

鄂尔多斯盆地中元古界烃源岩热演化史模拟

田刚, 宋立军

(西安石油大学 地球科学与工程学院, 西安 710065)

摘要:鄂尔多斯盆地中元古界是中国石油长庆油田天然气增储上产的潜在层系, 然而长期以来对其内烃源岩热演化史一直缺乏深入研究。以 PetroMod 盆地模拟软件为工具, 在对区内各构造单元岩性、剥蚀厚度、古大地热流值等模拟参数分析的基础上, 以实测镜质体反射率(R_o)作为约束, 对区内各构造单元中元古界进行热史模拟, 分析不同构造单元烃源岩热演化的差异性, 并结合含油气系统分析, 对有利的勘探区进行了预测。结果表明: (1) 盆地中元古代拗拉槽及周缘中元古界烃源岩进入生烃门限时间明显较早; 除西缘冲断带中北部之外, 其他拗拉槽及周缘处烃源岩各阶段成熟时间也早于其他地区, 现今处于生干气阶段; 除伊盟隆起地区长城系烃源岩成熟期次都较晚、现今仍处于生湿气阶段外, 其他地区基本上于晚二叠世晚期进入生烃门限, 现今处于生干气阶段; 蓟县系烃源岩于晚二叠世晚期—中三叠世早期先后进入生烃门限, 随后受盆地沉积中心不断向西迁移和天环向斜北部、渭北隆起西部早白垩世岩浆岩的侵入影响, 烃源岩成熟加快, 早白垩世先后进入生干气阶段。(2) 渭北隆起中部、天环向斜南部、伊陕斜坡西北部、伊盟隆起中部为有利勘探区, 是下一步开展研究的重点区域。

关键词: 热史模拟; 镜质体反射率; 生烃门限; 有利勘探区; 中元古界; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Thermal evolution modeling of Mesoproterozoic source rocks in the Ordos Basin

Tian Gang, Song Lijun

(Geosciences and Engineering Faculty, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: The Mesoproterozoic is a potential stratum of gas accumulation and production of the Changqing oil field in the Ordos Basin. However, few recent studies have been made on the thermal evolution history of source rocks. Applying the PetroMod basin modeling software, the thermal evolution histories of the Proterozoic source rocks in each tectonic unit of the study area were simulated taking measured R_o values as calibration and based on the analyses of lithology, erosion thickness restoration and ancient heat flow. The differences of thermal evolution of source rocks in different tectonic units were discussed. Some favorable exploration areas were predicted combining with oil and gas system analyses. The results show that: (1) The hydrocarbon generation threshold of Mesoproterozoic aulacogens and peripheral source rocks is much earlier than others. The maturation stage of other aulacogens and peripheral source rocks is also earlier than others except for the mid-northern part of the western margin thrust belt, and it is in a stage of dry gas generation at present. The source rocks in the Changcheng System reached the hydrocarbon generation threshold at the end of the Late Permian and are generating dry gas now, except for those in the Yimeng uplift, which became mature late and are still generating wet gas. The source rocks in the Jixian System reached the hydrocarbon generation threshold from the end of the Late Permian to the beginning of the Middle Triassic, became mature as the basin depositional center migrated continuously to the west and influenced by intrusions in the northern Tianhuan syncline and western Weibei uplift, and finally entered the dry gas stage in the early Cretaceous. (2) The central area of the Weibei uplift, southern Tianhuan syncline, northwestern Yishan slope, and the central part of the Yimeng uplift in the Ordos Basin are favorable exploration areas.

Key words: thermal history simulation; vitrinite reflectance; hydrocarbon generation threshold; favorable exploration zone; Mesoproterozoic; Ordos Basin

收稿日期: 2016-12-23; 修订日期: 2017-05-03。

作者简介: 田刚(1991—), 男, 硕士, 从事含油气盆地分析研究。E-mail: 691561570@qq.com。

通信作者: 宋立军(1977—), 男, 副教授, 从事盆地分析及构造地质教学与研究。E-mail: 8210954@qq.com。

基金项目: 构造地质与油气资源教育部重点实验室基金项目(TRR-2012-20)资助。

近年来,随着在鄂尔多斯周缘甘肃平凉、华亭和崇信等地露头处蓟县系古油藏沥青^[1]、苏峪口长城系(有机碳含量达3.00%)^[2]和甘陕裂陷槽(桃59井有机碳含量为0.21%~5.50%)^[3]优质烃源岩,以及伊盟隆起杭锦旗地区锦13井和锦3井中元古界天然气的发现^[4],表明鄂尔多斯盆地中新元古界具有油气形成的条件,也表明该地区中元古界可能成为未来天然气勘探的新领域。但时至今日,鄂尔多斯盆地中元古界烃源岩热演化程度、过程及其与油气的关系尚不明确,严重制约了油气资源评价和勘探。本次研究选用PetroMod盆地模拟软件,在恢复盆地埋藏史的基础上,采用EASY%*R*_o模型^[5-6],分析不同构造单元中元古界烃源岩成熟度演化的历史,预测有利勘探区,以期为该地区油气勘探及分析油气成藏条件提供参考。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部,为一典型的克拉通边缘叠合盆地;可划分为伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、伊陕斜坡、天环向斜、西缘冲断带等6个一级构造单元(图1);经历了吕梁、晋宁、

加里东、海西、印支、燕山及喜马拉雅等多期构造运动旋回演化^[7-8]。

中元古代早期,鄂尔多斯盆地结晶基底破裂,在盆地北缘地区形成兴蒙大洋裂谷,南缘形成秦祁大洋裂谷,西南部相继形成晋陕、晋豫陕拗拉槽,其内沉积了巨厚的长城系滨海相碎屑岩。蓟县纪,盆内裂谷先后进入拗陷阶段,区域沉积了蓟县系浅海陆棚相碳酸盐岩^[9]。青白口纪,鄂尔多斯盆地整体抬升,整体处于隆起剥蚀状态,区域缺失青白口系。震旦纪,受泛大陆解体的影响,盆地西南部裂陷,发育了以冰川碎屑为主的震旦系。鄂尔多斯盆地中元古代整体为一向西南倾斜的大型台缘斜坡;之后盆地先后经历了早古生代差异升降、晚古生代碰撞边缘、中生代内陆拗陷和新生代周缘断陷等演化阶段,依次沉积了下古生界浅海相碳酸盐岩、上古生界滨海平原相碎屑岩、中生界内陆湖泊相碎屑岩、新生界风成黄土相碎屑岩,形成了现今盆地东高、西陡东缓和北高南低的地貌。

中新元古界分布在鄂尔多斯西部和南部,东北部缺失,整体具有自西南向东北逐渐减薄的趋势^[10];受早期陆内裂谷影响,不同沉积区厚度变化明显,沿北东方向呈明显的隆拗相间分布格局。中元古界作为鄂尔多斯盆地第一套沉积盖层,上覆于吕梁期结晶基底之上,主体部位被寒武系碎屑岩覆盖,部分地区与上古生界煤系地层直接接触。

2 热演化史模拟方法

沉积盆地热演化史重建一般有3种方法:地球化学法、地球热力学法和综合法,其中综合法相对合理^[11]。根据不同演化阶段的地质背景,结合热演化史模拟,对旬探1井、天深1井热流值进行了计算,并以现今实测*R*_o作为标定值(图2)得出:中新元古代大地热流值为59~63 mW/m²,早古生代为58~62 mW/m²,晚古生代石炭—二叠纪为60~64 mW/m²,中生代三叠纪为65~68 mW/m²,侏罗纪—早白垩世晚期为75~92 mW/m²,现今为62.67 mW/m²;获得的热流值演化趋势与地温梯度演化趋势一致^[12-16],即早古生代地温梯度为24~26 °C/km,晚古生代为22~24 °C/km,早白垩世晚期为38~43 °C/km,现今为29 °C/km。

3 模型参数分析

3.1 岩性特征

地层岩性组成及其参数的正确选取,是合理进行地层压实校正和客观恢复沉降埋藏史的关键。

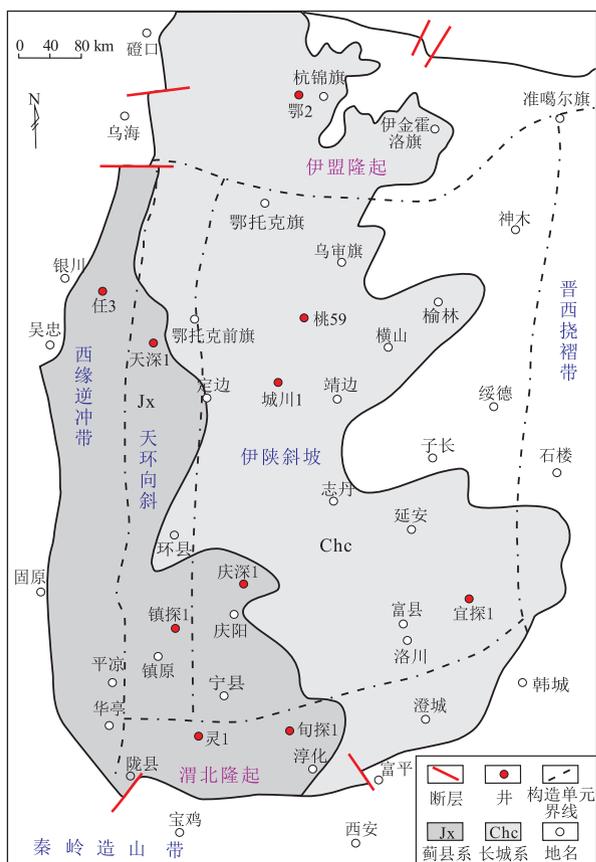


图1 鄂尔多斯盆地中元古界分布

Fig.1 Distribution of the Mesoproterozoic in the Ordos Basin

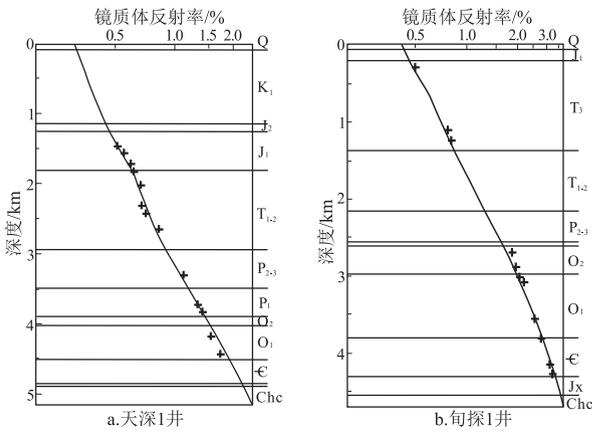


图 2 鄂尔多斯盆地镜质体反射率与模拟结果对比

Fig.2 Comparison between modeled and tested R_o values in the Ordos Basin

研究中利用典型井测井曲线和分层厚度资料,计算了各地层的岩性及其含量百分比。混合岩性则通过 PetroMod 软件岩性混合器将多种标准岩性按不同的比例混合得到,而混合岩性的压实系数、初始孔隙度、热导率等数据则依据系统默认。

3.2 剥蚀厚度

鄂尔多斯盆地在地质历史时期经历了多期构造运动,其中三叠纪末期、中侏罗世、侏罗纪末期和早白垩世末期发生了 4 次抬升剥蚀事件,前三期的抬升剥蚀量微弱,以白垩纪时期剥蚀较为强烈。参考前人^[17-21]关于鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀厚度估算成果,确定热参数,以实测镜质体反射率(R_o)作为约束,反演计算、综合确定各井剥蚀量(表 1)。

3.3 边界条件参数分析

合理预测古水深可以提高地层埋藏史和地温场的模拟精度^[22]。鄂尔多斯盆地各时期的古水深主要依据该时期的沉积相和现代沉积水深综合预测,建立古水深与沉积相的对应标准(表 2)。

表 1 鄂尔多斯盆地钻井剥蚀量
Table 1 Erosion thickness in wells in the Ordos Basin /m

| 井名 | 晚三叠世末 | 早侏罗世末 | 晚侏罗世末 | 早白垩世末 |
|--------|-------|-------|-------|-------|
| 镇探 1 井 | 320 | 150 | 170 | 550 |
| 天深 1 井 | 170 | 80 | 130 | 600 |
| 宜探 1 井 | 80 | 170 | 170 | 1 750 |
| 城川 1 井 | 80 | 120 | 160 | 900 |
| 庆深 1 井 | 150 | 170 | 190 | 670 |
| 旬探 1 井 | 250 | 250 | 150 | 1 200 |
| 灵 1 井 | 360 | 190 | 100 | 620 |
| 任 3 井 | 200 | 60 | 80 | 700 |
| 克 1 井 | 250 | 50 | 80 | 550 |
| 鄂 2 井 | 160 | 110 | 120 | 800 |

表 2 鄂尔多斯盆地各时期古水深

Table 2 Paleo water depth of the Ordos Basin

| 年代地层 | 沉积相 | 古水深/m |
|-------------------|------|--------|
| K ₂ -Q | 风成黄土 | 0 |
| T-K ₂ | 内陆湖泊 | 0~20 |
| C ₂ -P | 滨海平原 | 0~50 |
| Є-O | 浅海台地 | 50~200 |
| Z | 滨海台地 | 0~50 |
| Jx | 浅海台地 | 50~200 |
| Chc | 滨海台地 | 0~50 |

利用 PetroMod 软件中以时间和纬度为坐标的全球平均地表温度模板(SWIT),结合鄂尔多斯盆地古今区域地理位置(东亚地区北纬 35°~44°),综合预测了鄂尔多斯盆地古地表温度,中元古代长城纪为 23.48 °C、蓟县纪为 21.48 °C,震旦纪为 23.48 °C,寒武—奥陶纪为 21.48 °C,石炭纪为 20.99 °C,二叠纪为 17.09 °C,三叠纪为 20.27 °C,侏罗纪为 18.82 °C,白垩纪为 24.30 °C,第四纪为 14.05 °C。

3.4 烃源岩成熟度模型选取和评价标准

由于 EASY% R_o 模型对中、高演化程度地层的模拟较为客观与精确^[23-24],因此本次采用众多平行的化学动力学一级反应模型——EASY% R_o 模型对有机质成熟度史进行了模拟。本次模拟采用的有机质成熟度划分标准是: R_o 小于 0.5%为未成熟阶段,0.5%~0.7%为低成熟阶段,0.7%~1.0%为成熟阶段,1.0%~1.3%为晚成熟阶段,1.3%~2.0%为生湿气阶段,2.0%~4.0%为生干气阶段,4.0%~5.0%为过成熟阶段。

4 模拟结果分析

通过确认上述参数的可行性,以 PetroMod 软件为工具,分别对天环向斜南部镇探 1 井、天环向斜北部天深 1 井、伊陕斜坡中部城川 1 井、伊陕斜坡西南部庆深 1 井、伊陕斜坡东部宜探 1 井、渭北隆起中部旬探 1 井、渭北隆起西部灵 1 井、西缘冲断带中北部任 3 井、伊盟隆起中部鄂 2 井等 9 口单井(图 1)进行中元古界烃源岩热史模拟。以天环向斜为例:

(1)镇探 1 井代表天环向斜南部,该井模拟结果(图 3)表明:该井蓟县系烃源岩在中三叠世早期 R_o 值达到 0.5%,进入生烃门限;晚三叠世中期达到 0.7%,进入成熟阶段;早侏罗世中期达到 1.0%,进入晚成熟阶段;晚侏罗世晚期达到 1.3%,进入生湿气阶段;早白垩世晚期达到 2.0%,进入生干气阶段。

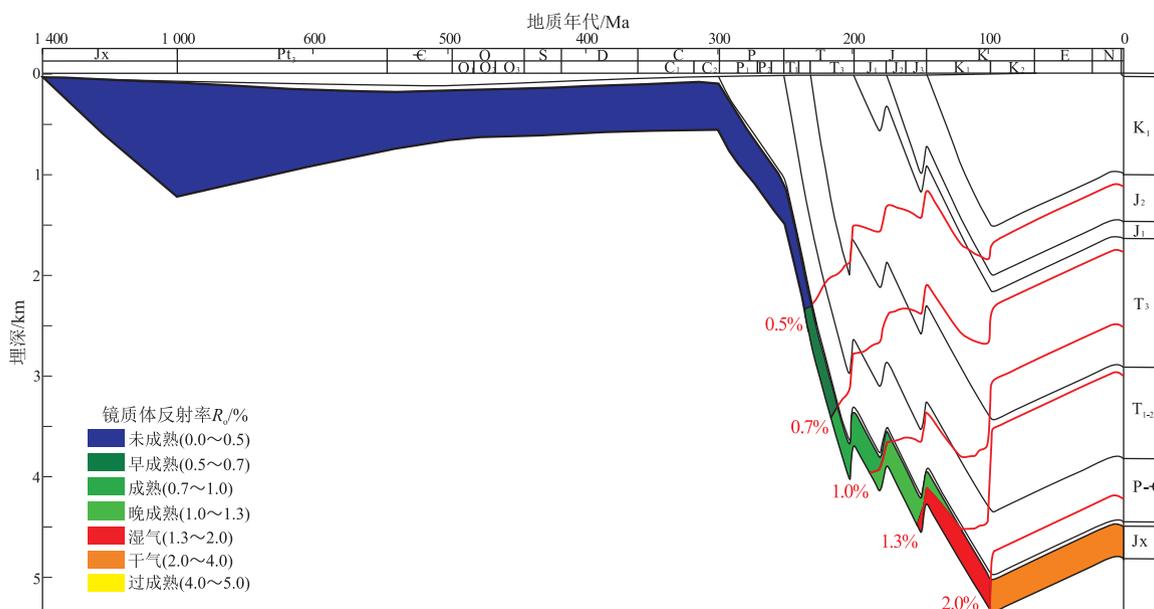


图3 鄂尔多斯盆地天环向斜镇探1井中元古界烃源岩有机质成熟度史

Fig.3 Maturity history of source rocks in the Mesoproterozoic in ZT1 well, Tianhuan syncline, Ordos Basin

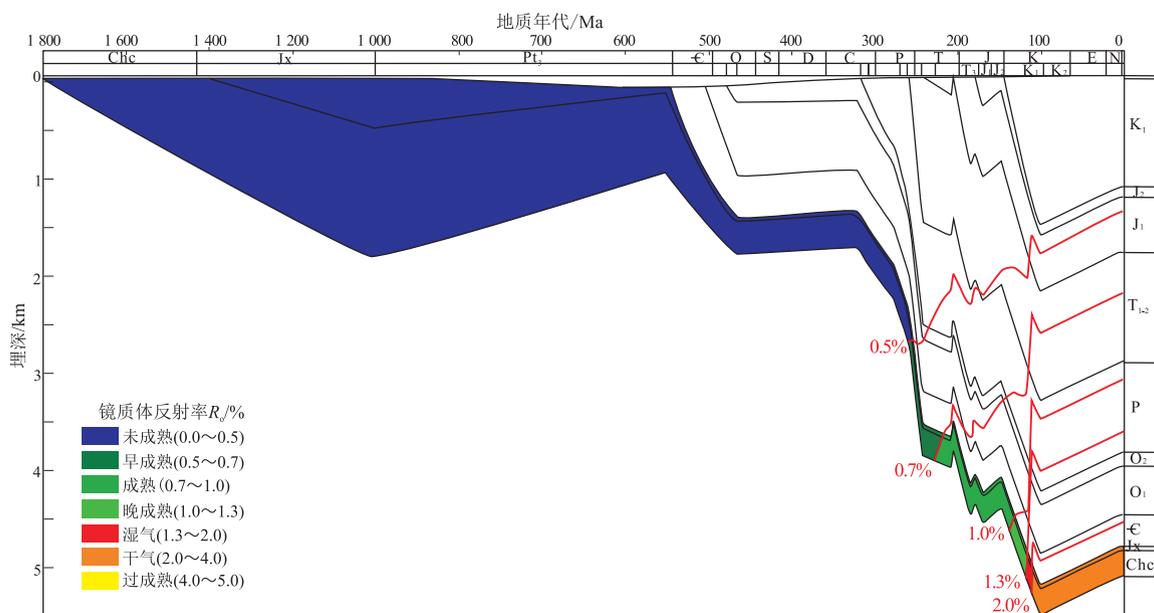


图4 鄂尔多斯盆地天环向斜天深1井中元古界烃源岩有机质成熟度史

Fig.4 Maturity history of source rocks in the Mesoproterozoic in TS1 well, Tianhuan syncline, Ordos Basin

(2)天深1井代表天环向斜北部,该井模拟结果(图4)表明:该井蓟县系烃源岩在早三叠世中期 R_0 值达到0.5%,进入生烃门限;晚三叠世晚期达到0.7%,进入成熟阶段;早白垩世早期达到1.0%,进入晚成熟阶段;早白垩世中期达到1.3%,进入生湿气阶段;随后过了3~4 Ma,达到2.0%,进入生干气阶段。长城系烃源岩于晚二叠世晚期 R_0 值达到0.5%,进入生烃门限;晚三叠世早期进入主生烃窗;晚侏罗世中期进入晚成熟阶段;早白垩世早期进入生湿气阶段;随后过了3~4 Ma,进入生干气阶

段;现今 R_0 值为2.6%,仍处于生干气阶段。

晚白垩世,鄂尔多斯盆地地层整体抬升,遭受剥蚀,蓟县系烃源岩成熟度变化不大,现今北部 R_0 值最大为2.4%,现今南部 R_0 值最大为2.7%,都处于生干气演化阶段。

5 讨论

对上述9口单井烃源岩成熟度演化史模拟结果统计分析(表3,4)发现,各构造单元蓟县系和长城系烃源岩进入各阶段门限的时间存在差异。

表 3 鄂尔多斯盆地各构造单元蓟县系烃源岩成熟度史对比

Table 3 Maturity history of Jixian source rocks in different tectonic units of the Ordos Basin

| 构造单元 | 成熟度时期 | | | | |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 生烃门限 | 成熟门限 | 晚成熟门限 | 湿气门限 | 干气门限 |
| 天环向斜南部 | T ₂ ¹ | T ₃ ² | J ₁ ² | J ₃ ³ | K ₁ ³ |
| 天环向斜北部 | T ₁ ² | T ₃ ³ | K ₁ ¹ | K ₁ ² | K ₁ ² |
| 伊陕斜坡西南部 | T ₁ ³ | T ₁ ³ | J ₁ ¹ | J ₂ ³ | K ₁ ² |
| 渭北隆起中部 | O ₁ ² | P ₃ ³ | T ₃ ¹ | T ₃ ³ | K ₁ ¹ |
| 渭北隆起西部 | P ₃ ³ | T ₃ ² | J ₁ ³ | K ₁ ¹ | K ₁ ² |
| 西缘冲断带中北部 | O ₂ ² | P ₃ ³ | K ₁ ¹ | K ₁ ² | 无 |

表 4 鄂尔多斯盆地各构造单元长城系烃源岩成熟度史对比

Table 4 Maturity history of Changcheng source rocks in different tectonic units of the Ordos Basin

| 构造单元 | 成熟度时期 | | | | |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | 生烃门限 | 成熟门限 | 晚成熟门限 | 湿气门限 | 干气门限 |
| 天环向斜北部 | P ₃ ³ | T ₁ ³ | J ₃ ² | K ₁ ¹ | K ₁ ² |
| 伊陕斜坡东部 | P ₃ ³ | T ₁ ² | T ₃ ² | J ₁ ¹ | K ₁ ¹ |
| 伊陕斜坡西南部 | P ₃ ³ | T ₂ ³ | T ₃ ³ | J ₂ ¹ | K ₁ ¹ |
| 伊陕斜坡中部 | P ₂ ¹ | T ₁ ¹ | T ₃ ³ | J ₂ ² | K ₁ ² |
| 渭北隆起中部 | O ₁ ¹ | P ₃ ³ | J ₁ ³ | T ₃ ³ | J ₃ ³ |
| 伊盟隆起中部 | T ₃ ¹ | J ₁ ¹ | K ₁ ¹ | K ₁ ² | 无 |

(1) 西缘冲断带中北部和渭北隆起中部蓟县系烃源岩进入生烃门限较早,分别于中奥陶世中期和早奥陶世中期开始生油。由于这 2 个地区分别位于甘陕裂陷槽和晋陕裂陷槽周缘,寒武系沉积较厚,致使两区在早奥陶世先后进入生烃门限。其他地区由于寒武纪和早中奥陶世埋藏浅,未进入生烃门限。晚奥陶世,由于盆地碰撞抬升,遭受剥蚀,缺失志留系—下石炭统,以致它们进入生烃门限的时间明显晚于这 2 个地区。现今除西缘冲断带中北部受晚三叠世—早白垩世逆冲隆升的影响而处于生湿气阶段外,其他地区蓟县系烃源岩都处于生干气阶段。

(2) 渭北隆起西部蓟县系烃源岩于晚二叠世晚期进入生烃门限,其次是天环向斜北部于早三叠世中期进入生烃门限。由于伊陕斜坡西南部和天环向斜南部位于庆阳古隆起之上,2 个地区进入生烃门限时间明显晚于前面提到的两者。

(3) 西缘断褶带的中北部和渭北隆起中部蓟县系烃源岩都于晚二叠世晚期进入成熟阶段。受盆地沉积中心不断向西迁移影响,渭北隆起西部、天环向斜北部、伊陕斜坡西南部、天环向斜南部先后进入生烃阶段,而伊陕斜坡西南部、渭北隆起西部、天环向斜南部、天环向斜北部依次进入生油成

熟门限。

(4) 晚三叠世盆地西、南缘强烈逆冲隆升,以致西缘冲断带中北部蓟县系烃源岩抬升剥蚀,现今仍处于生湿气阶段。对比天环向斜南部和北部以及渭北隆起西部蓟县系烃源岩进入成熟阶段之后的演化时间,天环向斜北部和渭北隆起西部烃源岩早于天环向斜南部进入生干气阶段,这与岩浆岩侵入有关。任战利等^[12-14]发现天深 1 井附近的李 1 井、李华 1 井等存在热液矿化现象,以及在灵 1 井西部龙 1 井、龙 2 井三叠系钻遇厚度达 150 m 以上的中闪长玢岩,证实了这 2 个地区烃源岩成熟异常与岩浆活动有关。

(5) 通过对比各构造单元进入长城系生烃门限的时间发现,伊盟隆起由于长期处于隆起区,以致于下伏烃源岩成熟史各时期时间都晚于其他地区,其中伊盟隆起中部现今仍处于生湿气阶段。位于盆地内部拗拉槽及周缘的长城系烃源岩成熟较早,其他地区基本上于晚二叠世晚期进入生烃门限,现今处于生干气阶段。

6 有利勘探区预测

(1) 位于盆地拗拉槽及周缘的中元古界烃源岩进入生烃门限的时间明显早于盆地其他地区,其中渭北隆起中部地区中元古界烃源岩在开始生油后,后续地层沉降相对完整,形成了以上覆寒武系泥页岩为区域性盖层、长城系碎屑岩和蓟县系顶部风化壳为有效储层的中元古界自生自储的成藏组合,且现今仍处于生干气阶段,预测为有利勘探区。

(2) 天环向斜南部、伊陕斜坡西北部位于庆阳古隆起之上,蓟县系烃源岩进入生烃门限相对较晚,当烃源岩进入主要生油期时,受沉积中心向西迁移影响,这 2 个地区大量接受沉积,烃源岩成熟加快。伊陕斜坡西北部形成以上覆寒武系毛庄组泥页岩为盖层、蓟县系顶部风化壳和震旦系碎屑岩为有效储层的蓟县系自生自储的成藏组合;而天环向斜南部蓟县系烃源岩除自生自储成藏组合外,也形成了以上覆上石盒子组为区域性盖层、上古生界煤系为主要烃源岩、蓟县系顶部风化壳和震旦系碎屑岩为有效储层的上生下储成藏组合,且现今仍处于生干气阶段,预测这 2 个为有利的勘探区。

(3) 伊盟隆起中部长城系烃源岩进入生烃门限时间最晚,即晚三叠世早期,现今处于生湿气阶段,且上古生界煤系烃源岩直接覆盖于长城系碎屑岩之上,形成以上石盒子组为区域性盖层、下伏太原组—山西组为主要烃源岩、长城系砂砾岩为储层

的上生下储成藏组合,预测为有利勘探区。

7 结论

(1)盆地中元古代拗拉槽及周缘中元古界烃源岩进入生烃门限时间明显早于盆地其他地区。除西缘冲断带中北部后期受逆冲隆升的影响,现今处于生湿气阶段之外,其他拗拉槽及周缘处烃源岩各阶段成熟时间也早于其他地区,现今处于生干气阶段。

(2)对于其他地区长城系烃源岩而言,除伊盟隆起地区成熟期次都晚于其他地区,现今仍处于生湿气阶段外,其他地区基本上于晚二叠世晚期进入生烃门限,现今处于生干气阶段。

(3)对于其他地区蓟县系烃源岩而言,晚二叠世晚期至中三叠世早期先后进入生烃门限;晚三叠世至晚侏罗世,盆地沉积中心不断向西迁移,以致盆地西南部烃源岩成熟明显加快;在早白垩世早期,天环向斜北部和渭北隆起西部受岩浆岩侵入影响,烃源岩成熟也加快,于早白垩世先后进入生干气阶段。

(4)在明确了各构造单元中元古界烃源岩成熟期次和不同构造单元烃源岩热演化的差异性的基础上,以含油气系统分析为依据,提出了盆地渭北隆起中部地区、天环向斜南部、伊陕斜坡西北部、伊盟隆起中部为有利的勘探区带,是下一步开展研究的重点区域。

参考文献:

- [1] 李荣西,梁积伟,翁凯.鄂尔多斯盆地西南部蓟县系古油藏沥青[J].石油勘探与开发,2011,38(2):168-173.
Li Rongxi, Liang Jiwei, Weng Kai. Paleo-reservoir bitumen of middle Proterozoic Jixian system in the southwest margin of the Ordos Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(2): 168-173.
- [2] 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,2015:71-75.
Guo Ke. Study of sedimentary characteristics of middle-late Proterozoic in west margin of Ordos block[D]. Xi'an: Northwestern University, 2015: 71-75.
- [3] 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 Petrologica Sinica, 2016, 37(8): 939-951.
- [4] 彭胜琴.杭锦旗地区中晚元古界油气地质特征与勘探潜力分析[D].西安:西北大学,2009:55-69.
Peng Shengqin. The analysis of middle-late Proterozoic hydrocarbon geologic feature and exploration potential in Hangjinqi area[D].

- Xi'an: Northwestern University, 2009: 55-69.
- [5] Burnham A K, Sweeney J J. A Chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53(10): 2649-2656.
- [6] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [7] 赵振宇,郭彦如,王艳,等.鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J].特种油气藏,2012,19(5):15-20.
Zhao Zhenyu, Guo Yanru, Wang Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 15-20.
- [8] 李振宏.鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布[J].石油与天然气地质,2010,31(5):640-647.
Li Zhenhong. Structural evolution and distribution of paleokarst reservoirs in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 640-647.
- [9] 章贵松,孙六一,刘刚,等.鄂尔多斯中—新元古代盆地构造初探[J].低渗透油气田,2015(2):1-4.
Zhang Guisong, Sun Liuyi, Liu Gang, et al. An initial survey of the Ordos Basin structure in Mesoproterozoic and Neoproterozoic [J]. Low Permeability Oil & Gas Fields, 2015(2): 1-4.
- [10] 郝松立,孙六一,包洪平,等.鄂尔多斯盆地中—新元古界勘探方向及潜力[J].天然气地球科学,2016,27(12):2127-2135.
Hao Songli, Sun Liuyi, Bao Hongping, et al. Exploration direction and potential of the Middle-Upper Proterozoic in Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(12): 2127-2135.
- [11] 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.
- [12] 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. 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(S2): 27-38.
- [13] 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.
- [14] 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 Petrologica Sinica, 1996, 17(1): 17-24.
- [15] 孙少华,刘顺生,汪集喆.鄂尔多斯盆地热流场特征[J].大地构造与成矿学,1996,20(1):29-37.
Sun Shaohua, Liu Shunsheng, Wang Jiyang. Characteristics of heat flow field in Ordos Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia,

1996,20(1):29-37.

[16] 赵桂萍.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区上古生界烃源岩热演化特征模拟研究[J].石油实验地质,2016,38(5):641-646.
Zhao Guiqing.Thermal evolution modeling of Neopaleozoic source rocks in Hangjinqi region, Ordos Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2016,38(5):641-646.

[17] 陈瑞银,罗晓容,陈占坤,等.鄂尔多斯盆地中生代地层剥蚀量估算及其地质意义[J].地质学报,2006,80(5):685-693.
Chen Ruiyin,Luo Xiaorong,Chen Zhankun, et al.Estimation of denudation thickness of Mesozoic strata in the Ordos Basin and its geological significance [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5):685-693.

[18] 陈瑞银,罗晓容,陈占坤,等.鄂尔多斯盆地埋藏演化史恢复[J].石油学报,2006,27(2):43-47.
Chen Ruiyin,Luo Xiaorong,Chen Zhankun, et al.Restoration of burial history of four periods in Ordos Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2006,27(2):43-47.

[19] 翁望飞,王建强,张蓉蓉,等.利用声波测井技术计算地层剥蚀厚度:以鄂尔多斯盆地为例[J].新疆石油地质,2011,32(2):143-146.
Weng Wangfei,Wang Jianqiang,Zhang Rongrong, et al.Denudation thickness estimation of sedimentary formation in Ordos Basin by acoustic logging information[J].Xinjiang Petroleum Geology,2011,32(2):143-146.

[20] 李超,张立强,张立宽,等.鄂尔多斯盆地镇泾地区中生代地层剥蚀厚度估算及古构造恢复[J].岩性油气藏,2016,28(2):72-79.
Li Chao,Zhang Liqiang,Zhang Likuan, et al.Estimation of denuda-

tion thickness of Mesozoic strata and paleostructure restoration in Zhenjing area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(2):72-79.

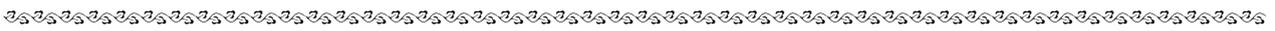
[21] 朱定伟,丁文龙,游声刚,等.鄂尔多斯盆地东南部古构造恢复及地质意义[J].特种油气藏,2013,20(1):48-51.
Zhu Dingwei,Ding Wenlong,You Shenggang, et al.Paleostructure restoration and its geological significance of southeast of Ordos Basin[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2013,20(1):48-51.

[22] 王斌,赵永强,罗宇,等.塔里木盆地草湖凹陷热演化与生烃史:基于 IES 软件盆地模拟技术[J].石油实验地质,2010,32(6):605-609.
Wang Bin,Zhao Yongqiang,Luo Yu, et al.Thermal evolution and hydrocarbon generation in the Caohu Sag of the Tarim Basin:Based on IES basin simulation technology [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(6):605-609.

[23] 阙永泉,郑伦举,承秋泉,等.有机质热解模拟实验残留物镜质体反射率校正研究[J].石油实验地质,2015,37(4):506-511.
Que Yongquan,Zheng Lunju,Cheng Qiuquan, et al.Vitrinite reflectance correction of residues in organic matter pyrolysis simulation experiments[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(4):506-511.

[24] 郭泽清,钟建华,刘卫红,等.应用 EASY% R_o 法模拟柴达木盆地西部烃源岩成熟史[J].沉积学报,2004,22(1):154-160.
Guo Zeqing,Zhong Jianhua,Liu Weihong, et al.Application of EASY% R_o method to simulating maturation history of source rocks in the western Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica,2004,22(1):154-160.

(编辑 韩 彧)



(上接第 504 页)

[19] 梁瑞才,郑彦鹏,王揆洋,等.东海北部虎皮礁邻近海域地磁异常研究[J].海洋科学进展,2006,24(2):173-180.
Liang Ruicai,Zheng Yanpeng,Wang Kuiyang, et al.Study on magnetic anomalies in the Hupijiao reef and adjacent sea areas in the northern East China Sea [J]. Advances in Marine Science,2006,24(2):173-180.

[20] 陈冰,王家林,吴健生,等.东海陆架盆地海礁凸起南块基底性质研究[J].石油实验地质,2002,24(4):301-305.
Chen Bing,Wang Jialin,Wu Jiansheng, et al.Study on the basement properties of the south Haijiao uplift in the East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(4):

301-305.

[21] 刘金水,廖宗廷,贾健谊,等.东海陆架盆地地质结构及构造演化[J].上海地质,2003(3):1-6.
Liu Jinshui,Liao Zongting,Jia Jianyi, et al.The geological structure and tectonic evolution of the East China Sea Shelf Basin[J].Shanghai Geology,2003(3):1-6.

[22] 杨文达,崔征科,张昇彪.东海地质与矿产[M].北京:海洋出版社,2010.
Yang Wenda,Cui Zhengke,Zhang Yibiao.Geology & minerals of East China Sea[M].Beijing:China Ocean Press,2010.

(编辑 徐文明)