

松辽盆地十屋断陷异常低压体系及其成因机制

解习农¹, 焦赳赳², 熊海河³

(1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 香港大学地球科学系, 香港; 3. 石油公司东北石油局, 吉林长春 130062)

摘要: 松辽盆地东南隆起区十屋断陷发育异常低压体系, 实测的地层压力梯度介于 0.005~0.008 MPa/m. 研究结果表明异常低压体系的形成既与地温梯度的降低有关, 又与新生代该区的地层抬升和剥蚀有关. 此外, 天然气扩散作用对局部异常低压体系的形成具有一定的影响. 研究区地层压力系统演化经历了从异常高压向异常低压演化过程, 这一过程决定了盆地不同演化时期的水流系统及其油气运聚特征, 从而使得十屋断陷具有石油成藏早且主要分布于断陷边缘、天然气成藏晚且主要分布于断陷中央的成藏特点.

关键词: 异常低压体系; 十屋断陷; 松辽盆地.

中图分类号: P618.13; P314.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)01-0061-06

作者简介: 解习农(1963—), 男, 教授, 1983年毕业于武汉地质学院, 1992年获博士学位, 现主要从事石油与天然气地质及盆地流体分析的教学和科研工作.

E-mail: xnxie@cug.edu.cn

异常地层压力体系广泛发育于含油气盆地, 如: 北海盆地^[1,2]、墨西哥湾盆地、丹佛盆地^[3,4]和莺歌海盆地^[5]. 近年来人们已广泛认识到沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用等有密切关系, 盆地流体活动可能是控制盆地中物质演变和能量再分配的主导因素. 地层压力作为盆地流体流动的主要驱动力, 控制盆地内流体的流动方向及循环样式. 因此, 盆地压力系统研究成为人们十分关心的热点问题.

尽管盆地地层压力系统存在“静态”和“动态”之说, 广义而言, 异常压力系统的形成与保持的“静态”仅仅是相对的, 对于盆地演化而言, 盆地压力系统的形成和演化则是动态的^[6]. 所以, 许多学者都试图从压力系统演化的角度, 探讨盆地水动力学过程及其与油气运移、聚集的成因联系^[7,8]. 迄今为止, 业已发现的异常压力盆地以异常超压盆地为主, 异常低压盆地相对较少. 松辽盆地东南隆起区十屋断陷是一个典型的异常低压凹陷, 本文试图通过松辽盆地十屋断陷低压异常特征及成因机制分析, 揭示压力系统演化与油气运聚的成因联系.

1 地质背景

松辽盆地是我国大型内陆中生代含油气沉积盆地, 十屋断陷位于松辽盆地东南隆起区的南端. 断陷平面大致呈扇形(图1), 面积约 2 500 km². 研究区主要充填有中生代地层, 最厚可达 9 000 m. 盆地演化可划分为 3 个阶段, 即晚侏罗世—早白垩世裂陷期、晚白垩世裂后期和新生代构造反转及抬升剥蚀期.

在晚侏罗世—早白垩世裂陷期, 研究区形成了西断东超的箕状断陷, 充填有上侏罗统火石岭组、下白垩统沙河子组、营城子组和登娄库组. 火石岭组主要为一套火山岩或火山碎屑岩间夹含煤碎屑地层. 沙河子组和营城子组为深灰、灰黑色泥岩与浅灰色粉砂、细砂岩互层夹砂砾岩层, 指示深湖及其周缘三角洲和扇三角洲沉积; 登娄库组则以浅湖及其周缘三角洲沉积为主. 其中沙河子组和营城子组发育深湖沉积, 构成了研究区的主要烃源岩. 晚白垩世裂后期整个松辽盆地形成统一的湖盆体系, 而研究区则发育以盆地边缘相为主的河流及冲积平原沉积. 晚白垩世末期, 松辽盆地区域应力从张扭性转为压扭性, 盆地内形成一系列褶皱, 如十屋断陷的中央隆起带, 同时在松辽盆地东南隆起区遭受长期的抬升和剥蚀. 何生等^[9]根据镜质体反射率和磷灰石裂变径

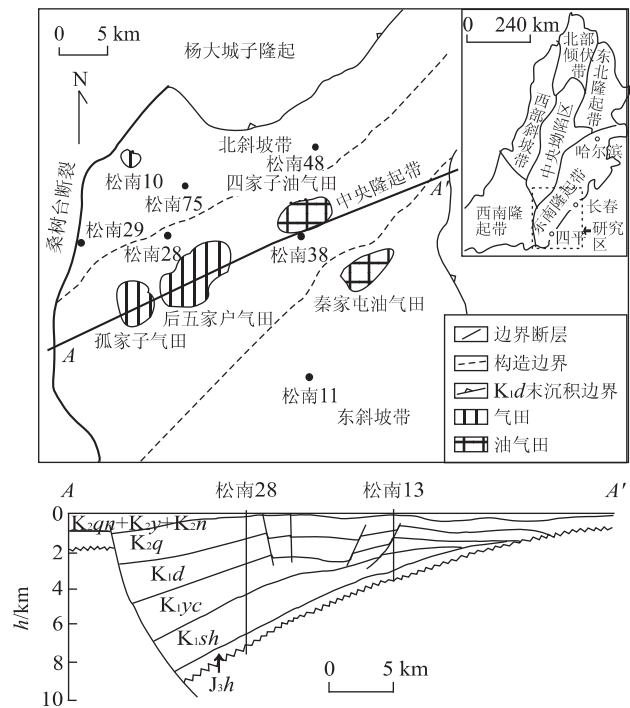


图 1 十屋断陷构造区划及构造剖面

Fig. 1 Structural outline of the Shiwu depression and A-A' section

迹分析推断其剥蚀厚度在 400~1 300 m 之间,致使第四系直接覆盖在泉头组或嫩江组之上。

2 异常低压体系特征及其分布

含油气盆地地层压力体系识别的最直接有效的办法,是钻杆地层测试(DST)和重复地层测试(RFT)。本次研究收集了 100 余口井 DST 测试数据,大部分数据来自于埋深在 400~3 000 m 的营城

子组、登娄库组和泉头组砂岩储层。为研究之便,静水压力梯度取为 0.01 MPa/m。十屋断陷的异常低压体系的分布具有如下特征(图 2):(1)异常低压系统的顶界面埋深在不同构造明显不同,早期研究成果表明十屋断陷的异常低压顶界面埋深在 1 500 m^[10-11],但近年来越来越多的新资料揭示异常低压系统的顶界面埋深变化还十分复杂,总体来看,在中央隆起带的异常低压体系在 1 500 m 以下,而在秦家屯地区深至 1 650 m 的压力梯度仍接近于静水压力;(2)从层位来看,接近于静水压力的常压系统分布层位为泉二段及其以上地层,异常低压系统主要出现在登娄库组及其以下断陷期的地层,但仍有部分登娄库组气藏压力系数在 0.8~1.0 之间;泉头组地层多数为常压系统,在后五家户和孤家子构造泉一段仍出现少数异常低压气藏,其压力系数在 0.7~0.8 之间;(3)从现有资料来看,异常低压与地层剥蚀厚度呈正相关,地层剥蚀厚度越大,其压力系数越低。如后五家户的相同地层的压力系数要大大低于 SN10,因为后五家户地区第四系覆盖在泉三、四段之上,而 SN10 则覆盖在嫩江组之上,即前者的剥蚀厚度大得多;(4)异常低压与地层欠压实程度呈负相关,地层欠压实程度越大,其压力系数越低。通过泥岩声波时差分析,在断陷深部的沙河子组和营城子组均出现欠压实现象(图 3)。已有资料表明,断陷深凹部位低压气藏的压力系数较斜坡或盆地边缘压力系数更低;(5)勘探资料表明,盆地深部含气层系中各气藏相互独立,自成体系,即使是同一构造不同断块之间,气层也具有不同气水界面,反映异常低压体系内连通性很差^[11]。

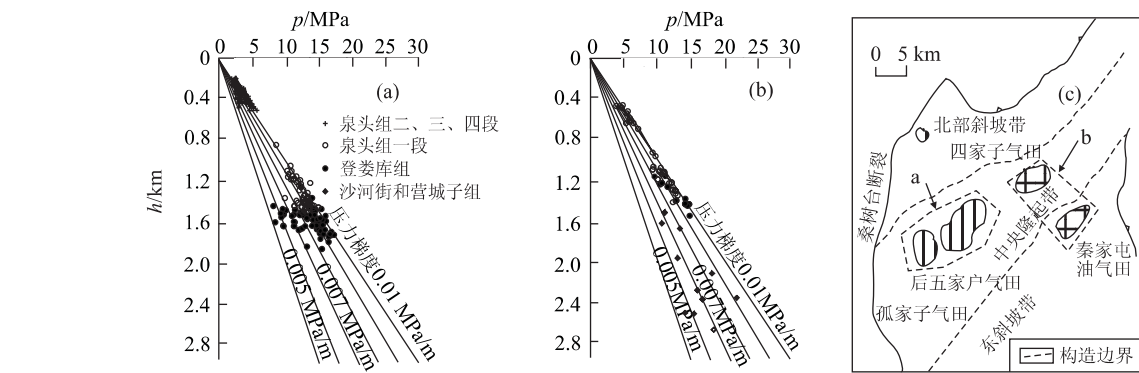


图 2 十屋断陷主要储层 DST 实测压力与深度关系

Fig. 2 Measured formation pressure versus depth profile in main reservoirs of the Shiwu depression

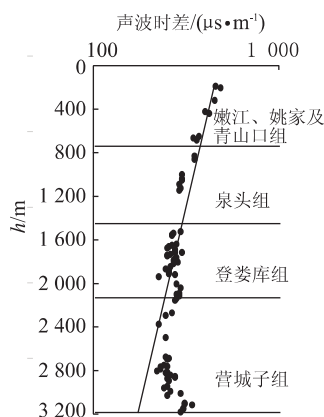


图3 十屋断陷 SN10 井泥岩声时差随深度的变化

Fig. 3 Transit time versus depth profile for the mudstones in well SN10

3 异常低压体系成因机制

关于异常低压的成因机制也存在多种解释,如抬升和上覆地层的剥蚀^[12,13]、不同热效应^[14]、地下水流动的不平衡^[3,15]、封闭层的渗流作用^[16]、岩石扩容作用^[17]和浓差作用^[18]。尽管现今地下水系统对十屋断陷上部常压系统影响明显,但对断陷深部异常低压系统形成的影响极小。

3.1 地温梯度降低

根据现今 DST 资料,计算地温与深度关系式为 $T=0.034h+10.9$,这说明现今地温梯度为 $34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,地表温度为 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这一结论与松辽盆地的现今地温梯度和地表温度基本吻合。多数学者通过多种方法证实,松辽盆地古地温梯度高于现今地温梯度^[10,19]。何生等^[9]根据镜质体反射率反演古地温、流体包裹体测温和磷灰石裂变径迹等热史分析方法证实:松辽盆地东南隆起区晚侏罗世—早白垩世断陷发育阶段为高热异常期,热流一般分布在 $90\sim 135\text{ mW}/\text{m}^2$,古地温梯度约在 $5\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 之间;晚白垩世断陷发育阶段为热衰减期,热流一般分布在 $80\sim 100\text{ mW}/\text{m}^2$,古地温梯度约在 $4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 之间。显然,十屋断陷具有古地温梯度随时间而明显降低的特点。

为此,笔者假定了一个理想模型检验不同古热流对异常低压形成的影响。假定如图4所示的砂泥岩层,上覆砂岩层的热流值为 $64\text{ mW}/\text{m}^2$,当改变泥岩层的热流值时,剩余压力出现明显的变化。如当埋深在 4 km 的泥岩热流值从 $121\text{ mW}/\text{m}^2$ 变为 $64\text{ mW}/\text{m}^2$ 时,剩余压力最大可减少 6 MPa 。Bark-

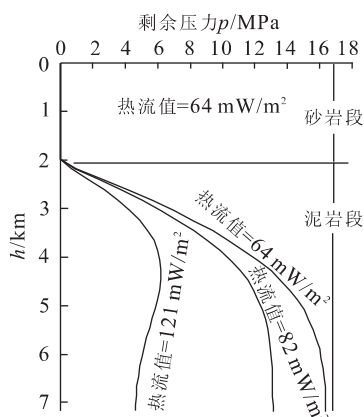


图4 假想模型中模拟剩余压力与热流变化关系

Fig. 4 Relationship of calculated excess pressure versus heat flow in a model with two layers

er^[14]亦证实在良好封闭条件下温度降低可导致地层压力低于静水压力,Bradley^[20]提出在封闭系统中每 1 K 温度的变化可导致压力从 1.39 MPa 变为 1.58 MPa 。

3.2 抬升剥蚀作用

抬升剥蚀作用产生异常低压主要体现在2个方面:一是由于抬升剥蚀导致地层温度降低,进而导致流体密度增大和体积减小;二是由于卸载过程中孔隙空间的反弹。众所周知,岩石孔隙的压实作用是不可逆过程,但岩石的卸载仍可导致孔隙空间 $1/10$ 的反弹^[21]。利用上述模型进行卸载速率与异常低压之间的相关分析。模拟结果表明:异常低压与卸载速率成正比,卸载速率越大,则异常低压越明显。如图5所示,当卸载速度从 $5\text{ m}/\text{Ma}$ 增加到 $50\text{ m}/\text{Ma}$,剩余压力可减少 4 MPa 。

3.3 天然气扩散作用和浓差作用

当地表抬升开始,由于温度的降低导致烃源岩的气体生成作用基本停止,如果岩石储层中气体逸散继续发生,必定导致孔隙空间压力降低。

此外,如果一个封隔区中水的含盐度存在一定差异,毛细管力作用将使得高盐度封隔体中的水穿过渗透膜流入到低盐度区,那么在高盐度封隔体由于水的渗漏而形成低压,而低盐度封隔体由于水的增加而形成超压。一般情况下,由于浓差作用导致低压值可能较小(小于 3 MPa)。研究区异常低压带往往是高盐度区,而过度压力带和常压带为低盐度区,因此,浓差作用可能对本区异常低压的形成具有一定的贡献。

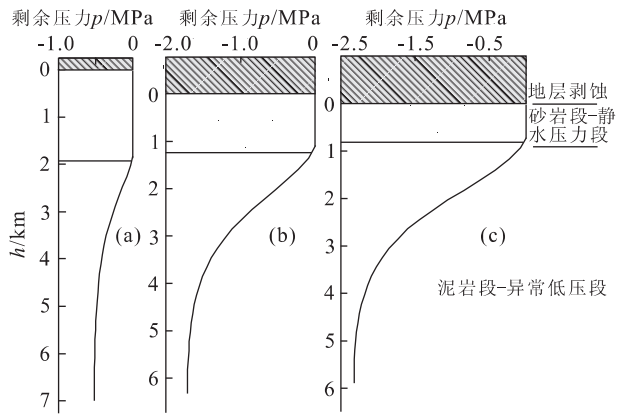


图 5 假想模型中模拟剩余压力与剥蚀速率关系

Fig. 5 Relationship of calculated excess pressure versus erosion rate in a model with two layers

a. 剥蚀速率为 5 m/Ma; b. 剥蚀速率为 15 m/Ma; c. 剥蚀速率为 50 m/Ma

4 地层压力系统定量模拟

为了更好地探讨地层压力体系二维变化过程,笔者使用伊利诺斯大学模拟软件 Basin2 进行二维数值模拟^[22].假定的边界条件包括:基底没有水流进入沉积层,地表温度为 11℃,断陷裂陷期的古热流值为 121 mW/m²,裂后期为 82 mW/m²,现今热流值为 64 mW/m².地层含砂率采用剖面上钻孔及其相邻钻孔资料,新生代地层剥蚀厚度为 0~1 200 m.与岩性有关参数见表 1.

表 1 模拟中采用孔隙度和渗透率参数

Table 1 Parameters of porosity and permeability in the model

岩土	φ_0	b/km^{-1}	φ_1	A	B	K_x/K_z
砂岩	0.40	0.50	0.05	32.6	-9.6	2.5
泥岩	0.55	0.85	0.02	8	-7	10

注:孔隙度 $\varphi = \varphi_0 \exp(-bz_E) + \varphi_1$; z_E 为有效埋藏深度/km;
 $\lg(K_x/\mu\text{m}^2) = A\varphi + B$; A 、 B 为系数; K_x 为水中渗透率, μm^2 ; K_z 为重向渗透率, μm^2 .

模拟结果表明:十屋断陷压力体系经历了从异常高压向异常低压的演变过程.从图 6 可以看出,营城子组沉积期末在断陷中央已出现异常高地层压力,至登娄库组沉积期末,异常压力变大,其分布范围也变大.该区异常高压的形成可能与裂陷期快速沉降速率有关,凹陷中央沙河子组和营城子组沉积速率达 200 m/Ma 以上.进入裂后期,由于沉积速率较低,一般小于 100 m/Ma.至晚白垩世青山口组、

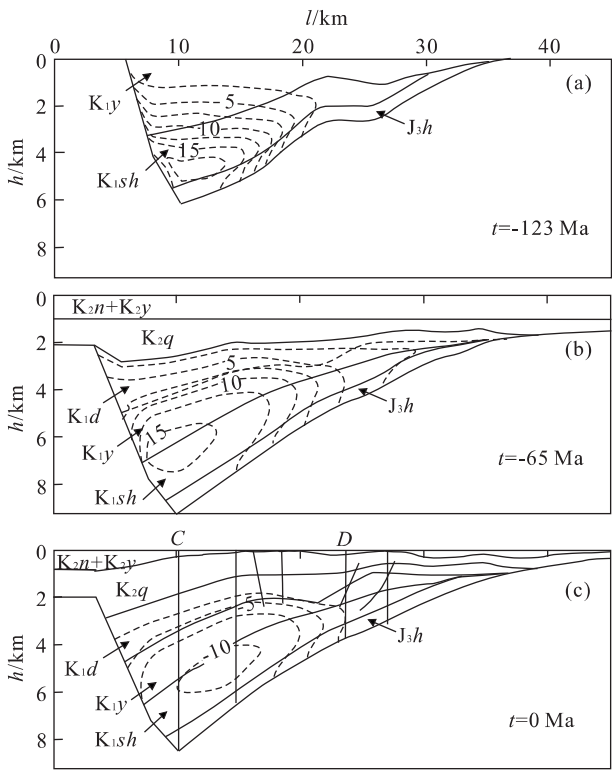


图 6 十屋断陷 A—A' 剖面剩余压力随时间变化

Fig. 6 Evolutionary processes of excess pressure in the Shiwu depression

a, b 为异常超压; c 为异常低压.剖面位置见图 1

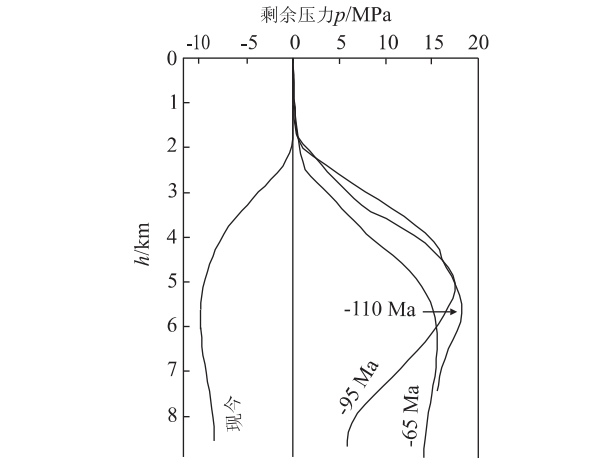


图 7 十屋断陷 SN28 井不同时期地层压力与深度关系

Fig. 7 Pore pressure versus depth profile at well SN28 of the Shiwu depression, showing the variation of excess pressure in different periods

姚家组和嫩江组沉积期,其沉积速率小于 50 m/Ma,断陷内异常超压减小,但仍表现为超压.直到进入新生代地层抬升剥蚀期,地层压力逐渐从异常高压转变为异常低压.

从图7可以看出,地层压力从152 Ma(盆地开始裂陷)到123 Ma(营城子组末)地层压力逐渐增大,随后由于登娄库组沉积速率降低而减小,进入新生代抬升剥蚀期,也是异常高压向异常低压转化的关键时期,地层压力明显降低。此时期既存在古地温梯度从 82 mW/m^2 向 64 mW/m^2 的变化,又存在上覆地层的抬升剥蚀。因此,古地温梯度的降低和上覆地层的剥蚀作用可能是导致研究区异常低压形成的主要原因。

5 异常压力体系演化与油气运聚关系

十屋断陷主要烃源岩为沙河子组和营城子组湖相泥岩,大多数烃源岩在早白垩世末和晚白垩世末分别进入生油和生气高峰。而晚白垩世末正是十屋断陷主要圈闭形成时期。十屋断陷异常压力体系的演化大致可划分为2个阶段:从早白垩世晚期在断陷中央开始形成异常高压,随着盆地沉降逐渐增大并保持到晚白垩世末。随后,随着第三系时期地温梯度降低和地层抬升剥蚀,使异常超压体系向异常低压体系演变。因此,不同压力体系决定盆地流体活动和油气运聚的特点。

十屋断陷异常压力体系演化控制断陷内盆地流体流动方向和油气输导方式,进而控制油气分布。十屋断陷天然气藏分布于凹陷中央,而石油分布于断陷边缘。如断陷中央后五家户构造和孤家子构造为天然气藏,处于斜坡带的四五家子构造、秦家屯构造则油藏和气藏并存,而盆地边缘的杨大城子以油砂为主。这一分布特点受盆地流体系统控制,在断陷内异常高压形成时期,盆地流体从异常高压的凹陷中央向静水压力的凹陷边缘流动,而在异常低压形成时期,盆地流体的流动指向异常低压的凹陷中央。因而断陷内早期成熟的石油受异常高压驱动,大多沿侧向输导通道从烃源岩向盆地边缘运移。不同构造的油气甲烷同位素资料也进一步说明这一事实。在凹陷中央五家户构造和孤家子构造主要为高成熟的天然气藏,而在凹陷斜坡部位的四五家子油气田中泉头组储层既有油层和低熟油型气出现,又有过熟油型气的出现。

从油气赋存情况来看,位于异常低压体系内的气藏相互分隔,自成体系。如位于后五家户构造的后五家户气田被南北向断裂分隔成多个断块,每个断块具有不同的气—水界面。这说明异常低压体系内气藏

连通性极差。地层水化学特征也表明,处于异常低压体系中的地层水以氯化钙型高矿化度地层水为主,指示了异常低压体系为不受大气水渗入影响的地下水停滞带,具有良好的封闭条件。因此,对研究区异常低压形成演化及其分布规律的研究,有助于油气运移、聚集、保存研究,并对油气藏勘探具有指导意义。

参考文献:

- [1] Darby D, Haszeldine R S, Couples G D. Pressure cells and pressure seals in the UK central graben [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, 13(8): 865—878.
- [2] Swarbrick R E, Osborne M J, Grunberger D, et al. Integrated study of the Judy Field (Block 30/7a)—an overpressured Central North Sea oil/gas field [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(9): 993—1010.
- [3] Belitz K, Bredehoeft J D. Hydrodynamics of Denver basin: explanation of subnormal fluid pressure [J]. *AAPG Bulletin*, 1988, 72: 1334—1359.
- [4] Lee M K, Bethke C M. Groundwater flow, late cementation, and petroleum accumulation in the Permian Lyons sandstone, Denver basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(2): 217—237.
- [5] Xie X N, Li S T, Dong W L, et al. Overpressure development and hydrofracturing in the Yinggehai basin, South China Sea [J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1999, 22(4): 437—454.
- [6] 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 (11): 1729—1747.
- [7] Bethke C M, Reed J D, Oltz D F. Long-range petroleum migration in the Illinois basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75 (5): 925—945.
- [8] Gvirtzman H, Stanislavsky E. Palaeohydrology of hydrocarbon maturation, migration and accumulation in the Dead Sea rift [J]. *Basin Research*, 2000, 12(1): 79—93.
- [9] 何生,陶一川,姜鹏.利用多种古地温计研究松辽盆地东南隆起区的地热史[J].*地球科学——中国地质大学学报*,1995,20(3):328—334.
HE S, TAO Y C, JIANG P. Study on geothermal history in swell area of southeast Songliao basin by using several paleogeothermometers [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1995, 20(3): 328—334.
- [10] He S, Middleton M, Tang Z H. Characteristics and

- origin of underpressure system in the Shiwu fault depression, southeast Songliao basin, China [J]. *Basin Research*, 2000, 12(2): 147–158.
- [11] 陈孔全, 吴金才, 唐黎明. 松辽盆地南部断陷成藏体系 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 134.
- CHEN K Q, WU J C, TANG L M. Petroleum system in the fault depression of south Songliao basin [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. 134.
- [12] Bachu S, Underschultz J R. Large-scale underpressuring in the Mississippian-Cretaceous succession, southwestern Alberta basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79: 989–1004.
- [13] Jiao J J, Zheng C. Abnormal fluid pressures caused by erosion and subsidence of sedimentary basins [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 204: 124–137.
- [14] Barker C. Aquathermal pressuring—role of temperature in development of abnormal-pressure zones [J]. *AAPG Bulletin*, 1972, 56: 2068–2071.
- [15] Toth J, Millar R F. Possible effects of erosional changes of topographic relief on pore pressures at depth [J]. *Water Resources Research*, 1983, 19: 1585–1597.
- [16] Law B E, Dickinson W W. Conceptual-model for origin of abnormally pressured gas accumulation in low-permeability reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(8): 1295–1304.
- [17] Neuzil C E, Pollock D W. Erosional unloading and fluid pressures in hydraulically “tight” rocks [J]. *Journal of Geology*, 1983, 91: 179–193.
- [18] Swarbrick R E, Osborne M J. Mechanisms that generate abnormal pressures: an overview [A]. In: Law B E, Ulmishek G F, Slavin V I, eds. *Abnormal pressures in hydrocarbon environments* [C]. *AAPG Memoir*, 1998. 70: 13–34.
- [19] Pang X, Lerche I. Constraints on hydrocarbon migration from the Qingshakou source rock in the west of the north Songliao basin, China [J]. *Petroleum Geoscience*, 1997, 3: 73–94.
- [20] Bradley J S. Abnormal formation pressure [J]. *AAPG Bulletin*, 1975, 59: 957–973.
- [21] Domenico P A, Palciauskas V V. Thermal expansion of fluids and fracture initiation in compacting sediments [J]. *AAPG Bulletin*, 1979, 90: 953–979.
- [22] Bethke C M, Lee M K, Park J. Basin modeling with Basin2: a guide to using the Basin2 software package [M]. University of Illinois, USA: Urbana-Champaign, 2000. 205.

Underpressure System and Forming Mechanism in the Shiwu Depression of Songliao Basin

XIE Xi-nong¹, JIAO Jiu-jiu², XIONG Hai-he³

(1. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Department of Earth Science, University of Hong Kong, Hong Kong, China*; 3. *Northeast Petroleum Bureau of Xinxing Petroleum Corporation, Changchun 130062, China*)

Abstract: Underpressure system developed in the Shiwu depression of Songliao basin with measured formation pressure gradient ranging between 0.005 MPa/m to 0.008 MPa/m. This research result shows that the genetic mechanism of abnormal low pressure attributes to reduction of paleothermal gradients, uplift and erosion during Eocene period. Moreover, gas diffusions also affect the formation of underpressure system at local part. This system at present indicates the evolution process from overpressure to underpressure, which controls fluid flow and hydrocarbon migration in different stages of the depression. Hence, oil pools generating at early stage occur at the basin margin, and gas pools generating at late stage at central part of the Shiwu depression, Songliao basin.

Key words: underpressure system; Shiwu depression; Songliao basin.