

# 利用包裹体 PVT<sub>x</sub> 和 PetroMod 盆地模拟系统 反演鄂尔多斯盆地上古生界古流体压力

廖玲玲, 王云鹏\*

中国科学院 广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室 广州 510640

**摘要:** 包裹体捕获压力反映了油气藏形成时的流体压力, 对于成藏过程具有重要的指示意义。本文尝试结合包裹体 PVT<sub>x</sub> 相态模拟及 PetroMod 盆地模拟两种方法反演鄂尔多斯盆地上古生界古流体压力。以鄂尔多斯盆地天环凹陷地区布 1 井为例, 利用包裹体 PVT<sub>x</sub> 相态模拟得到布 1 井 2 个包裹体样品均一温度及捕获压力分别为 98.2℃, 34.38 MPa 和 121℃, 30.01 MPa。由 PetroMod 盆地模拟生成布 1 井的热演化史及古流体压力史, 将二者结果结合推导出包裹体形成时间。结果表明, 鄂尔多斯盆地天环凹陷地区主要成藏时间为 122~100 Ma(晚白垩世)。结合烃源岩生烃史, 推测包裹体流体形成于上古生界烃源岩快速生烃阶段, 对应成熟度范围约为  $R_o \approx 0.68\% \sim 0.76\%$ 。

**关键词:** 古流体压力; 鄂尔多斯盆地; 流体包裹体 PVT<sub>x</sub>; 盆地模拟系统

中图分类号: TE122.2<sup>+</sup>21 文章编号: 1007-2802(2015)05-0955-05 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.05.009

## Retrieving Paleo-Pressure of the Upper Paleozoic Fluid of the Ordos Basin Using Inclusion PVT<sub>x</sub> Modeling and PetroMod Basin Simulation System

LIAO Ling-ling, WANG Yun-peng\*

State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** Inclusion trapped pressure reflects the fluid pressure when oil-gas reservoir was forming. It also has important implications for accumulation process of hydrocarbons. In this paper, we combined inclusion PVT<sub>x</sub> modeling and PetroMod basin simulation system to retrieve the Paleo fluid pressure of the Upper Paleozoic in the Ordos Basin. Taking the well Bu-1 located in the Tianhuan depression of the Ordos Basin as an example, we calculated the homogeneous temperature and pressure of two inclusions of the well Bu-1 respectively are 98.2℃, 34.38 MPa and 121℃, 30.01 MPa by using the inclusions PVT<sub>x</sub> phase modeling, and obtained the thermal histories and the fluid pressure's evolution history by using the PetroMod simulation system. Finally, the trapping time of inclusions were estimated by combining the results from two methods. The results showed that oil and gas accumulation time of the Tianhuan depression of the Ordos Basin is mainly between 122-100 Ma (Late Cretaceous). Combining with the history of hydrocarbon generation, we deduced that the fluid inclusions were formed in the rapid hydrocarbon generation stage in Upper Paleozoic strata, and maturity range are around  $R_o \approx 0.68\% \sim 0.76\%$ .

**Key words:** paleo fluid pressure; Ordos Basin; inclusion PVT<sub>x</sub> modeling; PetroMod basin simulation system

收稿日期: 2014-08-21 收到, 2015-01-22 改回

基金项目: 国家油气专项(2011ZX05008-002-10); 国家自然科学基金项目(41372137); 有机地球化学国家重点实验室前沿项目(SKLOG2012A02)

第一作者简介: 廖玲玲(1987-), 女, 博士研究生, 研究方向: 地球化学. E-mail: liaolingling@gig.ac.cn.

\* 通讯作者简介: 王云鹏(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 油气地球化学. E-mail: wangyp@gig.ac.cn.

鄂尔多斯盆地上古生界是中国陆上天然气最富集的区域之一,上古生界从本溪组-太原组-山西组-石盒子组-石千峰组,均有天然气发现。但上古生界主要以隐伏岩性气藏为主,表现为低孔、低渗、低压、低产和低丰度特征,勘探和开发难度较大。鄂尔多斯上古生界气藏,现今气藏流体压力为 6.94~36.32 MPa,压力系数 0.38~1.09(平均 0.89),为典型的低压气藏(王晓梅等,2013),古流体压力对于低压的成因及成藏过程具有重要的指示意义,其中准确反演上古生界古流体压力最为关键。

近年来国内外专家利用烃类包裹体的相态计算(PVTx)来计算古流体的形成压力(Aplin *et al.*, 1999, 2000; 米敬奎等, 2002; Liu *et al.*, 2003)。Aplin 在 2000 年在利用共聚焦显微镜测量流体包裹体气液体积比的基础上,利用模拟软件,计算了北海盆地 Judy 油田油气包裹体的成分、捕获温度和压力,并揭示该油田不同成分石油的形成时间和条件(Aplin *et al.*, 1999, 2000)。米敬奎利用 PVTsim 软件计算出鄂尔多斯盆地上古生界储集层中包裹体的最小捕获压力(米敬奎等, 2002)。肖贤明等(2002)和刘德良等(2002)等分别对鄂尔多斯盆地上古生界储集层流体包裹体进行了研究(刘德良等, 2002; 肖贤明等, 2002)。这些研究显示, PVTx 是反演古流体压力的一种重要手段。而 PetroMod 是目前功能最强大的盆地模拟软件,在恢复含油气盆地古流体压力及演化方面有重要作用。在准确建立地质模型的基础上,利用大型盆地模拟软件,反演盆地古流体压力史也是古流体压力研究的重要手段。本文尝试利用这两种方法以布 1 井为例,对鄂尔多斯盆地西缘逆冲带和天环凹陷上古生界气藏古流体压力进行反演,结合盆地埋藏史和烃源岩的生烃史,对鄂尔多斯盆地西部上古生界古流体压力演化进行分析。

## 1 地质概况与样品信息

### 1.1 地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北陆块西部,面积约 32 万  $\text{km}^2$ ,是一个稳定的大型克拉通叠合盆地,盆地内发育有 3 套烃源岩,其中上古生界石炭-二叠系煤系地层及中生界陆相泥岩是主要烃源岩(张盛, 2006)。鄂尔多斯盆地经历了早古生代浅海台地,晚古生代海陆交互沉积、中生代前陆盆地阶段和新生代周边断陷 4 大沉积演化阶段。根据现今构造发育特征,可将盆地划分为 6 个次级单元:分别为渭北隆

起、陕北隆起、陕北斜坡、天环坳陷、西缘逆冲带、晋西挠褶带和伊盟隆起(宫色等, 2007)(图 1)。布 1 井位于盆地西部,西缘逆冲带与天环向斜的交界部位。本文选择布 1 井为研究对象,有助于认识盆地边缘到盆地内部演化过程中流体的变化特征。

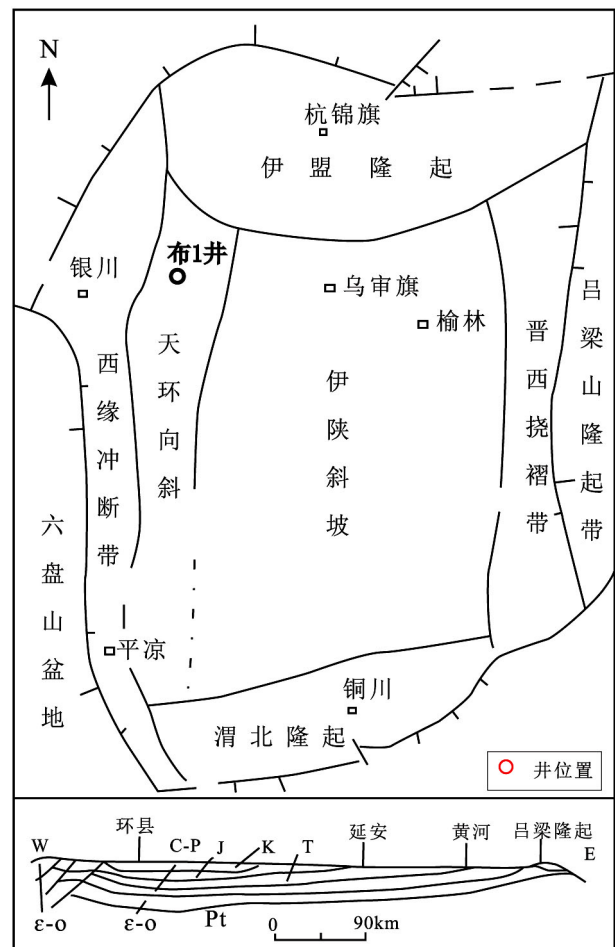


图 1 鄂尔多斯盆地构造图(宫色等, 2007)

Fig.1 The tectonic map of the Ordos Basin( Gong Se *et al.*, 2007)

### 2.2 样品信息

岩石样品采自鄂尔多斯盆地天环凹陷的北部地区布 1 井,井深 3980.4 m,层位  $T_2$ ,为灰褐色中砂岩。在布 1 井样品中共发现 2 个包裹体,分别命名为 bu1-05-1 和 bu1-05-2,对其进行 PVTx 模拟,包裹体显微相片见图 2。

## 2 包裹体 PVTx 与 PetroMod 反演方法

### 2.1 气态包裹体 PVTx 计算方法

2.1.1 初始模拟流体组分的选择 由于以气态烃为主,选择初始模拟流体组分时,以附近井的凝析油组分为参考,输入初始模拟流体组分,没有直接选择现今天然气组分。主要原因是根据模拟过程

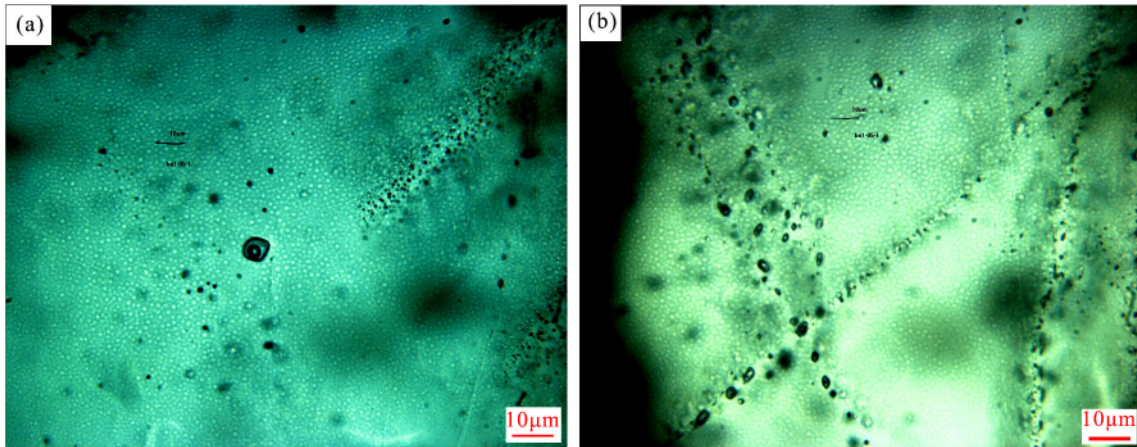


图2 鄂尔多斯盆地布1井砂岩包裹体显微照片(偏光, 30倍)

Fig.2 The micrographs of sandstone inclusions of the Bu1 well in the Ordos Basin( Polarized ×30)

中的经验,由于现今天然气组分非常干,与包裹体形成时相比已有了较大变化。以这样的组分开始模拟时往往没有临界点,给模拟造成了很大难度。因此模拟以凝析油开始。

2.1.2 模拟及压力计算 图3为布1井气态烃模拟体系相图、等容线及盐水包裹体等容线。图中红色线为烃类流体  $p-t$  相图,蓝色线为烃类流体体系等容线,黄色线为同期盐水体系等容线。

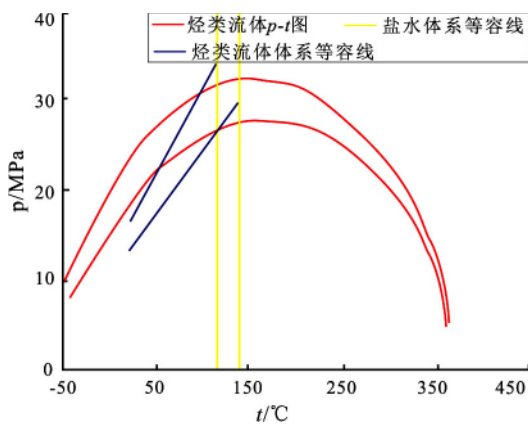


图3 鄂尔多斯盆地布1井上古生界地层气态烃包裹体流体相图

Fig.3 The Upper Paleozoic strata gaseous hydrocarbon inclusions fluid phase of the Bu-1 well in Ordos Basin

对布1井的两个包裹体样品进行均一温度测定和捕获压力计算。测得布1井包裹体样品1均一温度为 98.2°C,捕获压力为 34.38 MPa,包裹体样品2均一温度为 121°C,捕获压力为 30.01 MPa。布1井包裹体温度和压力的变化说明两个包裹体所捕获的古流体具有不同的特征。

## 2.2 PetroMod 古流体压力模拟方法

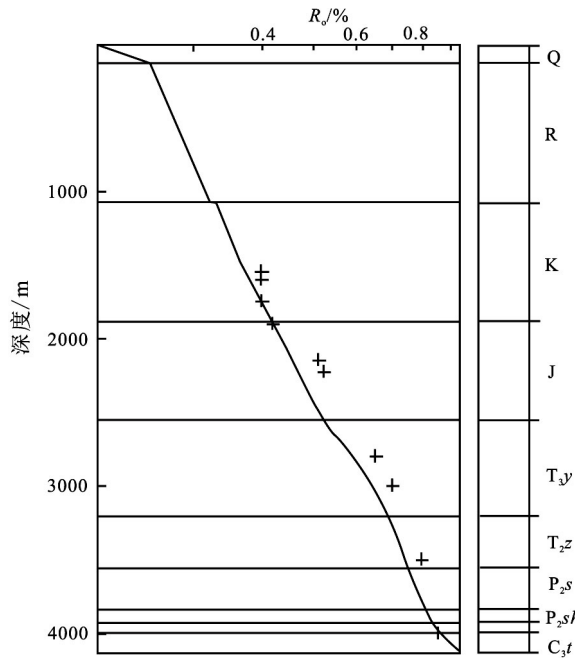
### 2.2.1 PetroMod 古流体压力模拟方法 PetroMod

软件是德国 IES 公司开发的含油气系统分析软件,模拟的原理是从油气形成的物理化学机理出发,通过钻井的实际地质资料建立地质模型和数学模型,由计算机定量模拟油气盆地的形成和演化,以及烃类的生成、运移和聚集(石广仁,1999)。应用盆地模拟方法对古流体压力的恢复主要是采用回剥的方法把某一地层现今的厚度和地层压力恢复到沉积时或埋藏中途某一时刻的厚度和压力(李善鹏和邱楠生,2003)。通过对单井古压力演化及生烃史进行恢复,并得到古压力演化史及生烃史。

(1) 地质模型的建立:获取盆地模拟所需的地质参数,包括地层厚度、剥蚀厚度、各层的沉积和剥蚀时间、各种岩性与孔渗的关系;热史的古今地温梯度、大地热流值;烃源岩厚度及其有机碳数和烃指数等,生烃动力学参数采用鄂尔多斯盆地低成熟太原组煤通过模拟实验获得(付小东,2006),其中频率因子  $A = 1.41E+13s^{-1}$ ,活化能分布范围为 172~272 kJ/mol,主活化能为 209 kJ/mol。在上述参数获取的基础上建立地质模型,从而进行埋藏史、热史、生排烃史的模拟,进而得到压力演化史。

(2) 模型校正:在盆地模拟过程中,由于某些参数的不确定性,因此在一次模拟结束后需要用现今获得的实测数据进行拟合,将模拟结果对比实测数据进行调试,使模拟结果与实测值相吻合,使其符合盆地分析结果(高永进等,2009)。

本次模拟选用了钻井样品成熟度对模型进行校正。布1井的校正结果见图4。从图中可以看出,模拟的成熟度与实测数值吻合度高,说明本文建立的地质模型,可以进行埋藏史、热史、生烃史及古流体压力演化史的模拟。



—代表模拟的  $R_o$  值, +代表实测的  $R_o$  值

图4 为布1井 PetroMod 软件成熟度模拟图(成熟度数据来自任战利等,1994,1997;王飞雁等,2004;高胜利和任战利,2006;于强等,2012;于强,2012)

Fig.4 Simulation diagram of maturity by PetroMod of the Bu-1 well (the maturity data are from literature Ren Zhanli *et al.*, 1994, 2007; Wang Feiyan *et al.*, 2004; Gao Shengli and Ren Zhanli, 2006; Yu Qiang *et al.*, 2012; Yu Qiang, 2012)

### 3 古流体压力的反演及演化

流体包裹体含有油气在运移与聚集过程中的重要信息,利用 PVTx 相态模拟得到的包裹体均一温度及捕获压力,结合 PetroMod 盆地模拟软件得到的埋藏史及古流体压力演化史来确定包裹体形成的地质年代,进而确定油气成藏的时间。由 PVTx 相态模拟

结果得到布1井两期包裹体均一温度及捕获压力分别为 98.2℃, 34.38 MPa 和 121℃, 30.01 MPa。

通过包裹体的均一温度,通过 PetroMod 盆地模拟软件恢复埋藏史及热史(如图5左),再由盆地模拟软件得到的古流体压力演化史图,结合由 PVTx 相态模拟得到的捕获压力来估算油气形成的时间(刘杨,2010)。

利用 PVTx 相态模拟结合 PetroMod 盆地模拟得到的古流体压力演化史可以得到包裹体形成的时间(如图5右)。从图中得到捕获压力 34.38 MPa 与 30.01 MPa 对应的时间在 104~122 Ma(晚白垩世)。

图6中由包裹体形成的时间可得到对应的  $R_o \approx 0.68\% \sim 0.76\%$ 。为烃源岩快速生烃阶段。

根据 PVTx 相态模拟及 PetroMod 盆地模拟结果,得到鄂尔多斯盆地天环凹陷地区油气成藏时间约在 122~104 Ma(晚白垩世)。这与西北大学樊爱萍 2004 年硕士论文里面得到的鄂尔多斯盆地上古生界苏里格庙第三期成藏年代 123~122 Ma 基本相近(樊爱萍,2004),其论文里面对鄂尔多斯盆地苏里格庙,乌审旗,榆林及神木—米脂等4个地区对油气成藏时间进行了研究,其结果表明鄂尔多斯盆地4个地区天然气充注与成藏的时间具有良好的一致性,而天环凹陷与苏里格庙相近,两个地区成藏史应该相近。可以看出,用 PVTx 相态模拟得到的包裹体捕获压力结合 PetroMod 盆地模拟得到的古流体压力演化史得到的油气成藏时间是可靠的,这两种方法的结合对于推算油气成藏时间是一种可靠的方法。

### 4 结论

利用包裹体 PVTx 相态模拟得到布1井两个包

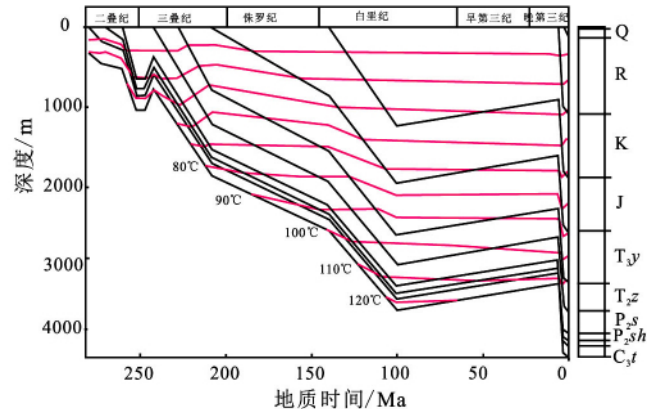
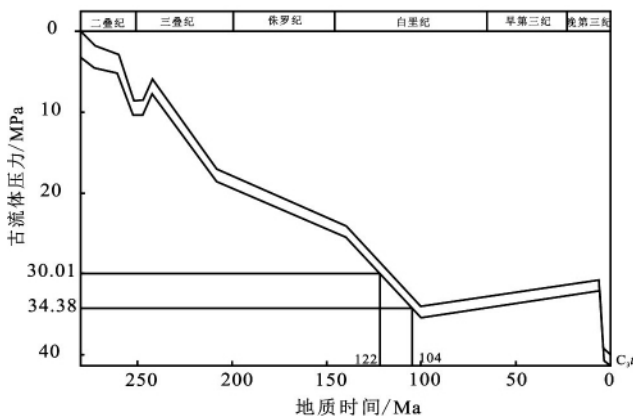


图5 鄂尔多斯盆地布1井埋藏史和热史图(左)及布1井捕获压力随时间演化史(右)

Fig.5 The diagram of burial history and thermal history of the Bu-1 well in the Ordos Basin (left) and the diagram of fluid pressure evolution history in the Bu-1 well (right)

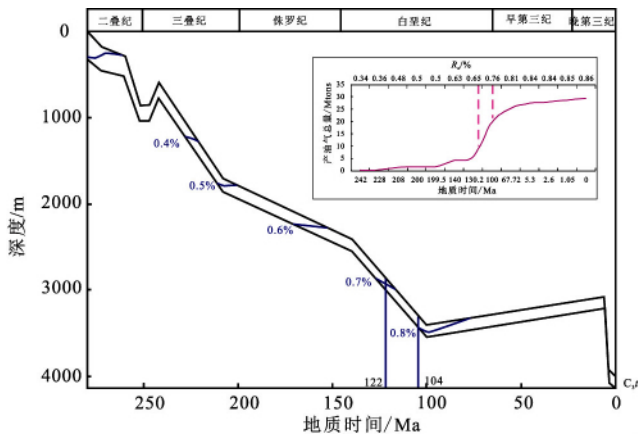


图6 布1井包裹体形成的地质时间对应的  $R_o$

Fig.6 The geologic time of inclusions formation corresponding to  $R_o$

裹体样品均一温度及捕获压力分别为 98.2℃, 34.38 MPa 和 121℃, 30.01 MPa。PetroMod 盆地模拟得到了鄂尔多斯盆地西缘逆冲带和西环凹陷古流体压力演化史,结合 PVTx 相态模拟及 PetroMod 盆地软件模拟得到的结果,得到鄂尔多斯盆地天环凹陷地区上古生界油气藏成藏年代为 122 ~ 104 Ma。最后根据包裹体形成的时间,结合烃源岩生烃史,推导出天环凹陷包裹体形成时对应的成熟度为  $R_o \approx 0.68\% \sim 0.76\%$ ,为烃源岩快速生烃阶段。将 PVTx 相态模拟及 PetroMod 盆地模拟系统相结合可以准确反演古流体压力,可以为古压力演化分析及油气成藏进程研究提供可靠信息。

参考文献 (References):

Aplin A C, Macleod G, Larter S R, Pedersen K S, Sorensen H, Booth T. 1999. Combined use of Confocal Laser Microscopy and PVTx simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions. *Marine Petroleum Geology*, 16(2): 97-110

Aplin A C, Larter S R, Bigge M A, Macleod G, Swarbrick R E, Grunberger D. 2000. PVTx history of the North sea's Judy oilfield. *Journal of Geochemical Exploration*, 60-70: 641-644

Liu D H, Xiao X M, Mi J K, Li X Q, Shen J K, Song Z G, Peng P A. 2003. Determination of trapping pressure and temperature of petroleum inclusions using PVT simulation software—a case study of Lower Ordovician carbonates from the Lunnan Low Uplift, Tarim Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 20(1): 29-43

樊爱萍. 2004. 鄂尔多斯盆地上古生界储集层流体包裹体研究[硕士学位论文]. 西安: 西北大学

付小东. 2006. 开放系统下不同类型烃源岩生烃动力学实验及应用[硕士学位论文]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所

高胜利,任战利. 2006. 鄂尔多斯盆地剥蚀厚度恢复及其对上古生界烃源岩热演化程度的影响. *石油与天然气地质*, 27(2): 180-186

高永进,田苗,姜振学,于永利,渠冬芳. 2009. 东营凹陷南坡多参数约束的流体压力场演化特征. 见第五届油气成藏机理与油气资源评价国际学术研讨会论文集. 北京: 石油工业出版社, 80-94

官色,张文正,彭平安,帅燕华,戴金星. 2007. 应用包裹体信息探讨鄂尔多斯盆地上古生界天然气藏的成藏后的气藏改造作用. *中国科学(D辑)*, 37(增刊II): 141-148

李善鹏,邱楠生. 2003. 利用盆地模拟方法分析昌潍拗陷古压力. *新疆石油学院学报*, 15(4): 5-8

刘德良,谈迎,孙先如,李振生,方国庆,陶士振. 2002. 鄂尔多斯古生界流体包裹体特征及其与油气演化关系. *沉积学报*, 20(4): 695-704

刘杨. 2010. 包裹体 PVTx 模拟及其在松辽盆地齐家北地区中的应用[硕士学位论文]. 大庆: 大庆石油学院

米敬奎,肖贤明,刘德汉,申家贵. 2002. 鄂尔多斯盆地上古生界储集层中包裹体最小捕获压力的  $pV_{sim}$  模拟. *地球化学*, 31(4): 402-406

任战利,赵重远,张军,于忠平. 1994. 鄂尔多斯盆地古地温研究. *沉积学报*, 12(1): 56-65

任战利,张盛,高胜利,崔军平,肖媛媛,肖晖. 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(D辑)*, 37(增刊I): 23-32

石广仁. 1999. 油气盆地数值模拟方法. 北京: 石油工业出版社, 9-235

王飞雁,魏新善,王怀厂,李雪梅. 2004. 鄂尔多斯盆地上古生界压力分布特征及其压力降低原因浅析. *低渗透油气田*, 9(1): 10-14

王晓梅,赵靖舟,刘新社,赵小会,曹青. 2013. 鄂尔多斯盆地东部上古生界现今地层压力分布特征及成因. *石油与天然气地质*, 34(5): 646-651

肖贤明,刘祖发,刘德汉,米敬奎,申家贵,宋文光. 2002. 应用储集层流体包裹体信息研究天然气藏的成藏时间. *科学通报*, 47(12): 957-960

于强,任战利,王宝江,高利军,李成福,曹红霞. 2012. 鄂尔多斯盆地延长探区上古生界热演化史. *地质论评*, 58(2): 303-308

于强. 2012. 鄂尔多斯盆地中东部地区古生界热演化史与天然气成藏[博士学位论文]. 西安: 西北大学

张盛. 2006. 鄂尔多斯盆地古地温演化与多种能源矿产关系的研究[硕士学位论文]. 西安: 西北大学

( 本文责任编辑: 刘莹)