

鄂尔多斯北部盆地古流体动力场的演化特征^{*}

杜 强 胡伏生 万 力 陈劲松 (中国地质大学水资源与环境科学系 北京 100083)
史贵军 (大庆石油管理局 163001)

摘要 以鄂尔多斯北部盆地为例,针对古流体动力场的演化问题,应用三维数值模拟技术,恢复了上古生界不同时期地层厚度和地质、水文地质条件;推导了考虑多个要素的地下流体三维数学模型,并依据不同时期古流体动力场特征,初步分析了上古生界油气的运移聚集规律。结果表明,在鄂尔多斯北部盆地,运用三维数值模拟方法能够比较完善地描述古流体动力场的特征和比较准确地指明油气运移和聚集区带,为天然气勘探靶区的确定提供比较可靠的依据。

关键词 古流体 演化 动力场 三维数值模拟 油气运移聚集

中国图书资料分类法分类号 P618.131.1

作者简介 杜 强 男 34 岁 博士 水文地质及工程地质

1 前言

流体动力场特征影响和控制油气的运移和聚集,要动态地反映油气的运移必须模拟流体动力场的演化。流体动力场的模拟涉及地史、热史、生烃和排烃史模拟,问题复杂难度大,以往的研究主要为平面或剖面二维流模拟。由于油气的生成、运移和聚集存在于地下一定范围的空间中,流体真实的流动形式为三维流,用平面或剖面二维模拟并不能很好地再现流体动力场的演化特征。因而如何从三维的角度恢复和模拟古流体动力场的演化,就成为油气成藏研究中的一个重要问题。针对这一问题,本文应用三维数值模拟技术,以鄂尔多斯北部盆地为例,对古流体动力场的恢复模拟及演化进行了探讨。

鄂尔多斯盆地是我国中部一个大型含油气盆地,上古生界沉积以来,盆地总体上一直在稳定沉降。三叠系中统和上古生界达到生油气门限,它们本身具备生油气、运移、储集和覆盖的成藏条件。上古生界是本次研究的目的层。中三叠世以来,鄂尔多斯盆地尽管经过几次构造运动,但对于上古生界而言,构造运动对其生储盖的成藏条件破坏作用不大,只是在构造运动的影响下,随着盆地沉积中心的转移,油气在古流体动力场作用下不断的运移、聚集和演化。本文对上古生界古流体动力场的恢复与模拟,是在盆地构造运动主要以垂向为主这一前提条件下进行的。首先,根据压实方程恢复上古生界不同时期地层厚度,进而恢复不同时期地质和水文地质条件。在此基础上,推导了考虑蒙脱石脱水,生排烃、水热增压及压实4个要素的地下流体三维数学模型,用有

限差分法进行了模型求解,并依据不同时期古流体动力场特征,初步分析了油气的运移和聚集。

2 盆地水文地质演化模型

地质、水文地质条件及流体动力场的演化是一个连续渐变的过程,而目前用于水动力场模拟的数学模型要求相对稳定的地质、水文地质模型,这就给流体动力场的恢复带来困难。为了既反映地质、水文地质模型的变化又可应用成熟的水动力场模拟技术,这里将连续变化的演化过程分为几个阶段,并认为每个阶段内地质、水文地质模型相对稳定。由此,将 241 Ma 以来的时间划分为:中三叠世 241~235 Ma;晚三叠世 234~208 Ma;侏罗纪 207~146 Ma;白垩纪 145~65 Ma;现今时期 64~0 Ma。

2.1 不同时期地层厚度的恢复

不同时期地层厚度的恢复是在压实方程的基础上,假定地质历史时期岩石骨架的体积不因压实作用而发生变化;岩石体积的变化主要表现为孔隙体积的变化。在这一假设条件下推导出现今单元岩层厚度(T_N),在早期不同地层底板埋深(Z_0)条件下单元岩石厚度(T_0)的表达式:

$$T_0 = T_N + \frac{\rho_s \Phi_{os}}{C_s} [e^{-C_s Z_N} (1 - e^{-C_s T_N}) - e^{C_s Z_0} (1 - e^{-C_s T_0})] + \frac{\rho_m \Phi_{om}}{C_m} [e^{-C_m Z_N} (1 - e^{-C_m T_N}) - e^{-C_m Z_0} (1 - e^{-C_m T_0})], \quad (1)$$

式中 Z_N —— 现今底板埋深;
 T_N —— 现今单元岩层厚度;
 Z_0 —— 早期底板埋深;
 T_0 —— 早期单元岩石厚度;
 Φ_s 、 Φ_m —— 砂、泥岩孔隙度;
 ρ_s 、 ρ_m —— 砂、泥岩含量百分比;

^{*} “九五”攻关课题的一部分(编号:96-110-08-01-04)

$\Phi_{\text{os}}、\Phi_{\text{om}}$ —— 砂、泥岩地表孔隙度;
 $C_s、C_m$ —— 砂、泥岩压实系数。

公式(1)为超越方程,求解较为困难,这里用卡比迭代法编制了有关计算程序。公式中参数,如砂、泥岩含量百分比、地表孔隙度、压实系数以及上古生界各组(太原组、山西组和石盒子组)在五个不同时期的底板埋深等参数,通过资料对比分析后确定。

分别对研究区 22 口井上古生界各组在中三叠世末、晚三叠世末、侏罗纪末、白垩纪末的地层厚度、顶底板埋深进行恢复计算。对每一时期末 22 口井的地层厚度采用地质统计学中的克里格内插方法,可得到该时期其他控制点上的顶底板埋深。进一步结合构造、岩性和古地理条件,恢复了不同时期的地质模型,为水文地质模型和流体动力场模型的建立奠定了基础。

2.2 不同时期水文地质模型及概化

相应于不同时期的地质模型,建立起 5 个水文地质演化模型,分别为:中三叠模型、晚三叠模型、侏罗模型、白垩模型和现今模型。为了建立描述不同时期流体动力场的数学模型,需将 5 个水文地质模型进行概化。模型概化考虑了以下几个方面:上古生界有河道、冲洪积扇、冲洪积平原、三角洲及滨海湖相沉积,这些沉积特征在各时期水文地质模型中都通过渗透性参数的分区体现;上古生界顶部为巨厚的泥岩沉积,作为区域盖层限制了该地层中流体与外界的联系,下部边界为风化壳,这里将上下边界都概化为隔水边界。区域周边界都取作第二类边界。上古生界水动力场是一个承压水系统,流体有多种流动形式,既有压实流、重力流,也有穿层流动和顺层流动,流体的流动都符合达西定律。

3 盆地上古生界流体动力场的演化模拟

3.1 描述古流体动力场的数学模型

在以上概化水文地质模型的基础上考虑了压实作用的影响,建立了以水头为变量描述水动力场演化的三维数学模型。模型的建立以如下假设为前提:

- a. 孔隙介质由骨架和水构成。它们共同承担上覆地层的总负荷,骨架的有效应力 σ 和水的压力 P 与上覆荷载 S 遵循太沙基原理,即 $S = \sigma + P$;
 - b. 岩石骨架是不可压缩的;
 - c. 地层在压实过程中横向上不变,仅在纵向上发生变化;
 - d. 岩石骨架由沙泥岩组成;
 - e. 介质中流体的流动符合达西定律。
- 在这些假设基础上,令单位时间内单位体积含

水层中由于蒙脱石的脱水而增加的流体的量为 W_1 , 由于生烃排水而增加的流体量为 W_2 , 那么在连续性方程的基础上,经一系列推导可得到考虑压实作用、水热增压、蒙脱石脱水及生烃排水作用的水动力三维数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial H}{\partial z}) + \frac{W_1}{\rho_w} + \frac{W_2}{\rho_w} + \Phi \beta \frac{\partial T}{\partial t} + \alpha (1 - \Phi) \frac{\partial S}{\partial t} = \rho_w g [\Phi \beta_p + \alpha (1 - \Phi)] \frac{\partial H}{\partial t}, \tag{2}$$

式中 K —— 渗透系数;
 H —— 水头;
 ρ_w —— 地层水密度;
 β_p —— 地层水等温条件下的压缩系数;
 β —— 地层水等压条件下的膨胀系数;
 α —— 压缩系数。

式(2)的物理意义为,单位时间内多孔介质水头上升一个单位所引起的流体的变化量是由于流体沿 $X、Y、Z$ 方向流动的变化量与压实作用、水热增压、蒙脱石脱水和排烃引起的流体变化量之和。

3.2 模型参数确定

模型(2)在实际应用时将蒙脱石脱水一项忽略,这是由于有关蒙脱石脱水强度资料少,不易掌握,而且这部分量较少,将其忽略不影响模型的合理性。模型(2)涉及到多个参数,如渗透系数、地层孔隙度、等压膨胀系数、地温随时间变化率、压缩系数、上覆沉积物沉积速率、地层水密度、等温压缩系数。地层水的等温压缩系数和等压热膨胀系数取作常数,分别为 $4.78 \times 10^{-10} / \text{Pa}$ 和 $5.00 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,地层的压缩系数 α 按公式 $\alpha = b \cdot \Phi / (1 - \Phi)$ 计算,其中 $b = C / (\rho - \rho_w) g$; $C、\rho、\rho_w$ 分别为压实系数(由压实方程得到)、地层平均密度和地层水密度。沉积速率取某一段时间段内的平均值。地温变化率取其他子专题研究成果。渗透系数的确定考虑了实测渗透率和不同沉积的渗透性差异,通过模型调试而确定。有关参数见表 1

模型求解采用数值法中的有限差分法。首先将渗透区域进行剖分,剖分单元体为六面体,在平面上

表 1 与流体动力场模拟有关参数表

参 数 名 称	取 值	备 注
等温压缩系数 β_w/Pa	4.78×10^{-10}	
等压热膨胀系数 $\beta/^\circ\text{C}$	5.00×10^{-5}	地层水
地层水密度 $\rho_w/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.05	
动力粘滞系数 μ/Pas	5×10^{-4}	
地层平均密度 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\rho = 2.66 + 0.00012 * Z$	

为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ 的正方形网格, 共 62 列 46 行, 垂向上分为 8 层。剖分为 22 816 个单元体。平面网格剖分图见图 1。计算初始时刻为中三叠世距今 241 Ma, 分别按 5 个模型计算。前一时段的输出作为后一时段的输入。模型间也如此传递。时间步长为 1 Ma。初始水位由上古生界原始厚度和三叠系厚度及埋深估计得到。

3.3 古流体动力场模拟结果

计算结果为中三叠世、晚三叠世、中侏罗世、晚侏罗世和现今 5 个时期末的水头值。运用水头、压力、水势、气势的关系式可将水头转化为单位质量的流体势, 即水势和气势。平面图表现为上古生界的水势和气势。剖面图表现整个上古生界在不同位置方向的气势。剖面线的布置见图 1。不同时期末水势和气势以太原组在晚三叠世末和白垩纪末水势和气势平面图、剖面图为例给出, 见图 2 至图 5。

5 个时期末的模拟图件反映出, 研究区流体动力场演化是一个相对连续的过程。同时期水势和气势分布相似, 气势比水势变化要小些, 不同时期流体动力场特征有明显异常, 由晚三叠世到侏罗纪, 中侏罗世到晚侏罗世, 晚侏罗世到白垩纪变化都较大。

值得提出的是, 现今流体势的分布形基本与由声波时差得到现代流体势分布相近, 这一点表明, 古流体势演化模拟的数学模型基本能刻画不同时期流体动力场的特征, 也就是说前面各时期流体动力场的计算结果相对是可靠的。

4 古流体动力场演化特征与天然气聚集的初步分析

流体的运移受流体势分布的控制, 不同的流体 (水、气) 在各自的势场作用下, 按各自势场的分布规

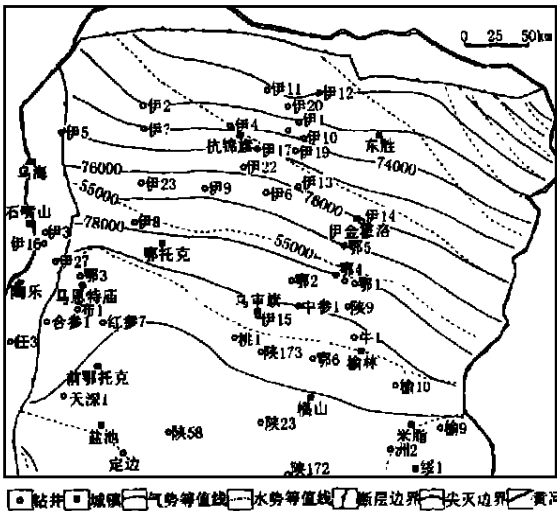


图 2 晚三叠世末太原组水势气势等值线图

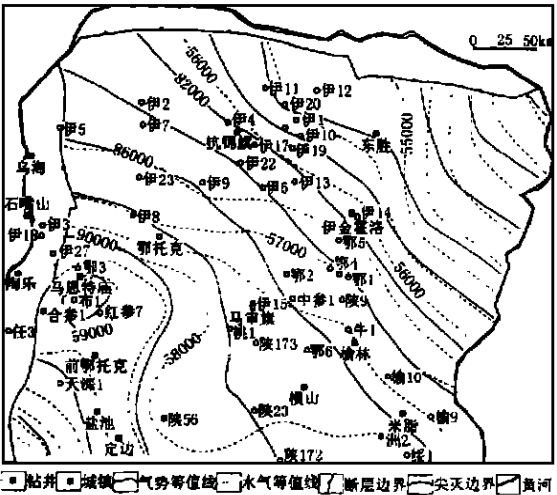


图 3 白垩纪末太原组水势气势等值线图

律运移, 油气一般聚集在适宜构造条件下的流体低势区和相对低势区。按以上观点, 下面简要分析鄂尔多斯盆地上古生界流体动力场演化与天然气聚集的关系。鄂尔多斯盆地上古生界油气运移, 在中三叠世和晚三叠世没有明显的聚集地。流体由盆地中心向北和北东方向运移。从侏罗纪始, 研究区流体势出现明显的低势区和相对低势区, 天然气开始聚集; 中侏罗世末, 流体向北方向运移, 气势比水势的变化缓, 相对低势区在前鄂托克地区和定边乌审和横山之间, 也即 3 个排烃中心之间形成相对低势区, 这些相对低势区有利于油气的聚集; 晚侏罗世末流体动力场的特征及分布形式与中侏罗世末相似, 相对低势区在前鄂托克、横山、鄂 6 井之间, 该区为天然气的有利聚集区; 白垩纪末, 流体总的流向为北东方向, 流体势的相对低势区向北东方向偏移, 在乌审, 鄂 6 井和盐池之间形成相对低势区, 有利于油气的聚集。到现今, 流体总的运移方向近东西方向。流体势的相

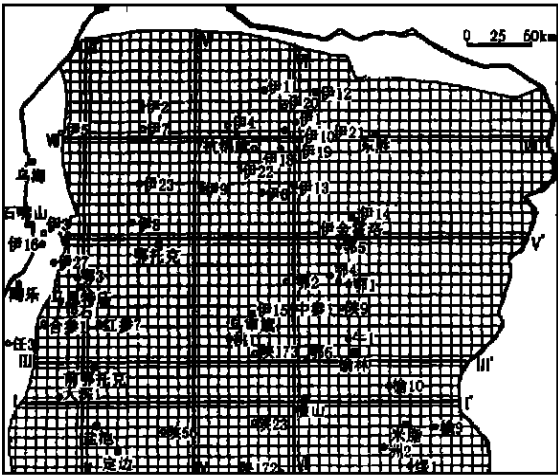


图 1 网格剖分平面图及剖面位置

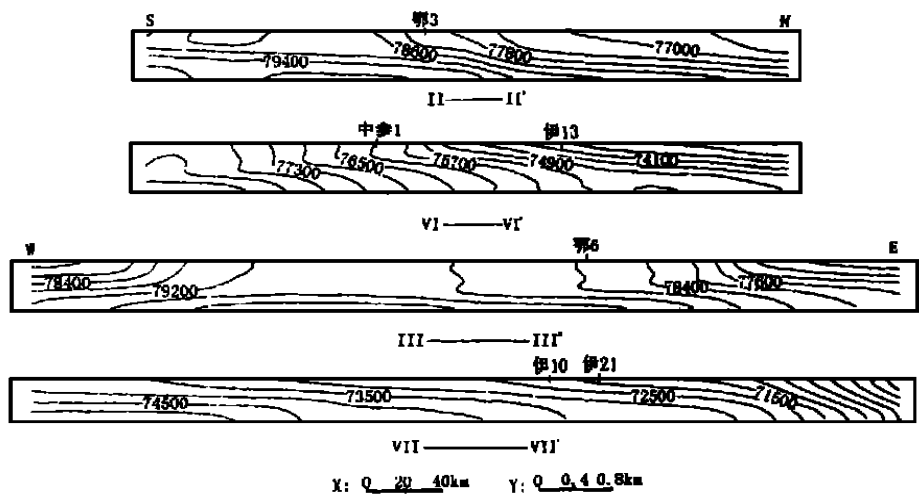


图 4 晚三叠世末气势剖面图

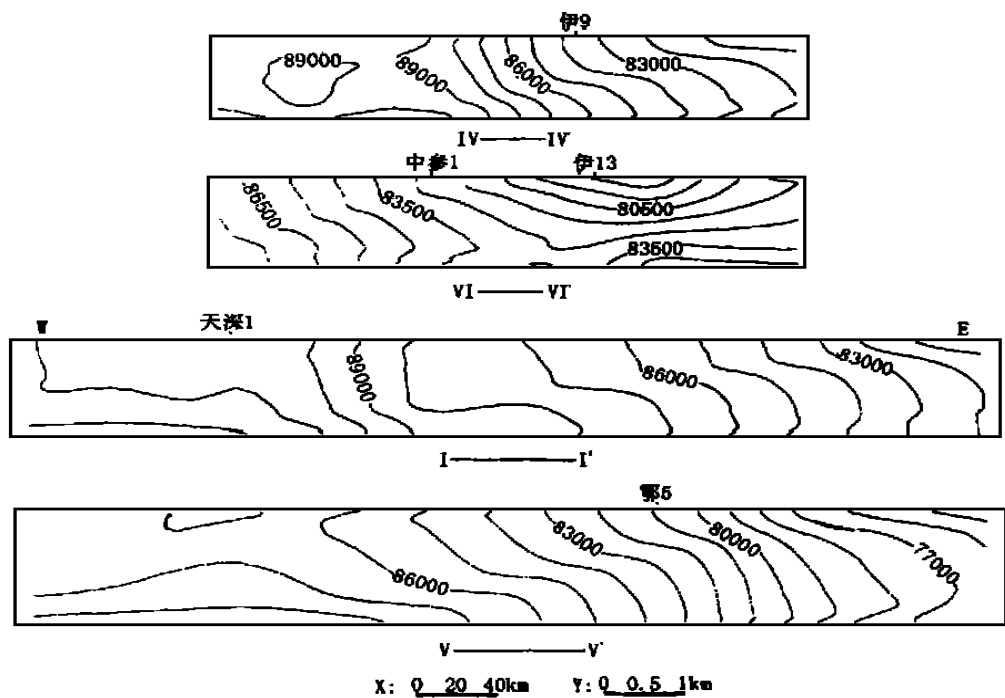


图 5 白垩纪末气势剖面图

对低势区出现在鄂 6 井附近。这一地区为油气的有利聚集区。

纵观研究区流体动力场演化过程可看出,古流体动力的发育明显与构造有关;流体势的分布受沉积条件的制约。一般在沉积中心为高势区,盆地隆起区为低势区;流体势的相对低势区可能是天然气的有利聚集区;盆地流体动力场主要受压实作用的控制,重力流的影响不明显。

5 结论

- a. 鄂尔多斯盆地上古生界是一个封闭、统一承压的地下流体动力系统,流体主要是承压水流。
- b. 鄂尔多斯盆地上古生界油气运移,在中三

叠世和晚三叠世没有明显的聚集地。流体由盆地中心向北、北东方向运移。从侏罗纪始,研究区流体势出现明显的低势区和相对低势区,天然气开始聚集;在中侏罗世末,流体向北方向运移,气势比水势的变化缓;晚侏罗世末流体动力场的特征及分布形式与中侏罗世末相似;白垩纪末,流体总的流向为北东方向,流体势的相对低势区向北东方向偏移,现今流体总的运移方向近东西方向。

- c. 只有运用三维数值模拟方法,才能比较完善地描述鄂尔多斯盆地上古生界流体动力场的特征和流体运移的多种形式,才能比较准确地指明流体运移和聚集区带,为天然气勘探靶区确定提供依据。

“西气东输”工程沿线煤层气资源开发潜力评价^{*}

吴建光 张延庆 张遂安 (中联煤层气有限责任公司 北京 100011)
叶建平 (中国矿业大学资源开发工程系 北京 100083)

摘要 “西气东输”工程经过多个大型煤层气田,总资源量近 10 万亿 m^3 ,相当于塔里木盆地的天然气资源量,工程沿线的沁水、鄂尔多斯盆地是我国煤层气勘探开发的重点区域,已经取得了煤层气产气量的突破。“西气东输”工程的实施,为勘探开发煤层气创造了管网条件。

关键词 西气东输 煤层气 资源 开发潜力

中国图书资料分类法分类号 P618.11

作者简介 吴建光 男 38 岁 高级工程师 煤田地质

1 煤层气开发机遇与资源分布

1.1 煤层气开发机遇

从新疆到甘肃、宁夏、陕西、内蒙、山西、河南、安徽等省区,分布着许多富含煤层气的矿区(煤田),加快这些地区煤层气资源的勘探开发,将是对“西气东输”工程气源的补充。另外,“西气东输”工程的实施为煤层气的勘探开发创造了管网条件,将会增强国内外投资者的信心,有利于我国煤层气产业环境的形成。

1.2 沿线煤层气资源分布

“西气东输”工程西起塔里木,东达上海,穿越中国腹地主要能源基地。它对开发利用西部丰富的天然气资源,解决东部地区天然气需求紧缺状况具有巨大的意义。煤层气作为非常规的洁净能源,其成分 95% 以上是甲烷,热值高达 $33.494 \sim 37.681 \text{ MJ/m}^3$,可以与天然气混输。“西气东输”工程经过多个大型煤层气田,总资源量近 10 万亿 m^3 ,从西到东

依次为塔北、淮南、鄂尔多斯西部、渭北、鄂尔多斯东缘、沁水、豫西、两淮等。

1.3 沿线煤层气勘探现状与发展趋势

我国煤层气资源丰富,可以说“西气东输”工程沿线是煤层气资源主要分布地区。近十余年的煤层气勘探和开发试验工作也主要集中于该工程的沿线,并取得了显著成果。例如,在沁水盆地的晋城、潞安、寿阳目标区,鄂尔多斯东缘的柳林、三交、石楼、三交北区块,渭北的韩城目标区,淮北的宿南向斜,淮南的新集等区块都打出高产煤层气井,发现了大型煤层气田。其中,一些区块已具有商业性规模开发的前景。

依托“西气东输”工程的实施,将沿线煤层气的勘探、生产、输送、利用纳入统一规划,协调施工,同时积极吸引外资,加快煤层气开发,发挥煤层气资源的补充作用。

2 “西气东输”沿线煤层气资源开发潜力

2.1 两淮地区

包括徐州、豫东永夏、淮北、淮南 4 个目标区,含

^{*} 国家自然科学基金资助项目,编号:79842001

参考文献

- 1 陈荷立等译·压实与流体运移·石油工业出版社,1981
- 2 李明诚·石油与天然气运移·石油工业出版社,1987
- 3 薛禹群,谢春红·水文地质学的数值法·煤炭工业出版社,1980
- 4 王振亮,陈荷立·鄂尔多斯盆地中部上古生界天然气运移聚集特征分析·石油勘探与开发,1998;(6)

(收稿日期 1999-12-17)

EVOLUTIVE CHARACTERISTIC OF PALAEOFLOW FIELD IN NORTHERN ORDOS BASIN

Du Qing Hu Fusheng Wan Li Chen Jingsong (China University of Geoscience, Beijing)
Shi Guijun (Daqing Petroleum Administration)

Abstract Taken the northern Ordos basin as example, the research focuses on the evolution of palaeoflow field with 3D numerical modeling to revert the strata thickness, geologic and hydrogeologic conditions in different era of late palaeozoic. First, the palaeozoic stratum thickness in different era is reverted according to the compression equation, the geologic and hydrogeologic conditions in different era are reverted, too. Second, based on the conceptual model of palaeohydrogeology, the mathematics model describing the palaeoflow and accounting for several factors, such as compression, hydrocarbon yield and dehydration of clay mineral, is deduced. The finite difference approach is used to solve the mathematics model. The result indicates that the evolution of palaeoflow field can be perfectly demonstrated by using three dimensional modeling of palaeoflow in northern Ordos basin, and the favorable area, in which the oil and gas is probably stored, can be ascertained.

Keywords palaeoflow; evolution; dynamic field; three-dimensional numerical modeling; oil and gas migration and accumulation