鄂尔多斯盆地生烃过程与流体流动及铀矿化关系

薛春纪[1]， 池国祥[2]， 薛 伟[3]， 曹纪虎[1]

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室；中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院，北京 100083
2. 加拿大里贾纳大学 地质系，萨斯喀彻 里贾纳 S4S 0A2
3. 中国核工业地质局 208 大队，内蒙古 包头 014010

Xue Chunji[1]， Chi Guoxiang[2]， Xue Wei[3]， Cao Jihu[1]

1. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources*; *School of Earth Sciences and Resources*, *China University of Geosciences*(*Beijing*), *Beijing* 100083, *China*
2. *Department of Geology*, *University of Regina*, *Regina* S4S 0A2, *Saskatchewan*, *Canada*
3. 208 *Geologic Party*, *China Nuclear Geology*, *China National Nuclear Corporation*, *Baotou* 014010, *China*

Xue Chunji, Chi Guoxiang, Xue Wei, et al. Relationship between hydrocarbon generation and basinal fluid flow and uranium mineralization in the Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(5): 019-028

Abstract: The Ordos Basin is not only an important uranium mineralization province but also a major producer of oil, gas and coal in China. The genetic relationship between uranium mineralization and hydrocarbons has been recognized by a number of previous studies, but it has not been well understood in terms of hydrodynamics of basin fluid flow. In a previous study we have demonstrated that the preferential localization of uranium mineralization in the upper part of the Jurassic strata may have been related to the interface of an upward flowing, reducing fluid and a downward flowing, oxidizing fluid, and that this interface may have been controlled by the interplay between the fluid overpressure which was related to disequilibrium sediment compaction and drove the upward flow and the topographic relief which drove the downward flow. In the present study, we carried out numerical modeling for the contribution of oil and gas generation to the development of fluid overpressure, in addition to sediment compaction and heating. Our results indicate that when hydrocarbon generation was taken into account, fluid overpressure during the Cretaceous was more than doubled in comparison with the simulation when hydrocarbon generation was not considered. Furthermore, the fluid overpressure dissipation after the ceasing of sedimentation slowed down relative to the non-hydrocarbon generation case. These results suggest that hydrocarbon generation may have played an important role in uranium mineralization, not only in providing reducing agents required for the mineralization, but also in contributing to the driving force to maintain the upward flow against the pushing of topography-driven, downward flow, thus helping stabilize the interface between the two fluid system and the localization of uranium mineralization.

Key words: Ordos Basin; uranium deposits; hydrodynamics; hydrocarbon generation; fluid overpressure; fluid flow; numerical modeling

摘 要：鄂尔多斯盆地是我国有机能源矿产重要产区，作为铀成矿省的重要性备受关注。鄂尔多斯盆地铀矿化与烃类的关联性不断被认知，但从盆地流体动力学角度开展的研究鲜见。先前的研究表明，铀矿化在侏罗系上部地层的优先定位机制与还原渗出流和氧化渗入流两种流体系统的混合界面密切相关，混合界面的位

收稿日期：2011－07－11；**修回日期**：2011－08－23
基金项目：国家自然科学基金项目(41072069，40772061，40930423)；国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB421005)；长江学者和创新团队计划项目(IRT 0755)；高等学校学科创新引智计划项目(B07011)；加拿大发明基金项目
作者简介：薛春纪(1962—)，男，教授，博士生导师，从事矿床学、矿产普查与勘探专业教学和科研工作。E-mail：chunji.xue@cugb.edu.cn

置受控于流体超压力与地势差的相互作用。流体超压力驱动渗出流,与不均衡沉积压实作用有关,而地势差控制渗入流。研究中除考虑沉积压实与地势差两个因素外,同时还考虑了盆地油气生成对流体超压力的影响。研究结果表明,考虑生烃的影响时,白垩纪盆地流体超压力是不考虑生烃时的两倍还高,且相对于没有生烃效应的情形,沉积停止之后流体超压的消失过程极为缓慢。因此,笔者认为生烃效应在鄂尔多斯盆地铀矿化中发挥重要作用。生烃不仅为铀矿化提供还原剂,而且驱动渗出流与地势差控制的渗入流混合有利于两种流体系统以及铀矿化层位在混合界面中保持稳定。

关键词:鄂尔多斯盆地;铀矿床;流体动力学;生烃过程;流体超压力;流体流动;数值模拟

中图分类号:P618.13;P619.14 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2321(2011)05-0019-10

鄂尔多斯盆地是油气和煤重要产区,新近又发现重要铀矿化[1-3]。鄂尔多斯盆地铀矿化与有机质或油气的关系不断被认知[4-9],通常认为氧化-含铀流体遇到还原剂时发生铀矿化[10-11]。盆地流体动力学系统对两种流体混合带的控制作用鲜有报道,直到最近才引起关注[9]。

Xue 等主要考虑不均衡沉积压实作用和地势差两个因素,数值模拟了鄂尔多斯盆地内流体流动系统[9]。基于数值模拟结果,认为在侏罗—白垩纪盆地边缘相对抬升和盆内地层轻微变倾过程中,发育出两种流体流动系统,即渗出流和渗入流。渗出流系统受盆地上覆沉积压实作用产生的超压力驱动,起源于盆地下部,从盆地中心和下部流向盆地边缘和浅部;渗入流体系统受重力驱动,从盆地边缘向下流向盆地中心[9]。两种流体系统混合界面的位置受两种流体驱动力相互作用的控制(两种驱动力即压实驱动力与地势差驱动力),且在这里氧化-含铀流体与含烃-还原流体发生反应并造成铀矿物的沉淀[9]。由于不均衡沉积压实作用对流体超压力形成的影响相对较小(大约 2.0 MPa),所以两种流体系统间过渡带的位置主要受地势差控制[9]。

许多研究表明,沉积盆地生烃对流体超压力的产生起主要作用[12-16],但以往研究中没有考虑这种贡献[9]。为了更深入理解鄂尔多斯盆地铀矿化定位机制,本文增加了数值模拟控制因素,除不均衡压实作用之外,还考虑了盆地生烃对产生流体超压力的影响。为此,选择鄂尔多斯盆地代表性剖面,分考虑与不考虑盆地生烃过程两种情形,分别进行流体超压力演化、流体流动速率以及温度数值模拟,然后进行模拟结果对比研究,以揭示生烃过程对盆地流体流动系统的影响以及铀矿体定位机理。

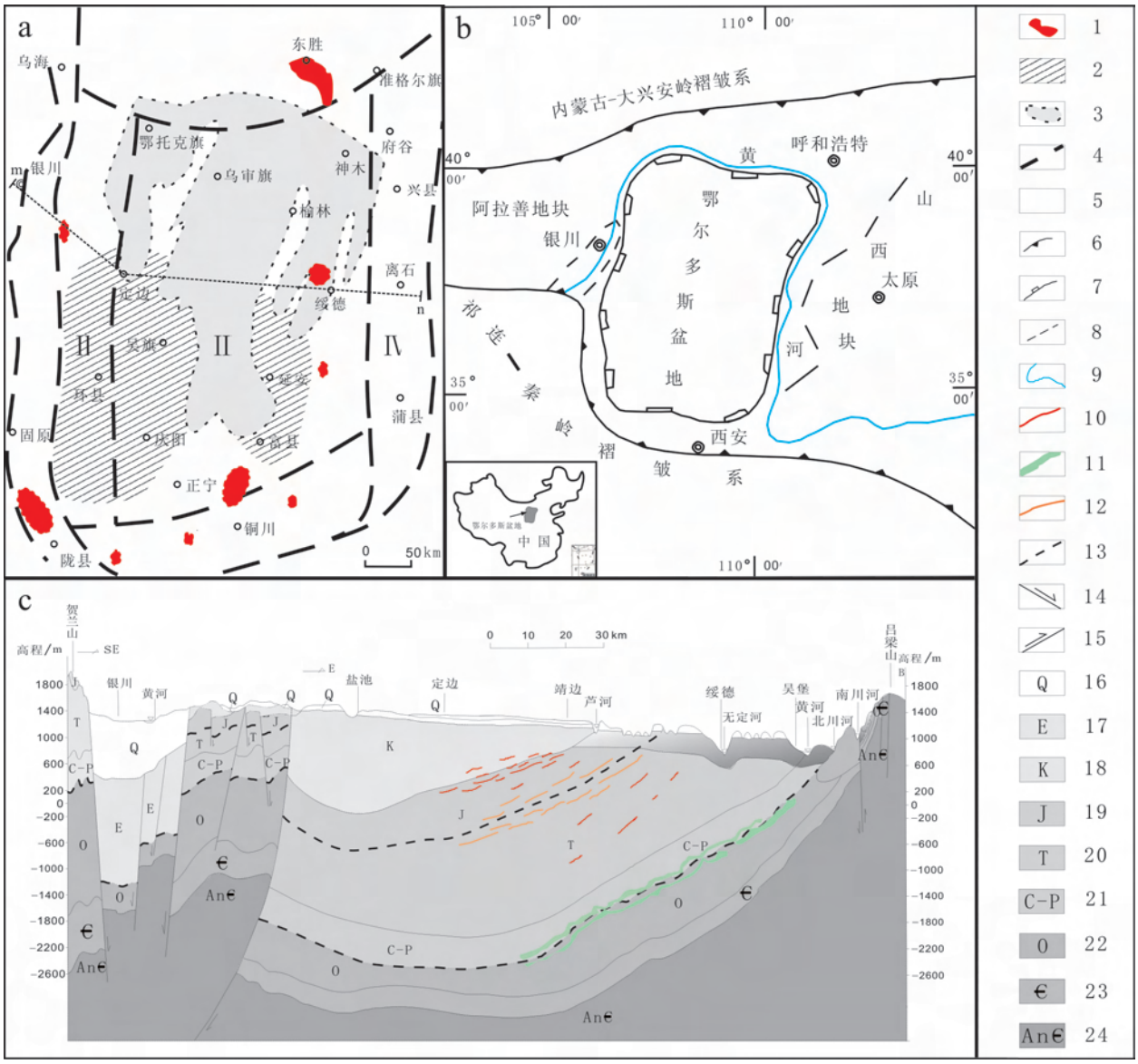
1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于北侧的内蒙古—大兴安岭海西期造山带与南侧的祁连—秦岭印支期造山带之间,西临阿拉善地块,东与山西地块毗邻(图 1a 和图 1b)。它是在华北陆块基础上发育起来的中生代陆内盆地,其直接基底为古生代沉积岩。作为华北陆块的有机构成部分,其下有前寒武纪结晶基底岩石。因油气藏在古生界和中生界内均有发现[3],古生界常被看作鄂尔多斯盆地的组成部分而不是基底(图 1c)。

古生代岩石包括寒武—奥陶系的海相碳酸盐岩和泥岩、志留—泥盆系缺失、石炭系海陆交互相含煤沉积和二叠系河流湖泊相含煤建造。从三叠纪开始,鄂尔多斯盆地发育成相对独立演化的陆内盆地,充填了三叠系、侏罗系和白垩系河流湖泊相沉积。三叠系从下到上为刘家沟组、和尚沟组、纸坊组及延长组,与下伏二叠系连续沉积。侏罗系与下伏三叠系不整合接触,从下到上依次是富县组、延安组、直罗组、安定组和芬芳河组。下白垩统志丹群与下伏侏罗系不整合接触,从下到上包括宜君组、洛河组、华池组、罗汉洞组和泾川组。中生界在岩性上包括多种砂岩和页岩。盆地自白垩纪晚期以来整体隆起并形成多个地堑系[2-3,7]。

鄂尔多斯盆地不同于克拉通盆地,内部相对稳定,边缘构造活动明显。盆地内部地层多呈现水平岩层或稍有 1~3°的倾角,但盆地的边缘因燕山运动发生明显的褶皱和断裂。整个盆地在中生代表现为东部抬升,西部相对下陷的整体特征[3]。

上、下古生界中均发现烃源岩,大规模天然气估计在侏罗—白垩纪生成[17]。沿着鄂尔多斯盆地的边部,已发现多处铀矿床和矿点,较集中分布的地区包括东北缘东胜—准格尔旗、东缘绥德—米脂和延长—延川、东南缘黄陵—彬县和韩城—白水、西南缘陇县—平凉、西缘磁窑堡—石沟驿、北缘鄂托克旗(图 1a)。较重要的铀矿床包括东胜地区的神山沟、陇县地区的国家湾、黄陵地区的店头[9]。除个别矿点见碳质页岩中铀矿化外,大部分铀矿化出现在砂岩中,铀矿体呈板状。赋矿地层包括三叠系刘家沟



1—铀矿化富集区；2—油田分布区；3—天然气分布区；4—基本构造单元界线；5—基本构造单元编号；6—板块缝合带；7—鄂尔多斯盆地边界；8—断块构造；9—黄河水系；10—铀矿化层位；11—天然气藏；12—油藏；13—不整合面；14—正断层；15—逆断层；16—第四系；17—古近系；18—白垩系；19—侏罗系；20—三叠系；21—石炭—二叠系；22—奥陶系；23—寒武系；24—前寒武系；m-n 方向剖面为图 c。

图 1　鄂尔多斯盆地基本构造单元和能源矿产分布(a)、区域构造位置(b)和东西方向构造-沉积地质及能源矿产层位概念剖面(c)

Fig. 1　Basic structure units and energy-resource distribution (a), tectonic location (b) and a structure-sediment model section in EW-direction and energy-resource strata (c) of the Ordos Basin, China

组、和尚沟组、纸坊组及延长组，侏罗系延安组、直罗组、安定组，白垩系华池组和泾川组，其中最为重要的容矿层位是侏罗系直罗组。

尽管矿床产于现代地表以下仅几百米的深度，但地质学、岩相学和流体包裹体研究指出，铀矿化温度在 60～180 ℃[18-19]，指示埋藏或热液环境而不是早成岩环境。U-Pb 等时线法在东胜地区针对 15 个含铀矿物样品测定的铀成矿时代范围较宽，可分为 177～149 Ma，124～107 Ma，85～74 Ma 和 20～8 Ma 4 组[20-21]，晚白垩世(85～74 Ma)是主要成矿时代(7 个样品)。店头铀矿床中 2 个样品获得的 U-Pb 等时线年龄分别为 42 Ma 和 51 Ma[11]。

2　概念剖面和研究方法

数值模拟以盆地东西向沉积概念剖面为基础

表 1 鄂尔多斯盆地岩性、时间间隔、总有机碳以及水文地层单元厚度数据

Table 1 Lithology, time interval, TOC, and thickness of hydrostratigraphic units of the Ordos Basin

单元	岩性	时间间隔/Ma	w(TOC)/%	距盆地中心不同距离的厚度/m														
				0m	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	80m	90m	100m	110m	120m	130m	140m
K	40% sd+5% lms+55% sh	145～65	1.00	3 000	2 900	2 800	2 700	2 600	2 500	2 400	2 300	2 200	2 100	2 000	1 900	1 800	1 700	1 600
J	50% sd+5% lms+45% sh	200～145	2.05	583	591	724	770	705	674	585	555	538	521	469	427	384	341	299
沉积间断	30% sd+5% lms+65% sh	205～200	0.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T	30% sd+5% lms+65% sh	245～205	2.12	1 086	1 284	1 459	1 580	1 680	1 690	1 563	1 482	1 521	1 435	1 280	1 109	939	768	597
C—P	20% sd+5% lms+75% sh	360～245	1.77	561	550	504	493	472	495	308	410	429	421	478	370	306	247	188
沉积间断	95% lms+5% sh	440～360	0.00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
O	95% lms+5% sh	520～440	0.23	524	316	312	378	469	561	735	731	747	696	671	494	381	265	145
∈	95% lms+5% sh	556～520	0.14	317	329	329	322	329	322	285	300	303	271	270	232	214	172	128

注:TOC(总有机碳)数据来源于文献[8,22-26];其他据文献[9]。sd 代表砂岩;sh 代表页岩;lms 代表灰岩。

(图 1c)。模型剖面在模拟过程中被划分为 6 个水文地层单元,即寒武系、奥陶系、石炭—二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系,其中奥陶系和石炭系之间、三叠系和侏罗系之间分别存在一个沉积间断(表 1)。

盆地中心选择白垩系沉积厚度最大处,盆地东缘设置在吕梁山附近(图 1c)。白垩系之上(图 1c)增加因剥蚀损失的 1 340 m 岩层厚度[27]。数值模拟中岩性、时间间隔、总有机碳(TOC)含量、不同水文地层单元沉积厚度列在表 1 中。沉积间断在较长时间内用厚度 1 m 的沉积代表。

数值模拟时设盆地流体流动封闭于盆地西边和底部,向东边和地表开放。基于对鄂尔多斯盆地 3.1 ℃/100 m 地热梯度的估计[27],模拟中设盆地底部存在 59.55 mW/m^2 的热流值,地表温度固定在 20 ℃。流体性质(热膨胀系数、压缩系数、热容量以及热导率)、固态物性(密度、热容量以及热导率)、孔隙度、渗透率等相关参数采用 Bethke[28]、Garven[29]以及 Chi 等[30-31]提供的数据。基于主要生烃母岩为 II 型烃原岩[23-24,32],数值模拟中的烃类性质和动力学参数采用 Lee 等[14]、Speight[33]、Pepper 等[34-35]和 Chi 等[31]提供的数据。

Xue 等[9]利用 Basin2™[36]对鄂尔多斯盆地流体流动实现模拟。由于 Basin2™程序中不包含生烃模块,所以本次研究利用 BsnMod 程序实现模拟。BsnMod 程序是由 Chi 等[30,37]在 Bethke[28]的数学模型基础上最早研发的,最近在程序中又补充了生烃模块[31],关于其详细来源以及控制方程(介质连续性、质量平衡、能量守恒以及生烃方程)的描述这里不再赘述。这里简单介绍一些 BsnMod 程序的使用方法。

在 BsnMod 程序的主界面可以看到所有的数据输入按钮(图 2),包括模型选择、盆地数据、流体性质、岩石物性、孔隙度-渗透率参数、边界条件、数值模拟参数以及与生烃有关的参数设置。在所有数据录入过程中,“盆地数据”(图 2b)表的录入最为复杂,它包含了表 1 中的所有数据。其他表中的数据多为缺省值(图 2c—f),是从上述各种参考文献引用来的。BsnMod 程序主菜单和工具栏(图 2a)中有两个输出功能键,即图件输出和电子数据表输出。图件输出功能包含计算坐标、流体流动向量、流体超压力等压线以及等温线,且图件数据可以拷贝到 CorelDraw 等绘图软件进行后续编辑。电子数据表输出功能包含每个网格结点的计算结果,包括结点坐标、温度、流体压力、流体超压力、流体流速、孔隙度、渗透率、生油率和生气率;同样电子数据表可以拷贝到 Excel 等软件中进行后续编辑操作。

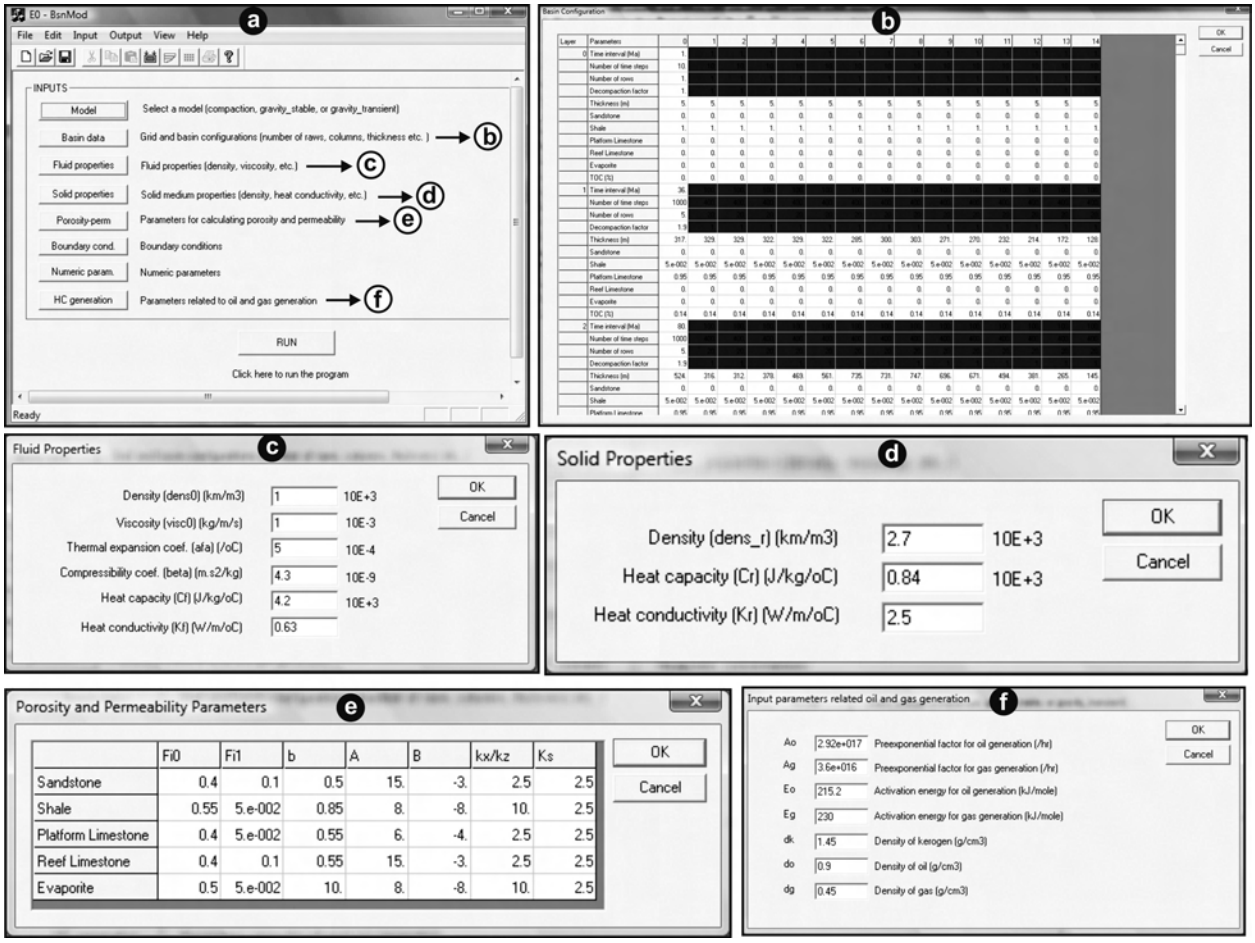


图 2　BsnMod 程序使用界面简图

Fig. 2　User interfaces of the BsnMod program

a—控制数据输入和输出的主界面;b—盆地数据输入;c—流体性质数据输入;d—物性数据输入;
e—孔隙度和渗透率参数数据输入;f—与油气生成相关数据输入。

3　数值模拟结果

鄂尔多斯盆地流体数值模拟时间段从寒武纪到第三纪,主要控制流体流动速率、流体压力、流体超压力以及温度的发展变化。数值模拟过程中考虑了两种情况,一是考虑不均衡沉积压实作用和温度对流体超压力及流体流动的影响;二是在前者的基础上考虑盆地生烃过程产生的影响。考虑地势差的模拟在前面的工作中已完成[9],这里不再重复。

在没有考虑生烃效应情况下,数值模拟结果显示(图 3),寒武纪和奥陶纪沉积作用形成的流体超压力可以忽略不计,最大超压力等压线只有 0.004 MPa。三叠纪末(205 Ma)最大流体超压力等压线值增加到 1.08 MPa,但到侏罗纪末(145 Ma)最大流体超压力等压线值减少到 0.56 MPa。在白垩纪末(65 Ma)最大流体超压力等压线值达到 2.22 MPa,但随后在 20 Ma 时最大流体超压力等压线值减少到 0.81 MPa。鄂尔多斯盆地整个演化历史中,流体主要向上向盆地边部流动(图 3,左列、右边部)。局部流体向下流动,是由于寒武系和奥陶系产生的流体超压力低于其上覆石炭系、二叠系和三叠系的流体超压力值。流体流动速率一般比较缓慢,水平最大流动速率为 0.137 cm/a,垂直最大流动速率为 0.007 28 cm/a(图 3)。地热曲线几乎没有受到流体流动的干扰,所以地热等温线是近水平的(图 3,右列)。以上数值模拟结果与 Basin2 程序获得的模拟结果基本一致[9](图 4)。

第二个数值模拟程序考虑了盆地生烃对流体超压力数值的影响,在第一个数值程序模拟结果的基础上,油气生成部分被加入计算。数值模拟结果表明,石油的生成始于三叠纪,位于盆地下部,随后在

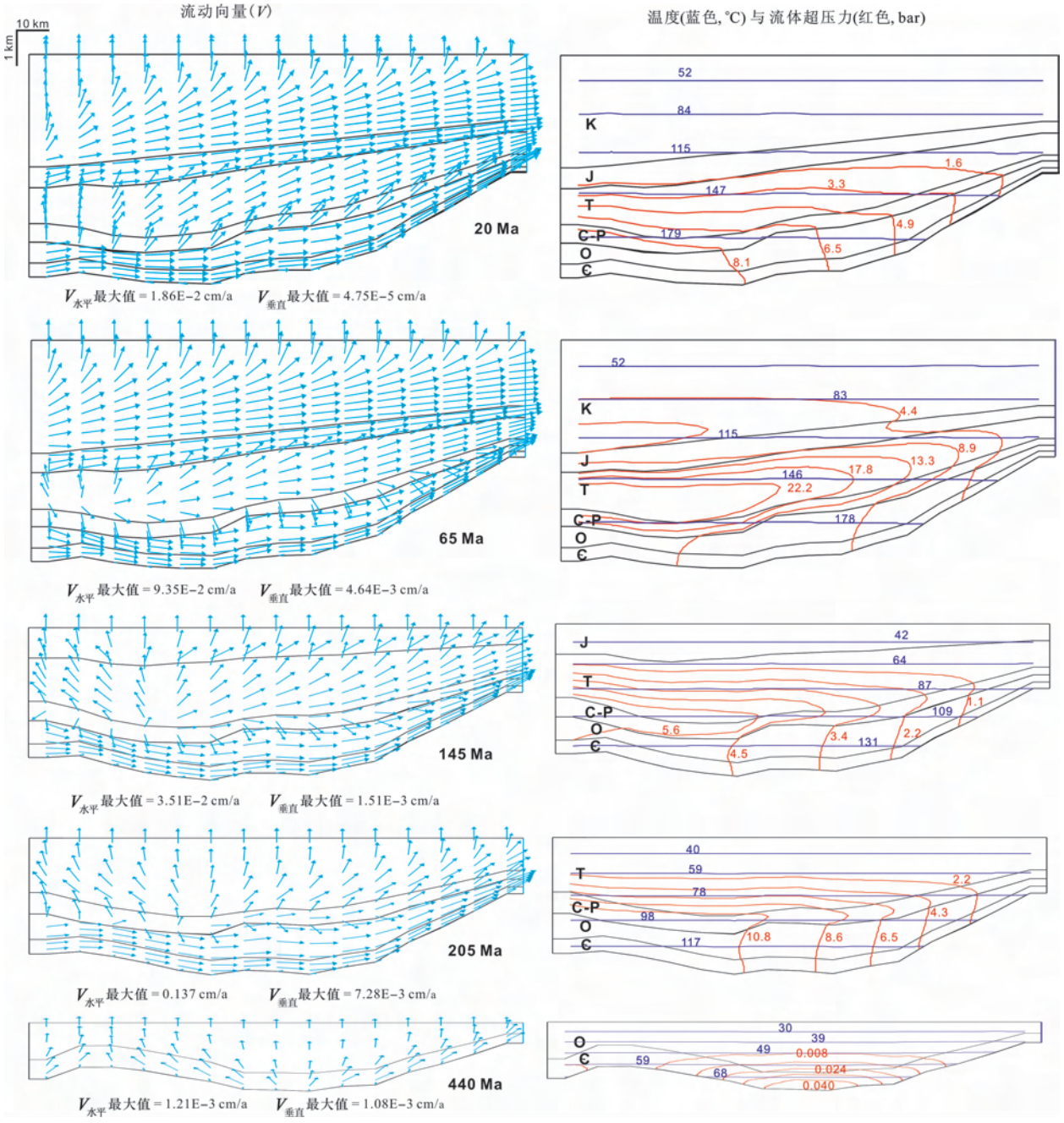


图 3 鄂尔多斯盆地流体流动模型、流体超压力和等温线在奥陶纪末(440 Ma)、三叠纪末(205 Ma)、侏罗纪末(145 Ma)、白垩纪末(65 Ma)和沉积作用停止(20 Ma)不考虑生烃效应情况下的数值模拟结果

Fig. 3 Numerical modeling results for simulations without considering hydrocarbon generation, showing fluid flow patterns, fluid overpressures, and isotherms at the end of Ordovician (440 Ma), end of Triassic (205 Ma), end of Jurassic (145 Ma), end of Cretaceous(65 Ma), and after ceasing of sedimentation (20 Ma)

侏罗纪和白垩纪缓慢向盆地上部移动,而天然气直到白垩纪才开始形成和发展演化。图 5 为白垩纪末(65 Ma)油气生成带剖面示意图。从寒武纪到侏罗纪末(542～145 Ma),流体流动速率、流体超压力以及温度的数值模拟结果(图 4)与没有考虑生烃效应的数值模拟结果(图 3)基本是一致的。这表明这个时间段上生烃效应对产生流体超压力的贡献很小或者可以忽略不计。但是到了白垩纪末(65 Ma),流体超压力(最大流体超压力等压线值=5.9 MPa,图 4)要比没有考虑生烃效应情况下的流体超压力(最大流体超压力等压线值=2.22 MPa,图 3)高许多。即使到了 20 Ma,生烃效应影响的流体超压力(最大

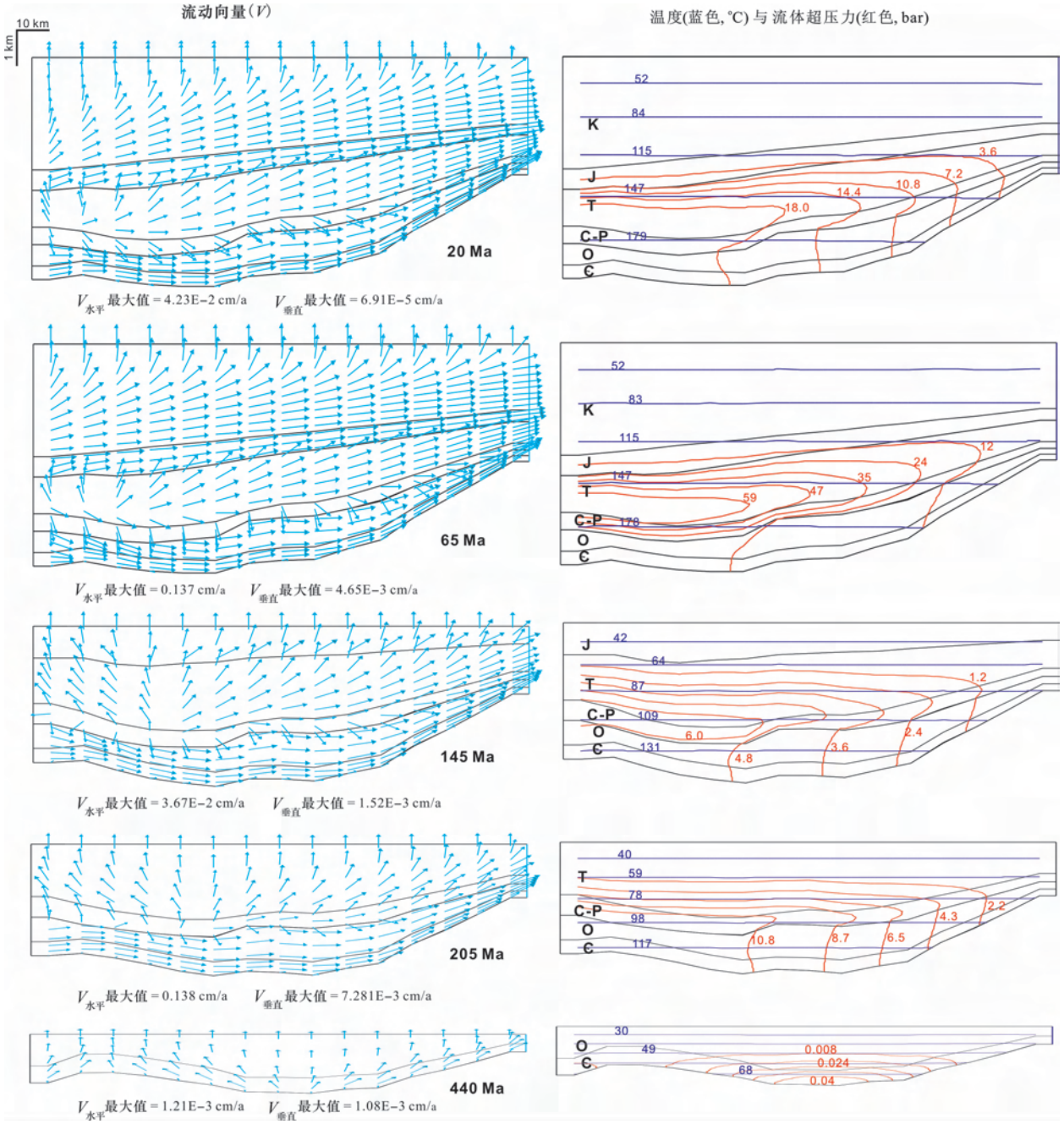


图 4　鄂尔多斯盆地流体流动模型、流体超压力和等温线在奥陶纪末(440 Ma)、三叠纪末(205 Ma)、侏罗纪末(145 Ma)、白垩纪末(65 Ma)和沉积作用停止(20 Ma)在考虑生烃效应情况下的数值模拟结果

Fig. 4　Numerical modeling results for simulations taking into account the contribution of hydrocarbon generation to overpressure development, showing fluid flow patterns, fluid overpressures, and isotherms at the end of Ordovician (440 Ma), end of Triassic (205 Ma), end of Jurassic (145 Ma), end of Cretaceous (65 Ma), and after ceasing of sedimentation (20 Ma)

流体超压力等压线值=1.8 MPa，图 4)依然比没生烃效应的流体超压力高(最大流体超压力等压线值=0.81 MPa，图 3)。

尽管图 3 和图 5 显示的流体超压力相当显著，但是从以盆地为中心的深度-压力图解剖面来看，多数流体超压力实际上是相对较小的(图 6)。整个盆地演化历史过程中，如果没有生烃过程，盆地不同深度的流体压力与相应深度的静水压力值基本相同(图 6a)。但在生烃效应存在的情况下，白垩纪末(65 Ma)流体压力值的增加要显著高于静水压力线，而在 20 Ma 时，流体超压力逐渐消失并很难识别(图 6b)。

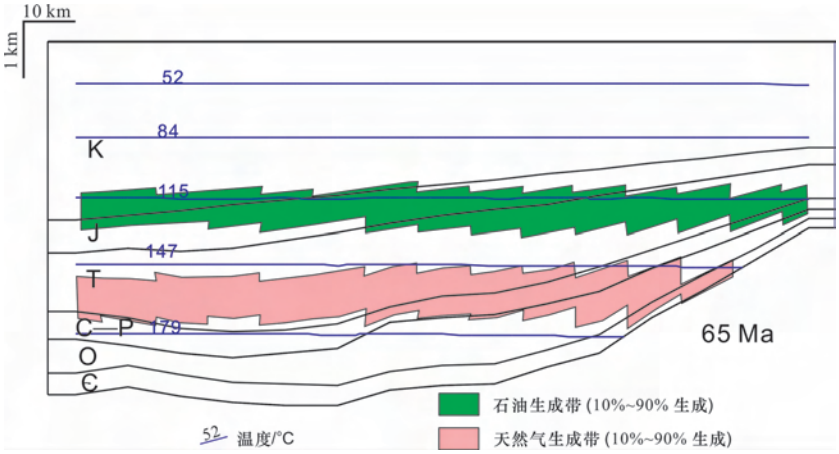


图 5 鄂尔多斯盆地石油(10%～90%石油生成)、天然气(10%～90%天然气生成)生成带分布区在白垩纪末(65 Ma)的数值模拟结果

Fig. 5 Numerical modeling results showing the distribution of oil generation (10%- 90% oil generated) and gas generation (10%- 90% gas generated) zones at the end of Cretaceous(65 Ma)

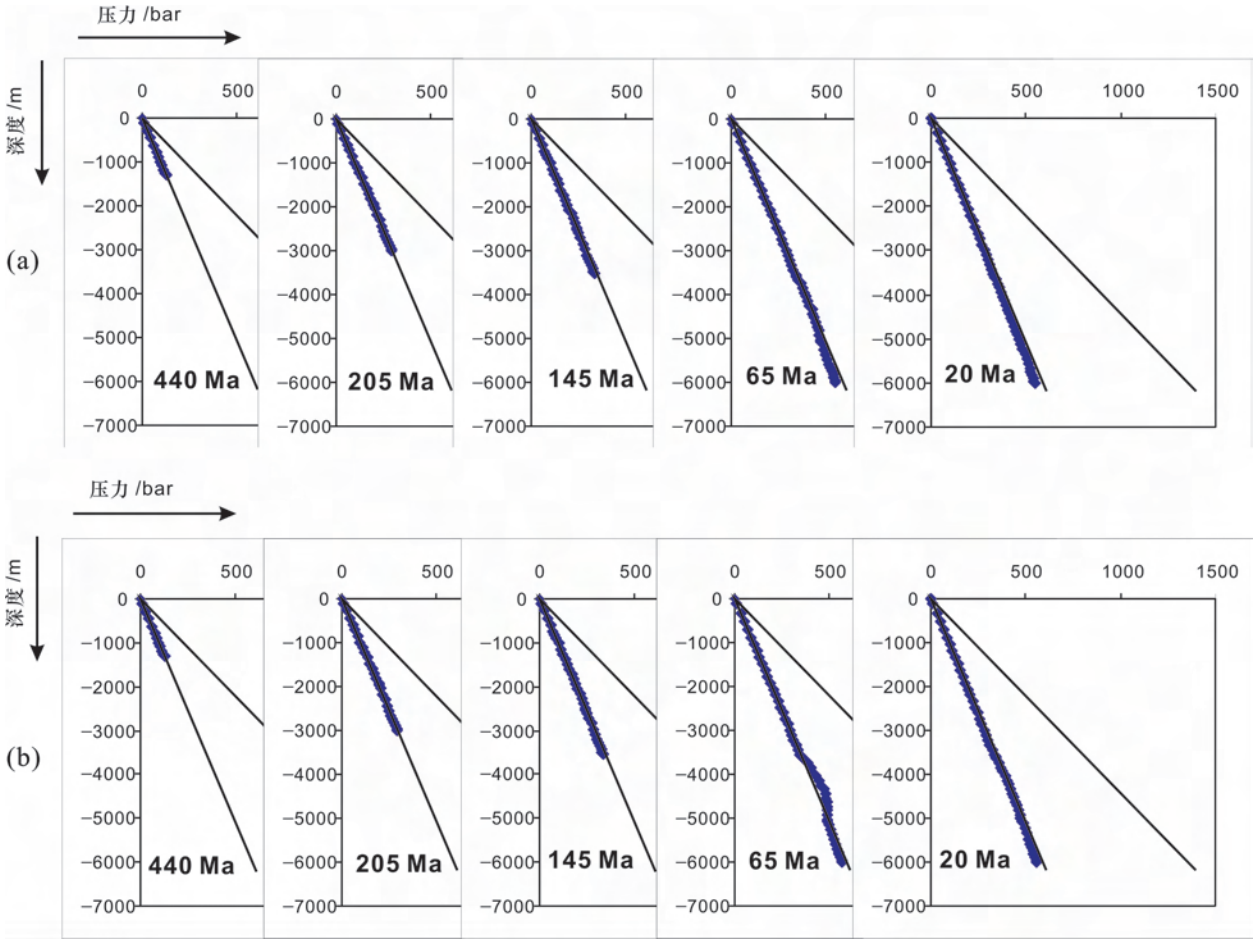


图 6 鄂尔多斯盆地沉积中心各阶段深度-压力剖面图解模拟

Fig. 6 Calculated depth-pressure profiles at the basin center (left side of the model) at various stages of the Ordos Basin for simulations

a—盆地中心深度-压力剖面图解(无生烃效应情况);b—盆地中心深度-压力剖面图解(考虑生烃效应情况)。多数情况下流体压力与静水压力相近,但在 65 Ma 流体压力显著高于静水压力。

4　讨论与结论

鄂尔多斯盆地多数铀矿化发生在侏罗系上部(图 1c)。铀矿化优先定位在一定的层位与还原渗出流、氧化渗入流两种流体系统混合界面的位置密切相关[9]。而铀的大量富集成矿需要混合界面能够较长时期保持在稳定层位。

较宽的铀成矿年龄[20-21](177～8 Ma)表明，铀矿化可能始于早成岩阶段，但最主要铀成矿阶段应发生在白垩纪之后。两次数值模拟结果显示[9]，虽然鄂尔多斯盆地整个演化历史中流体压力较小，但存在足够的驱动力使得渗出流与地势差控制的渗入流在盆地上部相遇。假设地势差保持适中(模拟剖面中地势差为 350 m)，则两种流体系统的混合界面定位于侏罗系地层上部。沉积作用停止后，流体超压力的逐渐消失和地势差的逐渐变小同时进行，这可以使两种流体系统的混合界面能够保持在稳定的同一个层位。

如果流体超压力消失过程中地势差没有减小，含氧渗入流体将流向盆地更深部，萃取或活化盆地上部(尤其是侏罗系)预富集的铀元素。数值模拟结果表明，在考虑生烃效应的情况下，流体超压力会显著增加，其在沉积作用停止后逐渐变小的速率减小。鄂尔多斯盆地油气如此富足，作者认为生烃效应在盆地流体超压力形成过程中发挥重要作用，其提供驱动力使得渗出流与地势差控制的渗入流相遇，因而有利于铀矿化较长时期地保持在同一个层位。

总之，数值模拟结果揭示，鄂尔多斯盆地在侏罗—白垩纪发育两种流体系统，即还原-渗出流和含氧-渗入流。两种流体系统的混合界面对于铀矿化至关重要，但其位置稳定性易受地势差影响，尤其表现在沉积作用停止后。盆地内油气的形成过程使得流体超压力显著增加，对两种流体系统混合界面的稳定起到了重要的控制作用，并进而控制了铀矿化的层位。

野外工作中得到中国核工业地质局 208 大队大力支持，鄂尔多斯盆地有机碳等资料的收集得到中国石油勘探开发研究院杨晓萍研究员的帮助，笔者对他们表示衷心感谢。

参考文献

[1] 魏永佩，王毅. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产富集规律的比较[J]. 石油与天然气地质，2004，25(4)：385-392.

[2] 陈刚，李向平，周立发，等. 鄂尔多斯盆地构造和多种矿产的偶合成矿特征[J]. 地学前缘，2005，12(4)：535-541.

[3] 邓军，王庆飞，高帮飞，等. 鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布[J]. 现代地质，2006，19(4)：538-545.

[4] 张如良. 鄂尔多斯盆地深盆气与铀矿化关系初探[J]. 铀矿地质，2004，20(4)：213-218.

[5] 冯乔，张小莉，王云鹏，等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界油气运聚特征及其铀成矿意义[J]. 地质学报，2006，80(5)：748-752.

[6] 彭云彪，陈安平，方锡珩，等. 东胜砂岩型铀矿床中烃类流体与成矿关系研究[J]. 地球化学，2007，36(3)：267-274.

[7] 薛春纪，薛伟，康明，等. 鄂尔多斯盆地流体动力学过程及其砂岩型铀矿化[J]. 现代地质，2008，22(1)：1-8.

[8] 薛伟，薛春纪，Chi G X，等. 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系铀矿化与有机质的某些关联[J]. 地质论评，2009，55(3)：361-369.

[9] Xue C J，Chi G X，Xue W. Interaction of two fluid systems in the formation of sandstone-hosted uranium deposits in the Ordos Basin：Geochemical evidence and hydrodynamic modeling[J]. Journal of Geochemical Exploration，2010，106：226-235.

[10] 肖新建，李子颖，方锡珩，等. 东胜砂岩型铀矿床低温热液流体的证据及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报，2004，23(4)：301-304.

[11] 陈宏斌，徐高中，王金平，等. 鄂尔多斯盆地南缘店头铀矿床矿化特征及其与东胜铀矿床对比[J]. 地质学报，2006，80(5)：724-732.

[12] Bredehoeft J D，Wesley J B，Fouch T D. Simulations of the origin of fluid pressure，fracture generation and the movement of fluids in the Uinta Basin，Utah[J]. AAPG Bulletin，1994，78：1729-1747.

[13] Luo X R，Vasseur G. Geopressuring mechanism of organic matter cracking：numerical modeling[J]. AAPG Bulletin，1996，80：856-874.

[14] Lee M K，Williams D D. Paleohydrogeology of the Delaware Basin，western Texas：Overpressure development，hydrocarbon migration，and ore genesis[J]. AAPG Bulletin，2000，84：961-974.

[15] McPherson B L，Bredehoeft J D. Overpressures in the Uinta basin，Utah：Analysis using a three-dimensional basin evolution model[J]. Water Resources Research，2001，37：857-871.

[16] Hansom J，Lee M K. Effects of hydrocarbon generation，basal heat flow and sediment compaction on overpressure development：A numerical study[J]. Petroleum Geoscience，2005，11：353-360.

[17] 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)：17-23.

[18] 李荣西，赫英，李金保，等. 东胜铀矿流体包裹体同位素组成与成矿流体来源研究[J]. 地质学报，2006，80(5)：753-759.

[19] 凌明星. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿矿物学及矿床地球化学研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2007：112.

[20] 夏毓亮，林锦荣，刘汉彬，等. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀矿成矿年代学研究[J]. 铀矿地质，2003，19(3)：129-136.

[21] 刘汉彬，夏毓亮，田时丰. 东胜地区砂岩型铀矿成矿年代学和成矿铀源研究[J]. 铀矿地质，2007，23(1)：23-29.

[22] 戴金星. 中国天然气的聚集区带[M]. 北京：科学出版社，1997：63.

[23] 杨俊杰，裴锡古. 中国天然气地质学(第四卷)鄂尔多斯盆地[M]. 北京：石油工业出版社，1996：108.

[24] 李贤庆，侯读杰，胡国艺. 鄂尔多斯盆地中部气田地层流体特征与天然气成藏[M]. 北京：地质出版社，2005：19.

[25] 牟泽辉. 鄂尔多斯盆地南部中生界成油体系特征[M]. 北京：石油工业出版社，2001：93.

[26] 孙晔. 东胜铀矿床有机地球化学研究[D]. 北京：核工业北京地质研究院，2005：66.

[27] 任战利，张盛，高胜利，等. 伊盟隆起东胜地区热演化史与多种能源矿产的关系[J]. 石油与天然气地质，2006，36(3)：267-274.

[28] Bethke C M. A numerical model of compaction-driven groundwater flow and heat transfer and its application to paleohydrology of intracratonic sedimentary basins[J]. Journal of Geophysical Research，1985，90：6817-6828.

[29] Garven G. The role of regional fluid flow in the genesis of the Pine Point deposit，Western Canada sedimentary basin[J]. Economic Geology，1985，80：307-324.

[30] Chi G X，Savard M M. Basinal fluid flow models related to Zn-Pb mineralization in the southern margin of the Maritimes Basin，eastern Canada[J]. Economic Geology，1998，93：896-910.

[31] Chi G X，Lavoie D，Bertrand R，et al. Downward hydrocarbon migration predicted from numerical modeling of fluid overpressure in the Paleozoic Anticosti Basin，eastern Canada[J]. Geofluids，2010，10：334-350.

[32] 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京：石油工业出版社，2003：390.

[33] Speight J G. The Chemistry and Technology of Petroleum[M]. 4th ed. Florida：CRC Press，2006：984.

[34] Pepper A S，Corvi P J. Simple kinetic models of petroleum formation. Part I：Oil and gas generation from kerogen[J]. Marine and Petroleum Geology，1995，12：291-319.

[35] Pepper A S，Dodd T A. Simple kinetic models of petroleum formation. Part II：Oil-gas cracking[J]. Marine and Petroleum Geology，1995，12：321-340.

[36] Bethke C M，Lee M K. Basin Modeling with Basin2，A Guide to Using Basin2，B2plot，B2video and B2view[M]. Urbana：University of Illinois，1993：1-225.

[37] Chi G X. BsnMod：A Windows program for simulating basin-scale fluid flow and heat transfer processes related to sediment compaction and tectonic uplifting in two dimensions[J]. Geological Survey of Canada，Current Research，2001，D-24：7.