

盆地埋藏史及其对砂岩储层物性演化的影响 ——以陕北延长油区砂岩储层为例

罗静兰¹, 张成立¹, 阎世可², 武富礼², 李玉宏²

(1. 西北大学大陆动力学实验室, 陕西西安 710069;

2. 延长石油管理局, 陕西永坪 717208)

摘要: 延长油区自晚三叠世以来经历了两次明显的抬升剥蚀事件、一次沉积间断和三次沉降作用过程。第一次沉降阶段(225~208 Ma)以挤压环境下的构造沉降起主导作用, 沉降速率较高, 东部区的总沉降量高于西部区, 第二、三次沉降阶段(203~157 Ma和138~97 Ma)主要以拉伸背景下的沉积载荷沉降为主, 沉降作用相对减弱。西部区由于褶皱和逆冲断裂, 其沉降速率和构造沉降量高于东部区。岩石物性模拟结果显示, 下、中侏罗统延安组储集层的物性明显好于下伏上三叠统延长组。孔隙度和渗透率的高值区受河道砂体分布带的控制, 呈NE方向展布。三叠系砂岩储集层孔隙度的变化主要发生于第二次沉降阶段, 侏罗系砂岩储集层孔隙度的变化主要发生于第三次沉降阶段, 两者在97 Ma时达到与现今基本相似的最低值。埋藏压实作用是造成砂岩孔隙丧失的主要原因, 它使侏罗系砂岩和三叠系砂岩孔隙度分别丧失15%和20%。碳酸盐胶结物是导致砂岩孔隙度降低的主要胶结物。西部区储集层物性低于东部区可能缘于二、三次沉降阶段上覆地层载荷所引起的机械压实作用西部区大于东部区所致。

关键词: 延长油区; 盆地埋藏史; 储层物性演化

第一作者简介: 罗静兰, 女, 43岁, 副教授, 石油地质与沉积学

中图分类号: P618.130⁺2

文献标识码: A

盆地埋藏史的地质模拟技术是一种效率极高的定量石油系统研究方法, 已成为探讨盆地构造演化、进行盆地动力学分析以及含油气盆地油气系统定量模拟的重要手段。本文通过对鄂尔多斯盆地延长油区晚三叠世以来盆地埋藏史的恢复、沉积物的压实过程和盆地沉降分析, 探讨了盆地埋藏史及其对研究区早中侏罗系-晚三叠系河流相-湖泊三角洲相砂岩储层物性演化的影响。

1 地质背景

延长油区位于鄂尔多斯盆地的次级构造单元陕北斜坡带上, 构造沉积发育史与鄂尔多斯盆地的形成演化密切相关^[1~4]。

上三叠统延长组是延长油区一套主要的含油岩系, 它是在鄂尔多斯盆地持续拗陷和稳定沉降过程中堆积的一套河流-湖泊相陆源碎屑岩沉积体系, 真实地记录了该大型内陆淡水湖盆由形成、发展到消亡的演化过程。由下至上可分为10个组, 其中长10到长7是湖盆的形成时期。该时期湖水

不断加深, 湖盆面积不断扩大, 湖岸线向外推移, 逐渐形成一个广阔的内陆湖泊, 长7沉积期(225 Ma)是鄂尔多斯盆地的最大湖进期。长6到长3为湖盆的发展时期, 该时期沉积作用加强, 湖盆进入以三角洲建设为主的发展阶段, 其中长6期是三角洲建设的高峰期。长4+5油层组沉积期使长6期形成的许多大型三角洲发生平原沼泽化。长2+3油层组沉积期, 湖盆进一步收缩, 三角洲进一步平原沼泽化, 发育了以曲流河和交织河为特征的河流相沉积体系。从长2到长1湖盆萎缩并逐渐衰亡, 至长1结束, 湖盆抬升出露地表, 全区大面积平原化及沼泽化, 随之结束了延长组的沉积过程。

下-中侏罗统为河流-浅湖相沉积, 形成延长油区另一套主要含油岩系。其中下侏罗统(富县组)及中侏罗统延安组下部(延10)为辫状河河道充填沉积, 以较粗粒的砂岩为主。中侏罗统延安组(延9-延4+5)、直罗组和安定组为河湖相沉积。侏罗纪末期的燕山运动造成鄂尔多斯盆地周缘上升, 致使延长油区缺失上侏罗统, 白垩系为河流冲积相和干旱型湖泊棕红色砂砾岩沉积。

2 盆地沉降模拟

2.1 方法

沉积物埋藏史研究包括两个方面的内容,其一是模拟沉积物在重力及上覆沉积物压载共同作用下的压实过程;其二是模拟一个沉积盆地的总沉降量,即构造作用引起的沉降和由沉积负载作用引起的沉降之和。

在模拟延长油区沉积物的压实作用过程中,本文考虑了如下因素和采用了如下公式:(1)岩石孔隙度随深度的变化函数关系式^[5-7];(2)在二维模拟计算中岩石孔隙度与深度的关系主要基于由 Platte River Associates Inc.* 描述的经验关系式;(3)压实过程中岩石渗透率与孔隙度间的关系方程^[6];(4)状态方程*:①流体的密度计算公式和②流体

的粘度计算公式;(5)运移方程(达西定律)*;(6)物质守恒方程*。先求解出压力、孔隙度、渗透率和运移速度等,最终计算出沉积物在沉积作用中的压实过程。

盆地的沉降分析采用了 Steckler 和 Watas^[8-9], Sclater 和 Christie^[7] 的回剥技术。

2.2 结果与讨论

埋藏史恢复及其研究结果表明,鄂尔多斯盆地自晚三叠世以来经历了两次明显的抬升剥蚀、一次沉积间断和三次沉降作用过程(图1)。第一次抬升事件发生于晚三叠世(208~203 Ma),为一次短暂的抬升剥蚀;中侏罗世后(157~138 Ma),全区出现一次沉积间断;第二次抬升剥蚀事件自晚白垩世开始至第三纪(97~1.64 Ma),长达 95 Ma,是全区一次持续时间较长的重要抬升剥蚀事件。

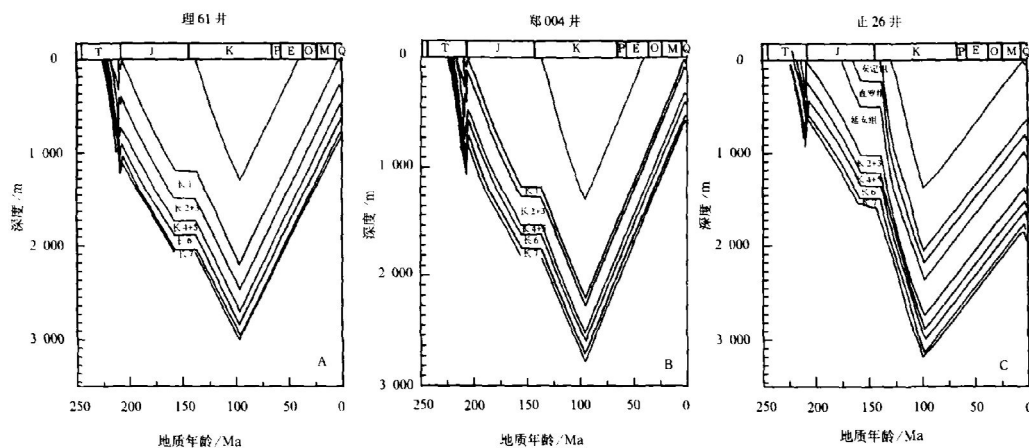


图1 延长油区构造沉降及埋藏演化史图

(A: 东北区; B: 东南区; C: 西区)

Fig.1 Tectonic subsidence and burial history of Yanchang oil region

第一沉降阶段发生于晚三叠世(225~208 Ma),即长1~长7沉积期,是鄂尔多斯盆地在大华北盆地收缩并开始转为内陆湖泊的第一次重要沉降期。该阶段的模拟结果显示,延长油区东北区的沉降速率为73.3~75.7 m/Ma,平均74.5 m/Ma;构造沉降率为40.6~44.4 m/Ma,平均42.2 m/Ma(图2A)。东南区的沉降速率为62.1~67.2 m/Ma,平均63.9 m/Ma;构造沉降率为35.7~39.5 m/Ma,平均37.6 m/Ma(图2B)。西部志丹地区的沉降速率为57~73.6 m/Ma,平均65.3 m/Ma;构造沉降率为35.8~43.9 m/Ma,平

均39.8 m/Ma(图2C)。相比之下,东北区的沉降速率及构造沉降率略高于其它两个地区。全区构造沉降与总沉降的比值大致相同,变化于58%~60%之间,表明此时期的沉降主要由构造作用引起。

第二沉降阶段是在全盆地发生短暂抬升剥蚀后,于早侏罗世开始的(203~157 Ma)。主要接受了早、中侏罗世的河湖相沉积。与第一次沉降相比,盆地的沉降速率及构造沉降率均有较大程度的降低。延长东北区的沉降速率变化于26~26.4 m/Ma,构造沉降率为8.8~9.8 m/Ma(图2A);东南区的沉降速率变化于19.2~26 m/Ma,构造沉降率为10.6~15.4 m/Ma(图2B);西部志丹区的沉

* Platte River Associates Inc. Basin Mod 2 ~ D Basin Modelling System. 1995

积速率为 $18.7 \sim 22.2 \text{ m/Ma}$, 构造沉降率为 $8.9 \sim 1.4 \text{ m/Ma}$ (图 2C)。该阶段构造沉降所占盆地总沉降量的比例较第一沉降阶段有所减少, 变化于 $36.3\% \sim 54.6\%$ 之间, 东北区仅为 36.3% 。暗示全区除西部志丹地区构造引起的沉降还具有重要作用外, 东部各区构造引起的沉降已经减弱, 仅占据次要地位。

第三沉降阶段发生于早白垩世 ($138 \sim 97 \text{ Ma}$)。此时期的沉积速率较第二阶段的沉积速率有所加快, 东北区的沉积速率变化于 $31.6 \sim 34.3 \text{ m/Ma}$ 之间, 平均 32.4 m/Ma ; 构造沉降率为 $6.3 \sim 10.8 \text{ m/Ma}$,

平均 8.5 m/Ma (图 2A)。东南区的沉积速率在 $29.4 \sim 36.8 \text{ m/Ma}$ 之间, 平均 31.9 m/Ma ; 构造沉降率为 $9.8 \sim 10.2 \text{ m/Ma}$, 平均 10.0 m/Ma (图 2B)。西部志丹探区的沉积速率是 $36.7 \sim 50.2 \text{ m/Ma}$, 平均 42.6 m/Ma ; 构造沉降率差异较大, 变化于 $8.5 \sim 91.5 \text{ m/Ma}$ 之间, 平均 39.1 m/Ma (图 2C)。延长油区以志丹探区的沉积速率和平均构造沉降率最高, 表明此阶段盆地的沉降中心已明显向西迁移, 西区的构造活动比东区强烈。与前两期沉降作用相比, 盆地的沉降作用主要以上覆地层载荷所造成的沉积载荷沉降为主。

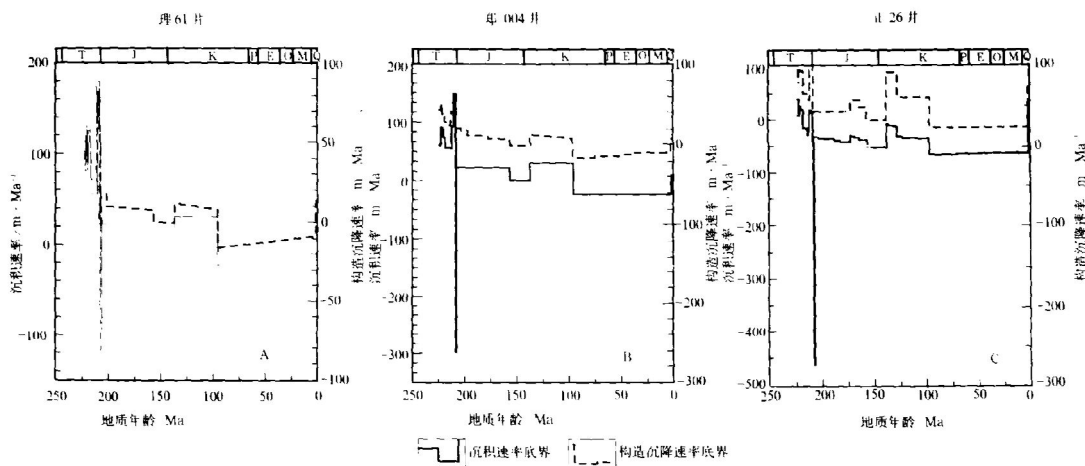


图2 延长油区基底沉降及构造沉降速率图

(A: 东北区; B: 东南区; C: 西区)

Fig. 2 Rates of basement and tectonic subsidence in Yanchang Oil region

根据区域地质资料分析, 三叠世晚期由于印支运动以及库拉-太平洋板块与欧亚板块间的相互作用, 导致华北与扬子板块最终全面碰撞和秦岭造山带的隆升^[10]。在此背景下, 中国东部沿 NNE 方向形成了一系列由雁列隆起组成的东部隆起带和一系列由雁列盆地组成的西部坳陷带。鄂尔多斯盆地正是在此背景下逐渐于华北地块西部坳陷带中发育起来的一个坳陷盆地。该盆地在晚三叠世之后不同沉降时期的沉降差异、沉积速率的改变以及沉降中心的迁移都受到这一构造背景的制约。晚三叠世在总体挤压背景下, 盆地基底发生挠曲, 引起盆地较高的沉积速率及构造沉降作用。早、中侏罗世及早白垩世的两期沉降作用主要受燕山运动的影响, 应力场相应发生改变, 盆地的沉降作用相对减缓, 沉积速率也相应降低。燕山运动使得盆地西部

周缘褶皱隆起和形成逆冲断裂带, 致使地形高差悬殊, 造成西区不均匀的和较大的构造沉降; 另一方面加速了新生山系的风化剥蚀, 供给盆地大量陆源碎屑物质, 从而使盆地西部接受了较厚的沉积物。盆地东部因华北隆起进一步上升带动鄂尔多斯盆地东部平缓抬升, 二者的共同作用使得盆地的坳陷和沉降中心发生西偏, 从而使西区有相对高的沉积速率。

3 储层物性的变化

3.1 一维和二维模拟结果

研究区内 9 条剖面的岩石物性在压实过程中的一维及二维模拟结果表明, 侏罗系延安组的物性明显好于上三叠统延长组的物性。延安组现今的孔隙度及渗透率分别变化于 $8\% \sim 21\%$ 和 $0.1 \times 10^{-3} \sim 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 而延长组现今的孔隙度及渗透率分

别变化于4%~18%和 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。横向上,东部区上三叠统储集层的物性优于西部志丹区的物性,东北区上三叠统的现今孔隙度变化于9.5%~14%之间;东南区变化于8.9%~17.1%之间;西部志丹地区上三叠统储集层的现今孔隙度变化于10.3%~16.7%之间。地层的渗透率与孔隙度间有较好的对应关系(相关系数为0.7021)。

从地史过程看,延长油区侏罗系和三叠系储层的孔隙度在第一次沉降过程中,由于沉积物埋藏深度较浅(1 000~2 000 m)和由于随后的迅速抬升,其孔隙度一般都高于30%,个别可达40%以上,孔隙度随埋深并未发生大的改变。当盆地发生第二次和第三次沉降时,由于沉积物埋藏深度迅速增大(三叠系和侏罗系埋深分别为1 200~2 700 m和2 600~3 200 m),压实作用明显,各岩层孔隙度开始出现较大幅度的降低,当所有地层达到其最大埋深时(97 Ma),其孔隙度降至最低值。此后全区遭受较长时间的抬升剥蚀,直到1.64 Ma时接受了第四系黄土堆积,但其堆积厚度远小于区内的剥蚀厚度,这样由

于其下伏地层受到上覆地层的载荷作用减小,致使自97 Ma以来,各岩层孔隙度未发生明显变化。

3.2 三维模拟结果

利用克里金方法处理了延长油区所选探井实测的地层深度资料,并经过插值和外延,构成区内地层分布的三维数据体。以同种方式对各地层所得岩性资料进行插值处理,构成三维岩性分布数据体。模拟过程中以长6油层组作为区内主要储集层,长2+3油层组为次要储集层。

延长油区长2+3油层组孔隙度与渗透率的分布趋势非常相似。长2+3油层组现今的孔隙度与渗透率分布图表明东区的物性明显优于西区(图3a,b)。其中东区的东南部长2+3油层组存在一呈NNE向展布的高孔隙度和高渗透率区域。沉积相研究结果表明,这一高孔高渗带正是河道砂体所在部位。而在西部志丹勘探区,高孔隙度区和高渗透率区不但少而且分布很局限。与97 Ma时的孔隙度与渗透率分布图比较,长2+3油层组其孔隙度与渗透率自剥蚀事件发生以来基本未发生变化。

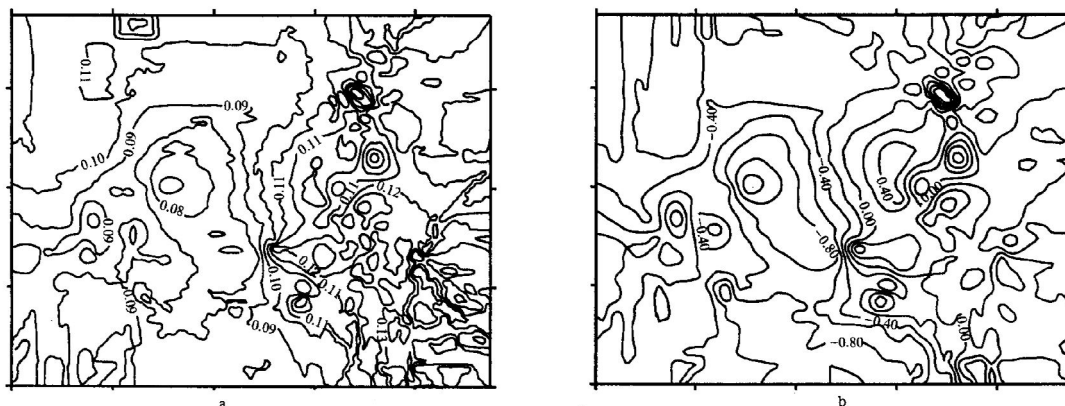


图3 长2+3油层组现今孔隙度(a),渗透率(b)分布图

Fig.3 Distribution of porosity (a) and permeability (b) in Chang 2+3 oil horizons

与长2+3油层组相似,长6¹油层组的高孔隙度及高渗透率发育区也主要集中于东区,且高值区的展布趋势也呈NNE向。且自剥蚀事件发生以来(97 Ma),其孔隙度及渗透率基本没有发生大的变化。长6²油层组的高孔隙度区与渗透率高值分布区也主要集中于东区,但分布范围较长6¹油层组有所减小,二者自97 Ma以来没有发生大的变化。与长6²油层组相比,长6³油层组的孔隙度高值区与渗透率高值区的分布范围略有扩大,同时在西部志丹出现了一明显的呈NE方向的高值区,该高值

区似与其它地区的高值区可以连在一起,暗示其为河道砂体所在地带。长6⁴油层组的高孔隙度与高渗透率区的分布面积较其它油层组有很大的扩展,而且分布均匀连通性好,这反映了在长6⁴油层组沉积时期砂岩沉积范围广,可能与此时期大量三角洲发育有关。渗透率的分布表现为中区和西北区较其他区明显地高。

对延长油区中侏罗统延安组 and 上三叠统延长组砂岩储集层成岩作用研究结果表明,假定砂岩的原始孔隙度为40%,中侏罗统延安组 and 上三叠统

延长组砂岩由压实作用造成的孔隙度丧失分别为15%(4%~25%)和20%(3%~32%);而由胶结作用造成的孔隙度丧失平均为10%(2%~20%),表明埋藏压实作用是导致中侏罗统延安组、尤其是上三叠统延长组砂岩储集层孔隙丧失的主要原因。显微镜下观察表明,延长组砂岩塑性碎屑如泥岩岩屑、特别是云母类含量(1%~10.4%,平均4.5%)远高于延安组砂岩(云母类0~5.5%,平均1.6%),这些塑性碎屑在埋藏压实作用过程中发生塑性变形、水化膨胀并形成假杂基挤入粒间孔隙中,将相当一部分原生粒间孔隙堵塞,从而使砂岩的孔隙度降低。三叠系三角洲相砂岩比侏罗系砂岩中较高的长石含量(分别为27.6%~59.6%,平均43.5%和22.6%~48.3%,平均30.8%)使砂岩堆积更紧密,从而导致三叠系三角洲相砂岩较高的孔隙度和渗透率进一步降低。另一方面侏罗系砂岩最大埋藏深度(1 200~2 700 m)较三叠系砂岩(2 600~3 200 m)浅,因而侏罗系砂岩遭受的埋藏压实作用程度三叠系砂岩为低,孔隙丧失较小。盆地第二及第三次沉降阶段西部沉降速率明显高于西部区,因而西部区由上覆地层载荷所引起的机械压实作用大于东部区,从而导致西部区砂岩的孔隙度丧失高于东部区。

由于砂岩中存在各种胶结物,因而胶结作用对储层物性的影响十分复杂。在所有胶结物中,碳酸盐胶结物是造成孔隙度(相关系数-0.637 0)和渗透率(相关系数-0.527 0)降低的主要胶结物。碳酸盐胶结物在三叠系三角洲相砂岩中的含量(平均含量为3.6%)比在侏罗系河流相砂岩(平均含量为1.1%)高,因此,其对三角洲砂岩的孔隙度和渗透率影响更大。其次是石英碎屑的压溶作用和由此产生的次生石英加大(含量0~7%,平均为2%)也导致了一部分孔隙的丧失和渗透率的降低。

晚期抬升期间(97~1.64 Ma),砂岩碎屑颗粒及碳酸盐胶结物的溶解作用对其物性起到了明显的改善。粒度较粗的侏罗系砂岩中长石(主要是斜长石)的溶解比细粒的三叠系三角洲相砂岩更普遍。这些晚期成岩作用在鄂尔多斯盆地中新世油气发生二次运移时^[11]对储层物性的改造起到了重要作用。

致谢:该研究工作得到了刘建昌博士的帮助和指导,特致谢忱。

参 考 文 献

- 胡见义,黄第藩. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京:石油工业出版社,1991.28~32
- 孙国凡,谢秋元,刘景平,等. 鄂尔多斯盆地的演化叠加与含油气性——中国大陆板块内部一个大型盆地原型分析[J]. 石油与天然气地质,1986,7(4):356~368
- 田在艺,张庆春. 中国含油气沉积盆地论[M]. 北京:石油工业出版社,1996.77~78
- 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,1990.93~122
- Allen P A, Allen J R. Basin analysis: principles and applications[M]. Oxford: Blackwell Scientific Pub, 1990. 239~257
- Bond G C, Komins M A, Devlin W J. Thermal subsidence and eustasy in the Lower Paleozoic miogeocline of western North America[J]. Nature, 1983,306:775~779
- Sclater J G, Christie P A F. Continental stretching; an explanation of the post-mid-Cretaceous of the Cretaceous of the North Sea Basin[J]. Jour. Geophysical Res, 1980,85(B7):3 711~3 739
- Steckler M S, Watts A B. Subsidence of the atlantic type continental margin off New York[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 42:1~13
- Steckler M S, Watts A B. The gulf of lion; subsidence of a young continental margin[J]. Nature, 1980,287:425~429
- 张国伟,孟庆任,于在平,等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D辑),1996,26(3):195~200
- Zhao M W, Ahrendt H, Wemmer K, et al. Silurian - Devonian and Jurassic thermal events in the Ordos Basin, China: indications from K - Ar dating on illites[J]. Acta Geologica Sinica, 1996,9:435~446

EFFECT OF BURIAL HISTORY ON PHYSICAL PROPERTY OF SANDSTONE RESERVOIRS:

TAKE YANCHANG OIL REGION IN NORTH SHAANXI AS AN ECAMPLE

Luo Jinglan¹ Zhang Chengli¹ Yan Shike² Wu Fuli² Li Yuhong²

(1. Northwest University, Xian, Shaanxi; 2. Yanchang Petroleum Administration, Yongping, Shaanxi)

Abstract: Yanchang Oildom has undergone two uplift-erosion, one hiatus and three subsidence processes since Late Triassic. The first subsidence stage(225~208 Ma) were mainly tectonic subsidence under compression; the second and the

(下转第136页)

杰、况军、王绪龙、薛新克、张军、燕启胜、吴晓智、刘得光等同志在有关资料的搜集上给予了大力协助,西北大学地质学系朱玉双、刘彤滨、高胜利、林艳萍、高红同志参与了本课题其它部分的工作,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 王震亮,陈荷立.有效运聚通道的提出与确定初探[J].石油实验地质,1999,21(1):71~75

CHARACTERISTICS OF JURASSIC GAS POOLS IN JUNGGAR BASIN

Wang Zhengliang¹ Chen Heli¹ Song Yan²

(1. Department of Geology, Northwest University, Xian, Shaanxi; 2. Department of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, CNPC, Beijing)

Abstract: Middle-Lower Jurassic coal measures are the main source rocks of gas pools in Junggar Basin; sand bodies, faults and unconformities are migration pathways; the upper parts of Sangonghe and Badaohe Formations are regional cover rocks. Several hydrocarbon migration-accumulation systems could be divided within the basin such as Mosowan-Shixi migration-accumulation system containing gas pools of middle-lower abundance; Shihezi-Hutubi migration-accumulation system in which important hydrocarbon discovery might be found; Dixi-Fukang system in which Sangonghe Formation Gasfield was discovered and northeast Fukang region may be another favourable area; Xiaoguai-Chepaizi and Mahe systems which are less favourable for gas accumulation. In summary, two types of primary and residual secondary gas pools including 4 subtypes were found in Jurassic System in Junggar Basin.

Key Words: Middle-Lower Jurassic; coal measures; gas pool; migration-accumulation system; Junggar Basin

(上接第127页)

third subsidence stages (203 ~ 157 Ma and 138 ~ 97 Ma respectively) were mainly sedimentary loading subsidence in tension environment. Simulation results show that the physical property of Middle-Lower Jurassic Yanchang Formation reservoir is much better than that of the underlying Upper Triassic Yanchang Formation. Burial compaction was the primary cause resulting in 15% porosity decrease of the sandstone of Jurassic sandstone and 20% that of Triassic sandstone. Mechanical compaction of overlying sedimentary loading formed in the second and the third subsidences resulted in worse physical property of the reservoir in the west part than that in the east part of the study area. It is suggested that the 4 + 5 members of the Yanchang Formation have favourable trap function and could be regional caprock of Chang-6 member

Key Words: Yanchang Oil region; burial history; evolution; reservoir physical property