

伊—陕斜坡山 2 段包裹体古流体势 恢复及天然气聚集条件

刘建章¹, 陈红汉¹, 李 剑², 胡国艺², 单秀琴², 罗 霞²

1. 中国地质大学资源学院石油系, 湖北武汉 430074

2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007

摘要: 恢复自烃类生成以来的各个地史时期的古流体势, 有助于正确认识油气藏的分布规律。通过对鄂尔多斯盆地伊—陕斜坡太原组—山西组砂岩储层流体包裹体样品的系统分析, 将其油气充注划分为 6 个期次; 结合埋藏史分析, 确定出 6 期油气充注发生的时间。在此基础上, 运用流体包裹体 pVT 热动力学模拟的方法, 获得了 6 期油气充注的古压力数据, 并计算出伊—陕斜坡山 2 段 6 期次天然气充注的古气势, 分析了古气势分布及时空演化规律, 认为区域构造和热史演化是其主要控制因素。结合区域地质资料, 探讨了天然气运移与聚集规律: 晚三叠世中期至中侏罗世末期, 山 2 段储层气势西南高而北部、东北部低, 天然气主要从西南向北、东北向运移; 中侏罗世末期至早白垩世末期, 气势西高东低, 天然气主要由西向东就近运移, 再向北和东北向运移; 早白垩世末至现今, 天然气藏进入聚集与散失的动平衡状态, 形成现今分布特征。榆林及其南部地区是天然气聚集的最有利地带, 其次为神木—米脂地区。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 流体包裹体; 古流体势; 油气运移。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2007)01-0093-06

收稿日期: 2006-03-11

Using Fluid Inclusion Thermodynamic Modeling to Study Paleo-Fluid Potential and Natural Gas Migration and Accumulation of the No. 2 Member of Shanxi Formation of the Upper Paleozoic in Yi-Shaan Slope, Ordos Basin

LIU Jian-zhang¹, CHEN Hong-han¹, LI Jian², HU Guo-yi², SHAN Xiu-qin², LUO Xia²

1. Department of Petroleum Geology, Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Langfang Branch of RIPED of PetroChina, Langfang 065007, China

Abstract: Reconstruction of paleo-fluid potential during each geological period after hydrocarbon generation may be helpful to clearly recognize the hydrocarbon reservoir distribution. In this research, the samples including reservoir fluid from Taiyuan and Shanxi formations of the Upper Paleozoic in Yi-Shaan slope, Ordos basin were obtained, and the systematic analysis of the sample was used to measure the homogenization temperature for all orders of fluid inclusions mainly in trails, salinity for aqueous inclusions and the fluorescence colors for hydrocarbon inclusions. The result indicates that there are six period times of hydrocarbon charging in the sandstone reservoirs, and the gas charging is statistically dominating. By integrating the average homogenization temperatures with burial historical curves, the six charging times are determined. By employing the fluid inclusion pVT thermodynamic modeling, the paleo-formation pressure of these six times of hydrocarbon charging is obtained, and the six periods of paleo-gas potential of No. 2 member of Shanxi Formation of the Upper Paleozoic in Yi-Shaan slope are calculated, and the paleo-gas potential distribution and evolution are depicted, and the evolution of regional tectonics and geothermal history are found out to be the main controlling factors. According to the regional geological conditions, the law of the nature gas migration and accumulation of No. 2 member of Shanxi Formation of the Upper Paleozoic in Yi-Shaan slope is discussed. From the middle Late Triassic to the late Middle Jurassic, the natural gas mainly migrated from

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40372068).

作者简介: 刘建章 (1976—), 男, 博士研究生, 主要从事石油地质方面的研究. E-mail: liujzh@126.com

southwest to north, northeast, because the paleo-gas potential in the southwest zone was higher than that in the north and northeast zones; from the late Middle Jurassic to the late Early Cretaceous, the paleo-gas potential in the west zone was higher than that in the east zone and the natural gas migrated eastward and then northeastward; after that, the natural gas accumulation is in equilibrium with dissipation, which results in today's distribution features. The Yulin zone and the southern zone of Yulin have the most important significance to the exploration of the No. 2 member of Shanxi Formation of the Upper Paleozoic in Yi-Shaan slope, and secondly to the Shenmu-Mizhi zone.

Key words: the Ordos basin; fluid inclusions; paleo-fluid potential; hydrocarbon migration.

0 引言

目前,流体势已成为定量研究油气运移问题的理论基础和依据.通过对油气生成运移时期的古流体势恢复,可以更可靠地判识有利油气聚集区.在油气不同演化阶段成岩矿物和裂纹所捕获的流体包裹体含有丰富的古油气成藏信息,这些有用的信息近年来在油气成藏研究中得到广泛应用(Aplin *et al.*, 1999, 2000; Middleton *et al.*, 2000; Munz, 2001; Parnell *et al.*, 2001; 陈红汉等, 2002; Chen *et al.*, 2003; 米敬奎等, 2003).例如,通过对同一地层、同一期次的成岩矿物中流体包裹体进行研究,可以比较准确地计算出各期次的古流体势(刘斌和沈昆, 1998).这是一种从微观角度、运用正演的方法获得地层古流体势技术,它不同于过去主要从宏观上、运用数值模拟技术获得地层古流体势的方法.

鄂尔多斯盆地主体部分为一向西倾斜、倾角不到 1° 的大型平缓斜坡,即伊—陕斜坡(杨俊杰, 2002).盆地上古生界致密砂岩中普遍钻遇天然气,气源主要来自于自身广布的石炭、二叠系海陆交互相煤系地层(杨俊杰, 2002; 戴金星等, 2003; 闵琪等, 2000; 汪正江等, 2002).

前人(王震亮和陈荷立, 1998; 王震亮等, 2004; 金爱民等, 2003)对鄂尔多斯盆地上古生界的流体动力场分析已做了大量卓有成效的研究,但在地层古流体势研究方面,除了采用压实分析法或盆地模拟的方法求其古流体势之外,只对少数几块流体包裹体样品进行了古压力模拟(米敬奎等, 2003),难以从整体上了解古流体动力场的时空分布和演化.本文通过对研究区目的层 110 块成岩流体包裹体样品系统分析,划分油气充注期次和成藏时期,运用包裹体 pVT 热动力学模拟的方法求取目的层各期次油气运移的古压力,结合埋藏史分析计算出各时期的古气势,在此基础上初步探讨了研究区天然气运聚规律并预测了有利区带.

1 样品采集与处理

本研究采集了 68 口井本溪组一盒 8 段致密砂岩储层中 110 块流体包裹体样品,进行了荧光观察及荧光光谱分析.在此基础上,考虑到样品在平面和垂向上分布的均匀性,挑选伊—陕斜坡上古生界太原组—山西组的 75 块样品做成岩流体包裹体显微测温、测盐等系统分析.在成岩流体包裹体测定时,优选最能反映成岩环境的石英颗粒次生加大边中的流体包裹体和与烃类包裹体共生的同期盐水包裹体,且每块样品均尽量测全,以获得各个期次的数据库.

2 上古生界流体包裹体特征及油气充注期次和成藏时期划分

研究区砂岩储层中的流体包裹体主要分布于较发育的石英颗粒微裂纹和次生加大边中,胶结物中相对较少;数量多,类型丰富,但绝大部分为不发荧光的盐水包裹体和气体包裹体.有机包裹体个体较小,以含溶解轻烃盐水包裹体、富气态烃包裹体和纯天然气单相包裹体为主,而油包裹体相对数量少,以发蓝色和蓝白色荧光为主,少量发黄色荧光;表明本区以天然气充注为主,但有一定的油充注(刘建章等, 2005).

流体包裹体荧光观察、显微测温、测盐,结合成岩作用研究综合分析表明,鄂尔多斯盆地上古生界太原组—山西组油气充注具有多阶连续性特征,具体可划分为 6 期,并以第 2~6 期的天然气充注为主.结合埋藏史分析,6 期次油气充注时间大致可划分为:(1)晚三叠世中期—早侏罗世中期(T_3 中— J_1 中);(2)早侏罗世中期—中侏罗世中期(J_1 中— J_2 中);(3)中侏罗世中期—中侏罗世末期(J_2 中— J_2 末);(4)中侏罗世末期—早白垩世中早期(J_2 末— K_1 中早期);(5)早白垩世中早期—早白垩世中晚期(K_1 中早期— K_1 中晚期);(6)早白垩世中晚期—早

白垩世末期(K_1 中晚期— K_1 末期). 晚三叠世中期—早侏罗世中期只有少量的天然气和油充注, 早侏罗世中期—早白垩世末期有一定量的高成熟度油和大量天然气充注; 早侏罗世中期—早白垩世末期是鄂尔多斯盆地伊—陕斜坡上古生界的主要成藏时期, 进一步证实了前人(戴金星等, 2003; 闵琪等, 2000; 汪正江等, 2002; 杨俊杰, 2002; 张金亮和常象春, 2002)从地质角度获得的基本认识.

3 包裹体流体势的计算

3.1 流体势的概念

Hubbert(1953)和England(1987)将单位质量的流体所具有的机械能的总和定义为流体势. 在研究中一般使用简化的 Hubbert 势模型表述:

$$\Phi = gz + \frac{p}{\rho}. \quad (1)$$

上式中, Φ 为流体势; g 为重力加速度; z 为该点相对于某一基准面的高程; p 为该点流体压力; ρ 为该点流体密度.

可见, 古流体势恢复中的关键参数是地层古高程、古流体压力及地下流体密度.

3.2 流体势的计算

分别对同一地层、同一时期的流体包裹体进行测定, 可以计算出流体密度、压力和相对古高程的准确数值, 采用的方法如下:

(1)古高程(z): 把所测样品各期次盐水包裹体的平均均一温度“投影”到标有温度的精细埋藏史图中, 该点所对应的高程可近似作为各成藏期的古高程.

(2)古压力(p): 采用流体包裹体 pVT 热动力学模拟的方法. 其基本原理是运用同期盐水包裹体和含烃或烃类包裹体化学体系在 $p-T$ 空间投影的等容线单值变化和不同组成流体包裹体等容线在此 $p-T$ 空间只相交一次的物理特性, 确定烃类流体包裹体最小捕获压力(Munz, 2001; 陈红汉等, 2002; Chen *et al.*, 2002).

用 100 倍 8 mm 长焦工作镜头的 Olympus 显微镜测定室温压条件下流体包裹体气、液直径, 计算其半径立方比, 作为其气/液比; 把用真空研磨仪外接四极质谱仪获得的流体包裹体化学成分, 作为测定期次包裹体的“平均成分”; 将各期次盐水包裹体的平均均一温度及其共生的同期含烃盐水包裹体或烃类包裹体的平均均一温度、气/液比和化学组成输入

pVT 热动力学模拟软件——VTFLINC 软件, 即可求得各期次流体包裹体的最小捕获压力, 近似作为油气运移期的地层古流体压力(陈红汉等, 2002; Chen *et al.*, 2003).

(3)流体密度(ρ): 根据上述盐水包裹体的平均均一温度和古流体压力, 结合研究区天然气的视分子量, 通过查阅有关的诺模图版, 即可近似求得天然气的地下密度. 本研究计算出的天然气密度范围为 0.208~0.268 g/cm³, 主要介于 0.225~0.258 g/cm³.

根据上述方法, 将求得的各期次的参数, 代入公式(1)即可计算出各期次的流体势.

4 古气势分布、演化特征及其主控因素

本研究以二叠系山2段为例, 定量恢复了各个成藏期次的古气势(图 1a—1f), 分析其分布特征、时空演化规律及其控制因素.

4.1 古气势分布、演化特征分析

(1)第1期(T_3 中— J_1 中): 气势分布特征以陕 11 井为高气势中心, 向东、东北、北部降低, 神 12 井、台 1 井、陕 231 井为低气势区(图 1a).

(2)第2期(J_1 中— J_2 中): 有 2 个高气势中心, 南部以陕 111 井为中心, 向北部、和东北方向降低; 北部位于陕 231 井—陕 117 井—榆 24 井, 呈一带状向盟 5 井近北东向延伸; 该时期气势总体表现为西部和西南部高, 而北部、东北部低(图 1b).

(3)第3期(J_2 中— J_2 末): 主要有两个高气势区, 西南部以陕 99 井—陕 138 井为高气势中心, 向北部和东北方向降低; 与前期相比, 气势值增大, 高势区向北推进; 北部高气势中心迁移到榆 25 井, 而临近的西南和东北方向低; 总的看来, 低气势中心位于研究区中部, 夹在两个高势区之间(图 1c).

(4)第4期(J_2 末— K_1 中早期): 气势总体表现为西高东低, 气势从西向东降低, 榆 32 井—陕 208 井为低气势闭合区(图 1d).

(5)第5期(K_1 中早期— K_1 中晚期): 气势低值区位于研究区中心榆 6 井—陕 219 井—陕 208 井, 呈南北向的葫芦形展布, 高气势区位于其两侧; 总体表现为中心气势低, 边缘气势值高(图 1e).

(6)第6期(K_1 中晚期— K_1 末): 气势分布相对简单, 以乌审旗—榆 43—8 井为高气势中心区呈近西

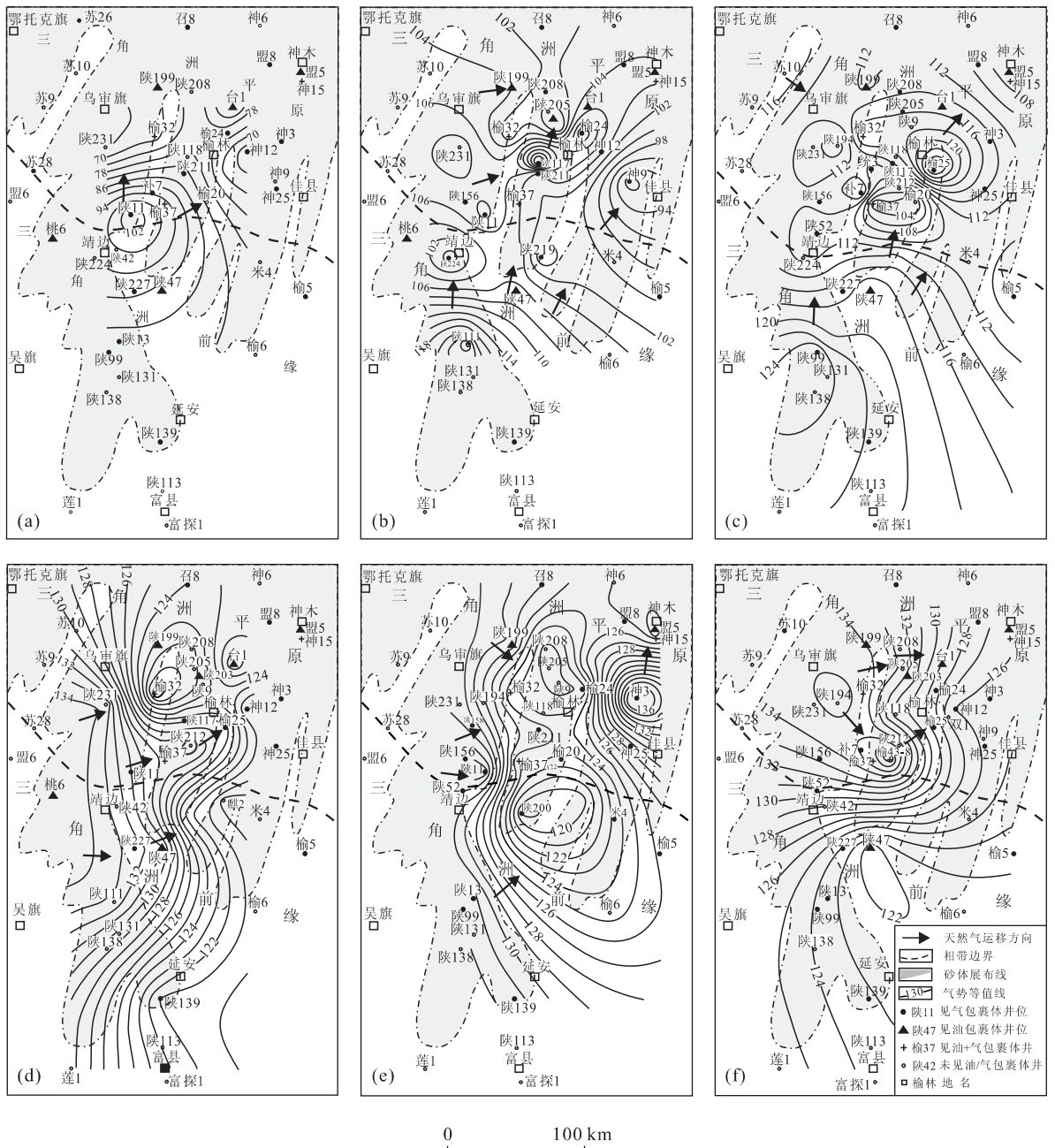


图 1 伊—陕斜坡上古生界山 2 段储层古气势分布与演化

Fig. 1 Map showing the paleo-gas potential distribution and evolution of No. 2 member reservoir of Shanxi Formation of the Upper Paleozoic in Yi-Shaan slope, Ordos basin

a. 第 1 期: T₃ 中期—J₁ 中期; b. 第 2 期: J₁ 中期—J₂ 中期; c. 第 3 期: J₂ 中期—J₂ 末期; d. 第 4 期: J₂ 末期—K₁ 中早期; e. 第 5 期: K₁ 中早期—K₁ 中晚期; f. 第 6 期: K₁ 中晚期—K₁ 末期

北—东南向展布, 向南、东、东北气势降低(图 1f).

(7) 现今: 气势整体上由东向西降低, 在中部气田区和榆林地区, 分布较复杂, 在较大范围内形成多个等势区, 这是天然气相对聚集集中地在气体渗流力学上的反映(金爱民等, 2003). 现今气势分布特征与早白垩世中晚期基本相似, 可能表明天然气经过

长期演化, 其分布特征又恢复到早白垩世中晚期的格局, 但变得更为复杂.

4.2 区域构造和热史演化控制了古气势分布及演化

上述古气势分布及演化表明: 晚三叠世中期至中侏罗世末期, 高气势区位于西南部, 向东北逐渐推

进;中侏罗世末期至早白垩世末期,气势总体特征为西高东低。结合盆地地热史和构造发展史(戴金星等,2003;汪正江等,2002;杨俊杰,2002;张金亮和常象春,2002)可以看出,本研究恢复的古气势分布及演化特征与研究区地质背景基本吻合,且主要受控于区域构造和热史演化。鄂尔多斯盆地上古生界石炭—二叠系煤系地层的烃源岩,在晚三叠世末受深成热成熟作用的影响开始生气,且生气强度由南向北减小;早中侏罗纪末,受深成热变质作用和局部热力场控制,形成延安—富县—庆阳、乌审旗两个生气中心,该时期,受早、中期燕山运动的影响,构造背景为南倾北抬的斜坡,天然气以向北、及东北方向运移为主;晚侏罗世至早白垩世,受深成热变质作用和构造热事件控制,整个盆地达到生气高峰,受晚期燕山运动的影响,构造格局转变为西低东高,天然气以向东和东北向运移为主;早白垩世以后,地层抬升剥蚀,上古生界源岩埋深变浅,温度降低,生气强度减弱,天然气部分散失。图 1f 表明,早白垩世末乌审旗生气区生、排气强度相对较大,可能成为主要供气中心;与前人(闵琪等,2000)的观点“延安—富县生气区成熟度高、排运气期早(印支期)而乌审旗成熟度低、排运期较晚(燕山中期)”相吻合。

5 天然气成藏规律初步探讨

区域地质资料表明,上古生界山西组砂体主要呈现与构造走向一致的南北向展布,且北部物性好于南部,而东西方向上沉积相带变化大,砂体的东西向连通性差(闵琪等,2000;杨俊杰,2002;张金亮和常象春,2002)。结合上述古气势分布与时空演化规律,可以将鄂尔多斯盆地伊—陕斜坡上古生界山 2 段天然气成藏划分为 3 个阶段:(1)晚三叠世中期至中侏罗世末期,随上古生界煤系地层烃源岩生气强度增强,古气势由西南向北、东北逐渐推进,天然气主要沿南北向展布的砂体从南向北、东北方向运移。(2)中侏罗世末期至早白垩世末期,气势总体表现为西高东低,天然气可能主要沿砂体连通部分和储层中的裂缝从西向东就近运移,然后顺砂体展布从南向储层物性较好的北部、东北部运移。早白垩世中晚期,已基本形成了伊—陕斜坡上古生界气藏的基本分布形态,南北向展布的低势区为天然气运移聚集的有利地区。(3)早白垩世末至现今,由于地层抬升剥蚀,上古生界源岩供气强度减弱,天然气藏进入聚

集与散失的动平衡状态,形成现今复杂的分布格局。

前两个阶段是研究区气藏的主要形成时期,而后一阶段的长期演化使气藏分布变得复杂化。

榆林地区长期位于天然气运聚指向的低势闭合带,且物性相对较好,为最有利的天然气聚集区,也是现今上古生界山 2 段气藏的主要发现区;榆林南部地区靠近延安—富县生气区,是天然气从西南向东北和从西向东运移的枢纽部位,长期位于气势演化的低势区,因此也是有利的天然气聚集地带。榆 37 井山 2 段已喜获高产工业气流;神木—米脂地区具有类似特征,也具有天然气勘探的巨大潜力。

6 结论

古气势恢复研究表明,鄂尔多斯盆地伊—陕斜坡上古生界山 2 段储层中,天然气成藏可划分为三个阶段:晚三叠世中期至中侏罗世末期,气势西南高而北部、东北部低,天然气主要从西南向北、东北运移;中侏罗世末期至早白垩世末期,气势西高东低,天然气主要由西向东就近运移,再向北和东北向运移;早白垩世末至现今,天然气藏进入聚集与散失的动平衡状态,形成现今分布特征。

结合区域地质资料分析表明,榆林地区及其南部地区是天然气聚集的最有利地带;其次为神木—米脂地区。

References

- Aplin, A. C., Larter, S. R., Bigge, M. A., et al., 2000. PVTX history of the North Sea's Judy oil field. *Journal of Geochemical Exploration*, 60-70: 641-644.
- Aplin, A. C., Macleod, G., Larter, S. R., et al., 1999. Combined use of confocal laser microscopy and pVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions. *Marine Petroleum Geo*, 16: 97-110.
- Chen, H. H., Dong, W. L., Zhang, S. L., et al., 2002. Application of fluid inclusion in palaeopressure modeling research. *Oil & Gas Geology*, 9: 207-211 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. H., Wang, J. H., Xie, Y. H., et al., 2003. Geothermometry and geobarometry of overpressured environments in Qiongdongnan basin, South China Sea. *Geofluids*, 3: 177-187.
- Chen, H. H., Yao, S. Z., Wang, J. H., et al., 2002. Thermo-

- dynamic modeling of fluid-bearing natural gas inclusions for geothermometer and geobarometer of overpressured environments in Qiongdongnan basin, South China Sea. *Journal of China University of Geosciences*, 13(3): 240—247.
- Dai, J. X., Chen, J. F., Zhong, N. N., 2003. Large-sized gas fields and their gas source in China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- England, W. A., Mackenzie, A. S., Mann, D. M., et al., 1987. The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *Journal of the Geological Society*, 144: 327—347.
- Hubbert, M. K., 1953. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions. *AAPG Bulletin*, 37(8): 1954—2026.
- Jin, A. M., Lou, Z. H., Zhu, R., et al., 2003. Formation and evolution of the hydrodynamic field and its fluid property in the Up-Palaeozoic reservoir of the Ordos basin. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 30(3): 337—343 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Shen, K., 1998. Application of fluid potential map obtained from fluid inclusion data to the research of oil-gas migration. *Geological Science and Technology Information*, 17 (Suppl.): 81—86 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. Z., Chen, H. H., Li, J., et al., 2005. Using fluid inclusion of reservoir to determine hydrocarbon charging orders and times in the Upper Paleozoic of Ordos basin. *Geological Science and Technology Information*, 24(4): 60—66 (in Chinese with English abstract).
- Mi, J. K., Xiao, X. M., Liu, D. H., et al., 2003. Using fluid inclusion of reservoir pVT characteristic to model the forming paleo-pressure of natural gas reservoir—A case study of the Upper Paleozoic deep basin gas in Ordos basin. *Science in China (Series D)*, 7: 679—685 (in Chinese).
- Middleton, D., Parnell, J., Carey, P., et al., 2000. Reconstruction of fluid migration history Northwest Ireland using fluid inclusion studies. *Journal of Geochemical Exploration*, 69—70: 633—677.
- Min, Q., Yang, H., Fu, J. H., 2000. Deep basin gas in Ordos basin. *Natural Gas Industry*, 20(6): 11—15 (in Chinese with English abstract).
- Munz, I. A., 2001. Petroleum inclusions in sedimentary basins: Systematics, analytical methods and application. *Lithos*, 55: 195—212.
- Parnell, J., Middleton, D., Honghan, C., et al., 2001. The use of integrated fluid inclusion studies in constraining oil charge history and reservoir compartmentation: Examples from the Jeanne d'Arc basin, offshore Newfoundland. *Marine and Petroleum Geology*, 18: 535—549.
- Wang, Z. L., Chen, H. L., 1998. A palaeohydrodynamic analysis of Upper Palaeozoic in middle Ordos basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(4): 105—108 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. L., Zhang, L. K., Sun, M. L., et al., 2004. Natural gas accumulation mechanism in Upper Shihezi and Shiqianfeng formations of Shenmu-Yulin district in northeastern Ordos basin. *Acta Petrolei Sinica*, 25(3): 37—43 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. J., 2002. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, J. L., Chang, X. C., 2002. Geological theory of deep basin gas and its application. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈红汉, 董伟良, 张树林, 等, 2002. 流体包裹体在古压力模拟研究中的应用. *石油与天然气地质*, 9: 207—211.
- 戴金星, 陈践发, 钟宁宁, 2003. 中国大气田及其气源. 北京: 科学出版社.
- 金爱民, 楼章华, 朱蓉, 等, 2003. 地下水动力场的形成、演化及其流体特征分析——以鄂尔多斯盆地上古生界为例. *浙江大学学报(理学版)*, 30(3): 337—343.
- 刘斌, 沈昆, 1998. 包裹体流体势图在油气运聚研究方面的应用. *地质科技情报*, 17(增刊): 81—86.
- 刘建章, 陈红汉, 李剑, 等, 2005. 运用流体包裹体确定鄂尔多斯盆地上古生界油气成藏期次和时期. *地质科技情报*, 24(4): 60—66.
- 米敬奎, 肖贤明, 刘德汉, 等, 2003. 利用储层流体包裹体的 pVT 特征模拟计算天然气藏形成古压力——以鄂尔多斯盆地上古生界深盆地气藏为例. *中国科学(D辑)*, 7: 679—685.
- 闵琪, 杨华, 付金华, 2000. 鄂尔多斯盆地的深盆地. *天然气工业*, 20(6): 11—15.
- 汪正江, 陈红德, 张锦全, 2002. 鄂尔多斯盆地二叠纪煤成气藏特征. *矿物岩石*, 22(3): 47—52.
- 王震亮, 陈荷立, 1998. 鄂尔多斯盆地中部上古生界古流体动力分析. *沉积学报*, 12(4): 105—108.
- 王震亮, 张立宽, 孙明亮, 等, 2004. 鄂尔多斯盆地神木—榆林地区上石盒子组—石千峰组天然气成藏机理. *石油学报*, 25(3): 37—43.
- 杨俊杰, 2002. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律. 北京: 石油工业出版社.
- 张金亮, 常象春, 2002. 深盆地地质理论及应用. 北京: 地质出版社.