

鄂尔多斯盆地延长探区上古生界热演化史

于强^{1, 2)}, 任战利¹⁾, 王宝江²⁾, 高利军³⁾, 李成福³⁾, 曹红霞²⁾

1) 西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室, 西安, 710069;

2) 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院, 西安, 710075;

3) 陕西延长石油油气勘探公司天然气勘探开发部, 陕西延安, 716000

内容提要: 通过试气静温资料, 统计了延长探区上古生界各个主力含气层位的现今地层温度。通过地化资料指出该区上古生界烃源岩热演化程度达到成熟—过成熟阶段, 采用经验公式法恢复了对应的最大古地温。采用将今论古方法探讨了该区各个时期的古地温梯度。在剥蚀厚度恢复的基础上, 详细配置各个地层的岩性、物性、地化参数等指标, 恢复了该区埋藏沉降史和热演化史。沉降史模拟表明: 晚三叠世为该区沉降的主要发育时期。热演化史模拟表明: 延长探区上古生界烃源岩在早侏罗世进入成熟阶段, 晚侏罗世进入高成熟阶段, 上古生界烃源岩主生长期为晚侏罗世—早白垩世。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 上古生界; 天然气; 热演化史; 延长探区

鄂尔多斯盆地上古生界天然气勘探已有重大突破, 盆地中北部已建成了大型天然气田。延长探区位于盆地东南部, 近年来上古生界各层(段)均发现了气层或含气显示, 表明具备天然气成藏的基本地质条件, 但该区关于上古生界热演化程度及热演化史的研究较少。加强延长探区上古生界烃源岩热演化史的研究, 对于进一步探讨延长探区构造演化历史、油气成藏富集规律及其控制因素等有重要意义。

延长探区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡带, 其构造特征简单, 地层平缓, 总体呈一向西缓倾的单斜面貌, 倾角不足 1°。钻遇地层自上而下分别为第四系、三叠系、二叠系、石炭系、奥陶系(未穿)。研究区整体缺失白垩系、志留系、泥盆系及石炭系部分地层。侏罗系仅在本区西部有少量保存, 本区大部分地区第四系直接不整合覆盖在三叠系之上。石炭—二叠系与下古生界不整合接触。

鄂尔多斯盆地加里东构造运动期以抬升为主, 受区域沉积、构造控制, 直到晚石炭世才开始再次接受沉积。本区上古生界钻遇层位有石炭系本溪组和二叠系。二叠系包括: 上统石千峰组、中统石盒子组、下统山西组和太原组。根据现有的试气成果认为: 该区上古生界天然气主力层位为山西组山 2 段、

本溪组、石盒子组盒 8 段。

1 现今地温

前人收集鄂尔多斯盆地多口钻孔的长期温度观测资料, 对整个盆地现今地温梯度进行研究。鄂尔多斯盆地现今地温梯度较低, 平均约为 3.19 °C/100 m(任战利, 2005)。

通过收集延长探区多口井试气测量得到的地层静温资料, 计算该区现今地温梯度。从实测温度—深度关系图(图 2)可以看出, 现今地温总趋势是温度随深度的增加而线性升高, 表现出典型的传导型地温场特征。通过对地层温度(t)与深度(H)关系作回归分析。回归关系式为:

$$t = 0.0287H + 13.9$$

式中: t 为地层温度, °C; H 为深度, m; 13.9 为地表平均温度, °C。由回归关系式可知该区现今地温梯度 2.87 °C/100 m, 小于鄂尔多斯盆地现今地温梯度平均值 3.19 °C/100 m。

对上古生界三个主力含气层段(盒 8 段、山 2 段和本溪组)的地层温度分别进行统计整理。可以看出, 该区三个含气层段地层温度整体展布近南北向, 地层温度均具有由西向东逐渐降低的特点。盒 8

注: 本文为国家重大专项项目(2008ZX05005-004-007HZ)资助的成果。

收稿日期: 2011-09-29; 改回日期: 2011-12-21; 责任编辑: 黄敏, 章雨旭。

作者简介: 于强, 男, 1983 年生。博士研究生, 主要从事盆地热演化史与油气成藏及油气地质综合研究。通讯地址: 710069, 陕西省西安市太白北路 229 号西北大学。电话: 029-88305530。Email: ajaxworld@163.com。

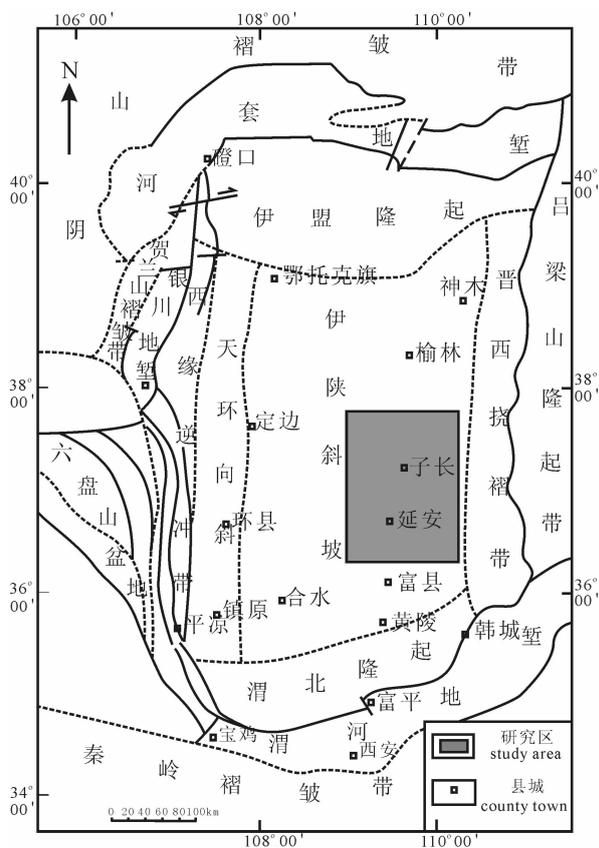


图1 鄂尔多斯盆地延长探区研究区范围

Fig. 1 Research area in Yanchang area, Ordos Basin

段、山2段和本溪组自西向东地层温度变化范围分别为105~74℃、111~80℃和113~82℃之间(图3)。通过前面回归的地温梯度2.87℃/100m计算三个主力含气层温度的范围,与实测地层静温变化范围一致。

2 热演化程度和古地温恢复

收集该区多口井上古生界镜质体反射率资料,排除煤样品,只留泥岩分析测试数据。绘制 R_o-H 图件,可以看出该区上古生界烃源岩热演化程度 R_o 达到1.78%~2.16%(图4),整体处于成熟—过成熟阶段。石千峰组、石盒子组、山西组、太原组和本溪组热演化程度平均值依次为1.78%、1.86%、1.95%、1.98%和2.05%。

对上古生界镜质体反射率资料,采用Barker&Pawlewicz法 $\ln(R_o) = 0.0096t_{max} - 1.4$,恢复地层经历的最大古地温处于140~165℃之间。按照层位对温度进行统计,石千峰组、石盒子组、山西组、太原组和本溪组恢复的最大古地温平均值分别为142℃、150℃、155℃、158℃和162℃(图5)。

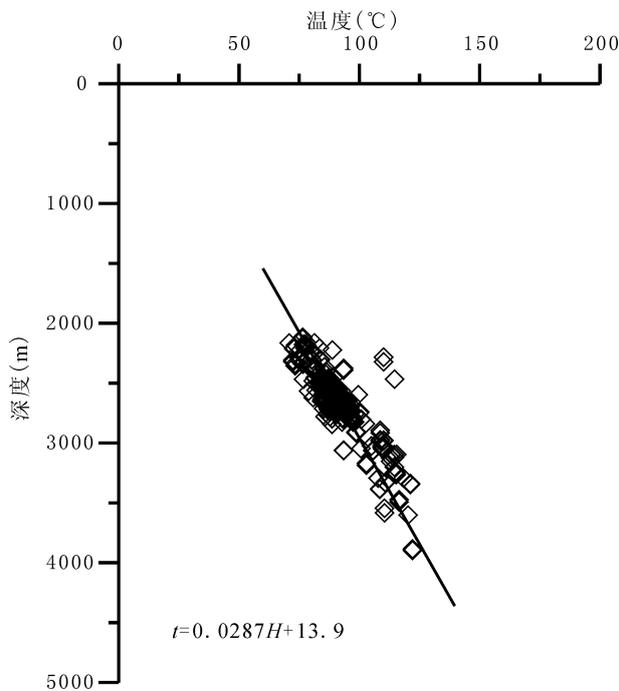


图2 鄂尔多斯盆地延长探区测温与深度关系图

Fig. 2 Relation of formation temperature and depths in Yanchang area, the Ordos Basin

3 各个时期地温梯度探讨

镜质体反射率和磷灰石裂变径迹数据只能记录地层达到最大埋深时的地温场(于强等,2008),对于鄂尔多斯盆地中生代以前的古地温场状况,只能由盆地各个时期发育的区域构造背景、沉积环境,采用将今论古的方法来推断古地温梯度。下面分别对鄂尔多斯盆地各个时期古地温梯度进行推断。

延长探区在中石炭世—早二叠世早期为滨浅海沉积环境,早二叠世晚期—早、中三叠世为陆相—河流、湖泊沉积环境。根据全球类似盆地特征推测,延长探区当时地温梯度范围在2.2~2.4℃/100m之间。

晚侏罗纪世—早白垩世的燕山运动,使得盆地发生了一次重大的构造热事件(任战利等,2005),国内外学者对此次热事件研究较多。此次构造热事件,对地温场造成了很大的影响,使得鄂尔多斯盆地地温梯度迅速升值,大地热流值也显著增长,研究认为当时古地温梯度远高于现今。根据前人研究,早白垩世晚期延长探区最大古地温梯度为3.8~4.3℃/100m^①。

综上所述,延长探区各个时期地温梯度取值为:石炭纪—三叠纪,2.3℃/100m;侏罗纪—早白垩

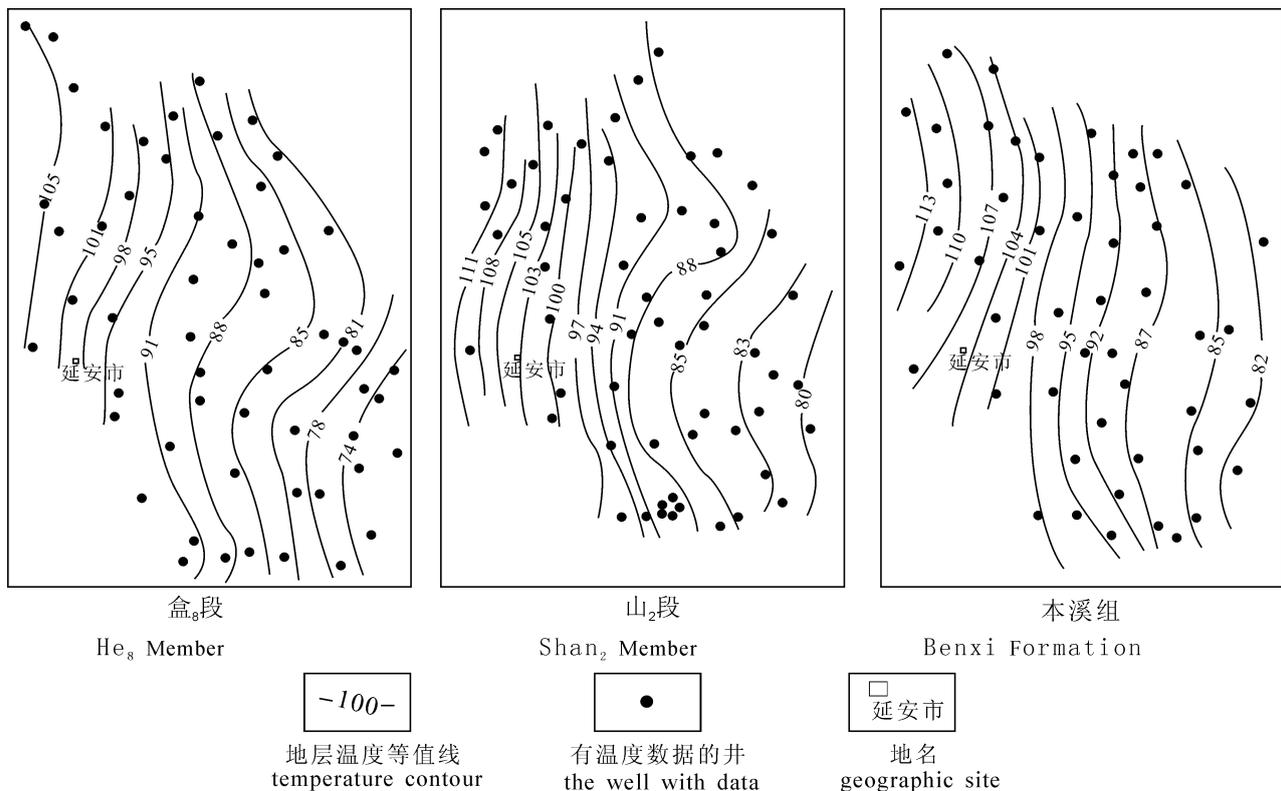


图 3 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界主力气层段现今地温

Fig. 3 The present temperature of Upper Paleozoic in Yanchang area, the Ordos Basin

世, 4.1 °C/100 m; 现今, 2.87 °C/100 m。

4 剥蚀厚度和埋藏沉降史恢复

研究区自中生代以来, 主要经历两次剥蚀期, 即晚三叠世末—早侏罗世和晚白垩世。由于构造热事

件的存在, 晚白垩世以来抬升剥蚀量较大, 对油气生成影响也最为重要, 故本文采用声波时差法对早白垩世以来剥蚀厚度进行恢复。

选取该区多口井, 采用声波时差测井法(泥岩

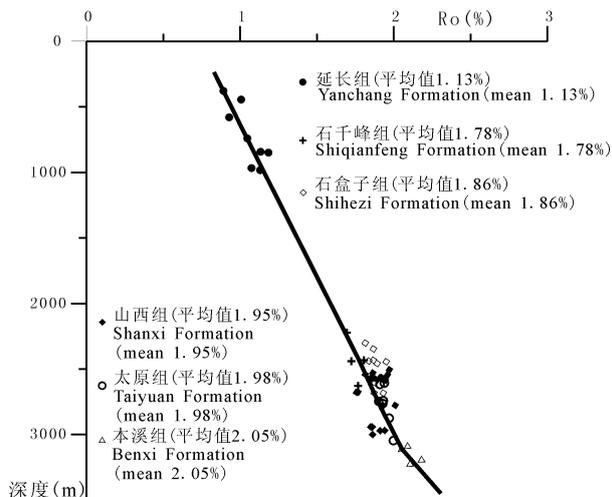


图 4 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界热演化程度

Fig. 4 Thermal evolution degree of Yanchang area, the Ordos Basin

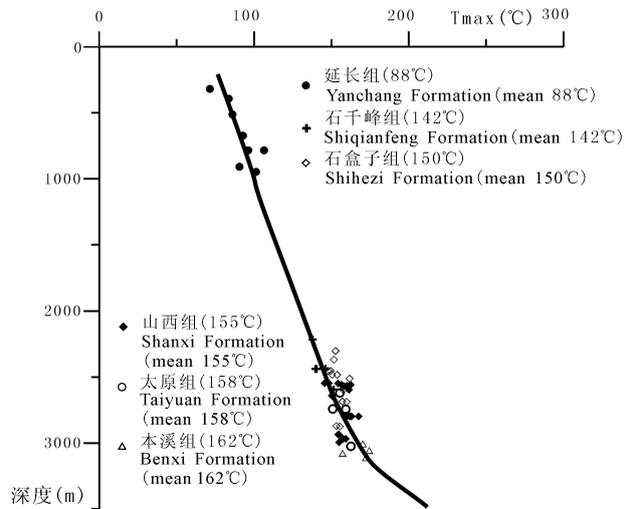


图 5 鄂尔多斯盆地恢复的延长探区上古生界最大古地温

Fig. 5 Biggest ancient geothermal of Yanchang area, the Ordos Basin

压实法),恢复了该区早白垩世以来总的剥蚀厚度。声波时差法原理如下。

泥岩声波时差(Δt)与埋深(H)的关系为:

$$\Delta t = \Delta t_0 e - CH$$

式中: C 值为代表正常压实曲线的斜率; Δt 为任一埋深的泥岩声波时差, $\mu\text{s/m}$; H 为泥岩埋藏深度, m ; e 为自然对数底; Δt_0 为地表未固结泥岩的声波时差值, $\mu\text{s/m}$, Δt_0 的理论值为 $620 \sim 650 \mu\text{s/m}$,根据鄂尔多斯盆地多口井正常压实曲线外推至地表的平均值,求得 Δt_0 取值 $600 \mu\text{s/m}$ 。

选取该区西北部、南部和东北部三口井延 283 井、延 340 井和延 108 井进行剥蚀厚度恢复,恢复厚度分别为 1156 m、1198 m 和 1220.3 m。由此可看出延长探区早白垩世以来剥蚀厚度较大,范围介于 1100 ~ 1300 m 之间(图 6)。

在上述剥蚀厚度恢复的基础上,使用美国 BasinModel 盆地模拟软件,对上古生界每个层位的岩性进行详细的配置,压实类型选择机械型,孔隙度按指数形式递减,对该区埋藏沉降史进行恢复。

通过模拟可以看出,延长探区沉降速率 SR (Sedimentation Rate)除中晚三叠世(225 ~ 208 Ma)较高外(均值 162.3 m/Ma),其余时间段较小并且变化也比较稳定,其中负值代表抬升剥蚀(图 7)。

按照沉降速率变化特征,可将该区演化分为四大阶段。

第一阶段,晚石炭世—早三叠世(327 ~ 226 Ma),国内外学者研究认为该区在早古生代开始接受沉积,沉积了一套较厚的马家沟组碳酸盐岩(任战利等,2007)。到奥陶纪末期,由于加里东构造运动,研究区整体抬升,期间缺失了志留系—泥盆系,沉积间断时期达 120 Ma 左右之久(薛会等,2009)。受整个大区域构造运动、沉积环境控制,石炭纪再次接受沉积。该阶段沉降速率逐渐增大,到晚二叠世—早三叠世期间达到 50 ~ 70 m/Ma。

第二阶段,中晚三叠世(226 ~ 208 Ma),该区进入快速沉降阶段,沉降速率急剧增加,在 150 ~ 170 m/Ma 之间。此阶段为延长探区最为旺盛的发育阶段,均值为 162.3 m/Ma。

第三个阶段,早侏罗世—早白垩世(208 ~ 96 Ma),该区整体以接受沉积为主,偶尔有微弱的抬升剥蚀,此阶段沉降速率整体逐渐递减,到 96 Ma(即地层达到最大埋深的时刻)停止沉降。

第四个阶段,早白垩世晚期约 96Ma 以来该区进入隆升阶段,地层经历大幅度的抬升和剥蚀,此阶段属于该区的后期改造阶段(李明瑞等,2009)。其隆升可以划分为两个阶段,早白垩世末—渐新世末

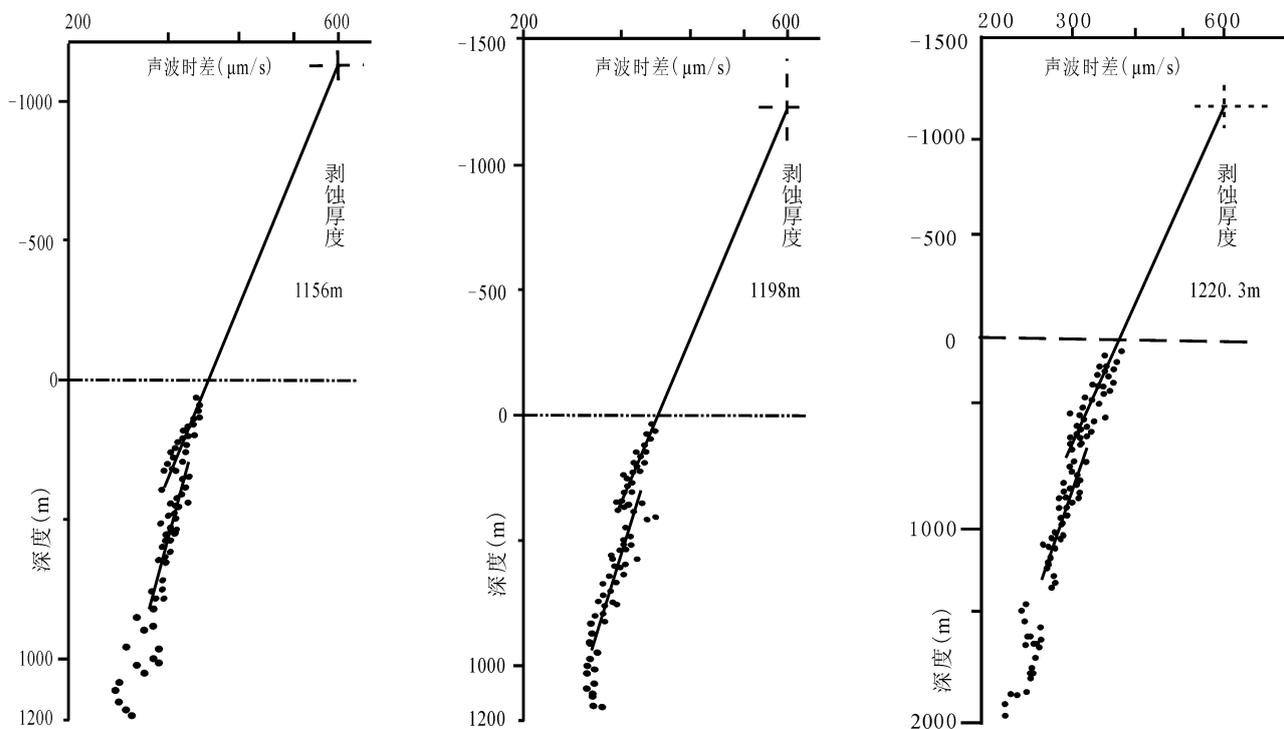


图 6 鄂尔多斯盆地延长探区剥蚀厚度恢复

Fig. 6 Eroded thickness of Yanchang area, the Ordos Basin

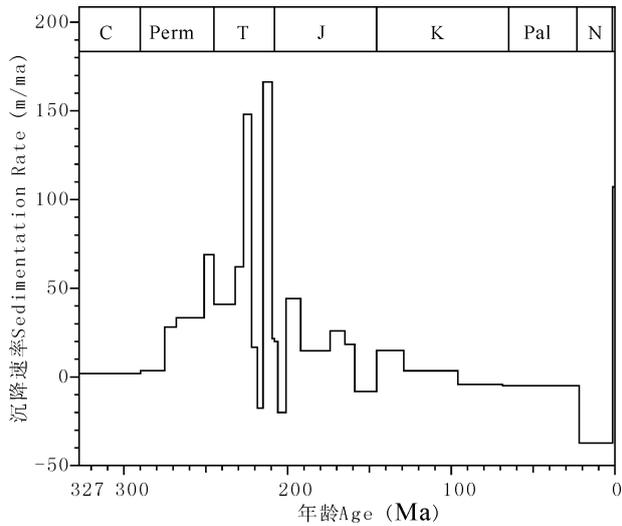


图 7 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界沉积速率
Fig. 7 Deposition rate of Upper Paleozoic
in Yanchang area, the Ordos Basin

(23 Ma) 及渐近世至早更新世(1.4 Ma)。该区隆升以来遭受了强烈的剥蚀改造,特别是渐近世至早更新世剥蚀更为强烈(任战利等,2008),两期模拟的

剥蚀厚度分别为 425 m 和 744 m。早更新世(1.4 Ma)以来鄂尔多斯盆地接受第四纪黄土沉积,该区沉积第四系黄土较薄,约 23 m 左右。

5 热演化史与生烃史模拟

在上述埋藏沉降史恢复的基础上,用现今最常用的 Lopatin 成熟度模型(胡圣标等,2009;刘伟新等,2008),采用 EASY% R_o 法,对延长探区上古生界烃源岩热演化史进行模拟。通过不断调整地质参数,最终达到了模拟 R_o 值和实测值拟合,确保了热史模拟的精度(图 8)。

模拟显示,早白垩世晚期 96 Ma 左右,地层埋深达到最大 3645 m,地层温度也达到最大古地温 155 $^{\circ}\text{C}$,该时期地温梯度为 4.1 $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,早白垩世晚期以来总剥蚀厚度为 1169 m。模拟的古地温梯度和剥蚀厚度与计算的数值接近,模拟效果真实。

延长探区上古生界烃源岩热演化程度处于高成熟—过成熟阶段,以高成熟度为主,和勘探中各项分析测试结果一致。精确模拟数据显示上古生界在中三叠世及其以前由于埋深较浅,烃源岩热演化程度

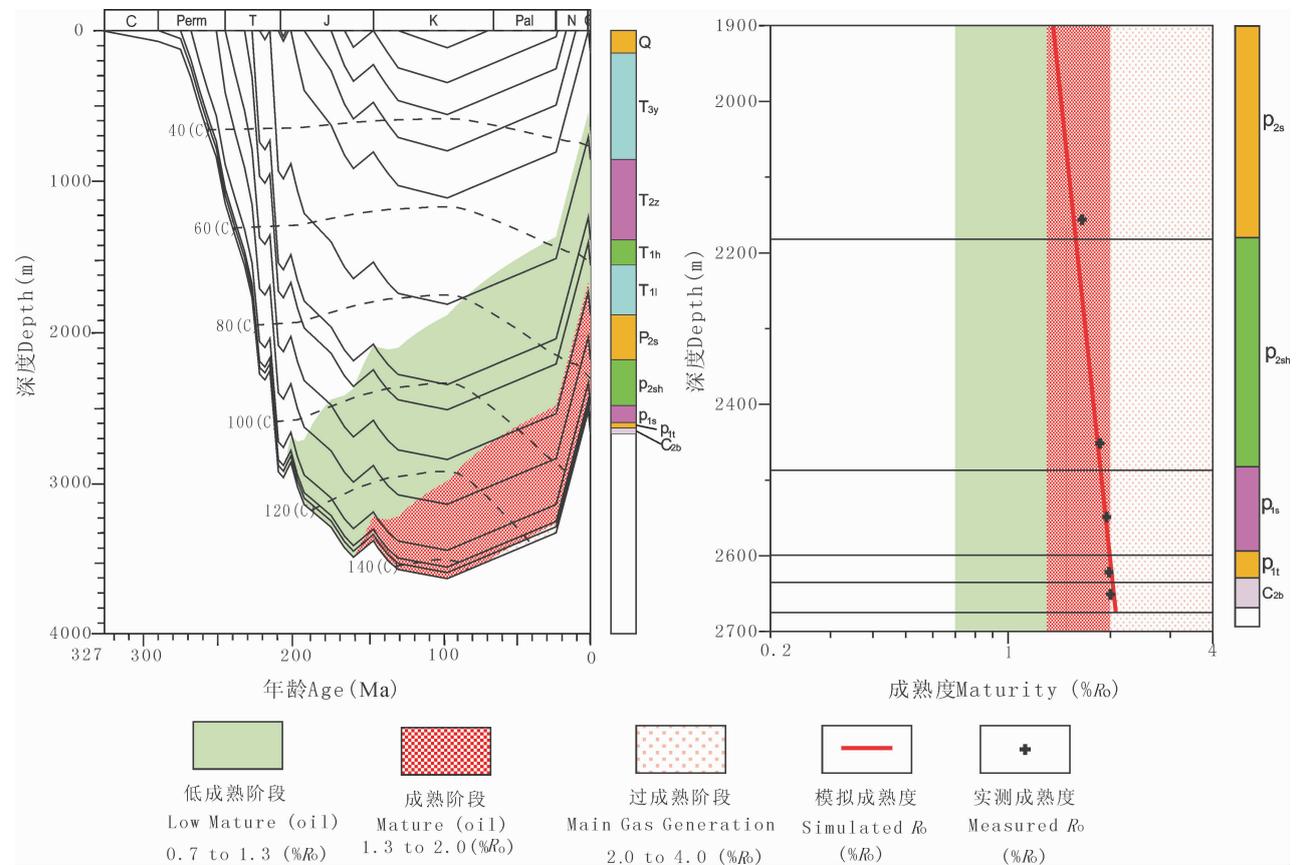


图 8 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界热演化史模拟

Fig. 8 Thermal evolution history simulation of Upper Paleozoic in Yanchang area, the Ordos Basin

低,油气尚未成熟;早侏罗世 204 Ma, R_o 达到 0.7%, 烃源岩进入成熟阶段;中侏罗世, R_o 介于 0.7% ~ 1.3% 之间;晚侏罗世 153 Ma, R_o 达到 1.3%, 开始进入高成熟阶段, 烃源岩原油裂解并进入生气窗;自早白垩世晚期 96 Ma 左右以来, 由于地温梯度降低及地层抬升剥蚀, 使得烃源岩的生烃作用逐渐减弱。延长探区上古生界烃源岩主生烃期为晚侏罗—早白垩世。

6 结论

(1) 延长探区现今地温梯度为 2.87 °C/100 m。上古生界主力含气层段盒 8 段、山 2 段和本溪组的地层温度均具有由西向东逐渐降低的特点, 地温变化范围分别为 105 ~ 74 °C、111 ~ 80 °C 和 113 ~ 82 °C。

(2) 上古生界烃源岩热演化成熟指标 R_o 达到 1.78% ~ 2.16%, 处于成熟—过成熟阶段, 计算恢复的地层最大古地温处于 140 ~ 165 °C 之间。

(3) 按照沉降速率的变化特征, 延长探区自晚古生代以来, 演化可分为四大阶段。中晚三叠世 (226 ~ 208 Ma) 沉降速率最高, 均值为 162.3 m/Ma, 为该区主沉降期。

通过本文研究得出关于延长探区热演化史的认识, 即: 延长探区上古生界烃源岩在早侏罗世进入成

熟阶段, 晚侏罗世进入高成熟阶段, 早白垩世晚期以来生烃作用减弱。延长探区上古生界烃源岩主生烃期为晚侏罗—早白垩世。

注释 / Note

① 于强. 2009. 鄂尔多斯盆地南部中生界热演化史及其与多种能源关系研究. 西北大学硕士学位论文.

参考文献 / References

- 胡圣标, 汪集旸. 1995. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展. 地学前缘, 2(3~4): 171~180.
- 李明瑞, 窦伟坦, 蔺宏斌, 张清, 焦积田. 2009. 鄂尔多斯盆地东部上古生界致密岩性气藏成藏模式. 石油勘探与开发, 36(1): 56~61.
- 刘伟新, 王延斌, 张文涛. 2008. 鄂尔多斯大牛地气田上古生界储层成岩作用与产能关系研究. 石油试验地质, 30(6): 557~563.
- 任战利, 刘丽, 崔军平. 2008. 盆地构造热演化史在油气成藏期次研究中的应用. 石油与天然气地质, 29(4): 502~506.
- 任战利, 肖晖, 刘丽, 张盛, 秦勇, 韦重韬. 2005. 沁水盆地中生代构造热事件发生时期的确定. 石油勘探与开发, 32(1): 43~47.
- 任战利, 张盛, 高胜利, 崔军平, 肖媛媛, 肖辉. 2007. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义. 中国科学, 37(增刊 I): 23~32.
- 薛会, 王毅, 徐波. 2009. 鄂尔多斯盆地杭锦旗探区上古生界天然气成藏机理. 石油试验地质, 31(6): 551~556.
- 于强, 任战利. 2008. 鄂尔多斯盆地黄陵、东胜地区地温场对比. 吉林大学学报(地球科学版), 38(6): 933~936, 945.

Thermal Evolution History of the Upper Paleozoic in Yanchang Exploratory Area, Ordos Basin

YU Qiang^{1,2)}, REN Zhanli¹⁾, WANG Baojiang²⁾, GAO Lijun³⁾, LI Chengfu³⁾, CAO Hongxia²⁾

1) State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069;

2) Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Corporation Limited Research Institute, Xi'an, 710075;

3) Gas Exploration Division of Oil and Gas Exploitation Company, Shaanxi Yanchang Petroleum, Yan'an, Shaanxi, 716000

Abstract: With the analysis of the gas-testing data, the Upper Paleozoic reservoir temperature in Yanchang area has been calculated. Based on thermal evolution indicators and palaeogeothermal recovery, it is indicated that the Upper Paleozoic source rocks have reached the maturity stage and the over-maturity stage. The paleo-geothermal gradient in different period is discussed. The erosion thickness of the formation in this region was recovered. The thermal evolution history of Upper Paleozoic in Yanchang exploratory area has been reproduced. The main sedimentation period is Late Triassic (226 ~ 208 Ma). The Upper Paleozoic source rocks reached the maturity stage in Early Jurassic and reached the high maturity stage in Late Jurassic. The main gas generation period of the Upper Paleozoic in Yanchang area is from Late Jurassic to Early Cretaceous.

Key words: Upper Paleozoic; natural gas; geothermal evolution history; Yanchang area; Ordos Basin