Chiyang. Formation and evolution of the North China Craton sedimentary basin and its hydrocarbon occurrence[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990.
- [11] 任战利,田涛,李进步,等. 沉积盆地热演化史研究方法 with 叠合盆地热演化史恢复研究进展[J]. 地球科学与环境学报,2014,36(3):1-21.
Ren Zhanli, Tian Tao, Li Jinbu, et al. Review on methods of thermal evolution history in sedimentary basins and thermal evolution history reconstruction of superimposed basins[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(3): 1-21.
- [12] 任战利,张盛,高胜利,等. 鄂尔多斯盆地热演化程度异常分布区

- 及形成时期探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 674-684.
- Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Research on region of maturation anomaly and formation time in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 674-684.
- [13] 黄方, 何丽娟, 吴庆举. 鄂尔多斯盆地深部热结构特征及其对华北克拉通破坏的启示[J]. 地球物理学报, 2015, 58(10): 3671-3686.
- Huang Fang, He Lijuan, Wu Qingju. Lithospheric thermal structure of the Ordos Basin and its implications to destruction of the North China Craton[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(10): 3671-3686.
- [14] 陈凌, 危自根, 程骋. 从华北克拉通中、西部结构的区域差异性探讨克拉通破坏[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 212-228.
- Chen Ling, Wei Zigen, Cheng Chi. Significant structural variations in the Central and Western North China craton and its implications for the craton destruction[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 212-228.
- [15] 任战利, 赵重远, 张军, 等. 鄂尔多斯盆地古地温研究[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 56-65.
- Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan, Zhang Jun, et al. Research on paleo temperature in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 56-65.
- [16] 任战利. 利用磷灰石裂变径迹法研究鄂尔多斯盆地地热史[J]. 地球物理学报, 1995, 38(37): 339-349.
- Ren Zhanli. Application of apatite fission-track analysis method to the study of thermal history of the Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(2): 235-247.
- [17] 任战利, 崔军平, 郭科, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析[J]. 科学通报, 2015, 60(14): 1298-1308.
- Ren Zhanli, Cui Junping, Guo Ke, et al. Thermal history of Ordos Basin assessed by apatite fission track analysis[J]. Science Bulletin, 2015, 60(14): 1298-1308.
- [18] 任战利, 崔军平, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起奥陶系构造热演化史恢复[J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2044-2056.
- Ren Zhanli, Cui Junping, Li Jinbu, et al. Tectonic-thermal history reconstruction of Ordovician in the Weibei uplift of Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(11): 2044-2056.
- [19] 张文正, 杨华, 李剑锋, 等. 论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用-强生排烃特征及机理分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(3): 289-293.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Li Jianfeng, et al. Leading effect of high-class source rock of Chang 7 in Ordos Basin on enrichment of low permeability oil-gas accumulation-Hydrocarbon generation and expulsion mechanism[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(3): 289-293.
- [20] 王强, 彭平安, 张文正, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段页岩全组分定量生烃模拟及原油可动性评价[J]. 石油学报, 2018, 39(5): 541-553.
- Wang Qiang, Peng Pingan, Zhang Wenzheng, et al. Quantitative full-component hydrocarbon-generating simulation and crude oil mobility evaluation of shale in 7th member of Yanchang formation, Ordos basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 541-553.
- [21] 齐玉林, 张枝焕, 夏东领, 等. 鄂尔多斯盆地南部长7暗色泥岩与黑色页岩生烃动力学特征对比分析[J]. 现代地质, 2019, 33(4): 863-871.
- Qi Yulin, Zhang Zhihuan, Xia Dongling, et al. Comparative analysis of hydrocarbon generation kinetics of dark shale and black shale of Chang 7 in Southern Ordos Basin[J]. Geoscience, 2019, 33(4): 863-871.
- [22] 李剑锋, 徐正球, 马军, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界奥陶系碳酸盐岩生烃能力研究[J]. 沉积学报, 2003, 40(4): 702-706.
- Li Jianfeng, Xu Zhengqiu, Ma Jun, et al. Study on hydrocarbon-producing potential of carbonate rocks in Ordovician of Lower Paleozoic in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 40(4): 702-706.
- [23] 孔庆芬, 张文正, 李剑锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系烃源岩生烃能力评价[J]. 天然气工业, 2007, 26(12): 62-64+165.
- Kong Qingfen, Zhang Wenzheng, Li Jianfeng, et al. Evaluation of hydrocarbon generation potential of Ordovician source rocks on the western margin of Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2007, 26(12): 62-64+165.
- [24] 张文正, 徐正球. 低阶煤热演化生烃的模拟试验研究[J]. 天然气工业, 1986, 5(2): 1-7.
- Zhang Wenzheng, Xu Zhengqiu. Modeling experimental research of hydrocarbon generation from thermal evolution of low Grade Coal[J]. Natural Gas Industry, 1986, 5(2): 1-7.
- [25] 李浩. 鄂尔多斯盆地中部上古生界烃源岩研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- Li Hao. Research of source rocks in Upper Paleozoic, central Ordos basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [26] 杨华, 李士祥, 刘显阳. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 1-11.
- Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.
- [27] 金霄. 鄂尔多斯盆地和川西坳陷上三叠统烃源岩生烃模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2013.
- Jin Xiao. Simulation Study on Hydrocarbon Generation of Upper Triassic Source Rocks in Ordos Basin and Western Sichuan Depression[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2013.
- [28] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 22-30.
- Ren Zhanli, Cui Junping, Qi Kai, et al. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 22-30.
- [29] 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 & Gas Geology, 2008, 29(4): 502-506.
- [30] 任战利, 李文厚, 梁宇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 190-198.
- Ren Zhanli, Li Wenhui, Liang Yu, et al. Conditions and main control-

- ling factors of oil accumulation in Yanchang Formation of southeastern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (2): 190–198.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 何发岐, 王付斌, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J]. 中国石油勘探, 2020, 25 (6): 39–49.
- He Faqi, Wang Fubin, Zhang Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (6): 39–49.
- [34] 付金华, 魏新善, 罗顺社, 等. 庆阳深层煤成气大气田发现与地质认识[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46 (6): 1047–1061.
- Fu Jinhua, Wei Xinshan, Luo Shunshu, et al. Discovery and geological knowledge of the large deep coal-formed Qingyang Gas Field, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (6): 1047–1061.
- [35] 王香增. 延长探区天然气勘探重大突破及启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (1): 1–9.
- Wang Xiangzeng. Major breakthrough of gas exploration in yangchang blocks and its significance [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (1): 1–9.
- [36] 李浩, 任战利, 高海仁, 等. 延长气田上古生界烃源岩评价及生排烃特征[J]. 天然气工业, 2015, 35 (4): 33–39.
- Li Hao, Ren Zhanli, Gao Hairen, et al. Evaluation and hydrocarbon generation-expulsion characteristics of source rocks in upper paleozoic in the Yanchang gas field, Ordos basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35 (4): 33–39.
- [37] 杨华, 席胜利, 魏新善, 等. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J]. 中国石油勘探, 2006, 11 (1): 17–24.
- Yang Hua, Xi Shengli, Wei Xinshan, et al. Evolution and natural gas enrichment of multicycle superimposed basin in Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11 (1): 17–24.
- [38] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24 (5): 601–614.
- Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, et al. Breakthrough of risk exploration of class II shale oil in chang 7 member of yanchangformation in the Ordos Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24 (5): 601–614.
- [39] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47 (1): 1–10.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47 (1): 1–10.
- [40] 郭科. 鄂尔多斯地块西缘中晚元古代沉积特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- Guo Ke. Study of sedimentary characteristics of middle-late proterozoic in west margin of Ordos block [D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [41] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 中国元古界—寒武系油气地质条件与勘探地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45 (1): 1–13.
- Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Petroleum geological conditions and exploration importance of proterozoic to cambrian in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (1): 1–13.
- [42] 杜金虎, 李相博, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界一下古生界天然气成藏地质条件及勘探新领域[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46 (5): 820–835.
- Du Jinhua, Li Xiangbo, Bao Hongping, et al. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the mesoproterozoic to lower paleozoic of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (5): 820–835.
- [43] 马骞. 鄂尔多斯盆地西南缘构造演化与中上元古界成藏条件[D]. 西安: 西北大学, 2020.
- Ma Qian. Tectonicevolution and middle-upper proterozoicpetroleum geological setting in south-western Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [44] 屈红军, 蒲仁海, 等. 相—势耦合控制鄂尔多斯盆地中生界石油聚集[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40 (4): 752–762.
- Qu Hongjun, Pu Renhai, Chen Shuo, et al. Controls of facies-potential coupling on oil accumulation in the Mesozoic Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40 (4): 752–762.

(编辑 张亚雄)