

文章编号: 0253-9985(2005)06-0765-05

川东北罗家寨飞仙关组气藏成藏过程及聚集效率

谢增业, 李 剑, 单秀琴, 张 林, 高嘉玉

(中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

摘要: 罗家寨下三叠统飞仙关组气田是四川盆地迄今为止储量规模超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$, 居第 3 位的大型气田。天然气甲烷含量一般为 75.29% ~ 84.95%, 乙烷含量 0.07% ~ 0.11%, 硫化氢含量 7.13% ~ 10.49%, 为高含硫化氢的过成熟干气。罗家寨气田气源主要为上二叠统烃源岩, 富集在中下三叠统区域性膏盐岩盖层之下、受断裂控制的构造圈闭中, 属于下生上储顶盖的它源近常压的垂向运移成藏系统, 成藏条件优越。储层中普遍存在的沥青为古油藏原油裂解成气的中间产物, 并且沥青含量与储层孔隙度及天然气产能呈正相关。气藏的形成主要经历了印支晚期-燕山早中期的鲕粒岩聚油气、液态烃类深埋裂解以及喜马拉雅期的构造形成、流体进行局部调整、构造控气的成藏过程, 烃类充注期主要为中-晚侏罗世。高效的输导体系、优质的储集空间以及良好的封堵条件, 确保了罗家寨气田较高的聚集效率。

关键词: 成藏过程; 聚集效率; 天然气藏; 沥青; 飞仙关组; 四川盆地

中图分类号: TE112.1 文献标识码: A

Reservoiring process and accumulation efficiency of Feixianguan Formation gas pool in LuoJiazhai northeastern Sichuan basin

Xie Zengye, Li Jian, Shan Xiuqin, Zhang Lin, Gao Jiayu

(Langfang Branch of Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Langfang, Hebei)

Abstract LuoJiazhai gas field in Lower Triassic Feixianguan Fm is the third largest gas field in Sichuan basin with gas reserves of over 50 BCM. The natural gas is overmature high H_2S dry gas with methane content generally in the range of 75.29%–84.95%, ethane content in the range of 0.07%–0.11%, and hydrogen sulfide content in the range of 7.13%–10.49%. Natural gas in LuoJiazhai gas field are mainly sourced from the Upper Permian and enriched in the structural traps overlain by the Lower-Middle Triassic regional gypsum-halite cap rock and are controlled by faults. This gas field is of vertical migration and accumulation system with near-normal pressure and allo-genetic gas source, i.e., hydrocarbons have been generated from the source rocks below, accumulated in the reservoirs above and sealed by caprock on the top. It is superior in reservoiring conditions. Bitumens that commonly occur in the reservoirs are the intermediate products resulting from pyrolysis of crude oil into gas in fossil oil reservoirs and the content of bitumen is positively correlated with porosity and gas deliverability. The gas pool has experienced several processes, such as hydrocarbon accumulating in oolitic rocks and liquid hydrocarbon being deeply buried and pyrolyzed during Late Indosinian-Early and Middle Yan-shanian, as well as gas accumulation controlled by structure in the course of structure formation and local adjustment of fluids during Himalayan. Middle-Late Jurassic is the main hydrocarbon charging period. The high accumulation efficiency of LuoJiazhai gas field has been ensured by the highly efficient carrier system, good reservoir space and favorable sealing conditions.

Key words reservoiring process; accumulation efficiency; gas pool; bitumen; Feixianguan Formation; Sichuan basin

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2001CB209103); 国家“十·五”重点科技攻关项目 (2004BA616A-03)

第一作者简介: 谢增业, 男, 40 岁, 高级工程师 (博士), 油气成藏、地球化学

收稿日期: 2005-09-27

自 1995 年四川盆地东北部温泉井构造带渡口河构造带 1 井飞仙关组发生强烈井喷以来, 已陆续在川东北地区发现了渡口河、铁山坡、罗家寨、滚子坪、普光气田和金珠坪、正坝南、黄龙场以及七里北等飞仙关组气藏。至 2004 年底, 已在川东北飞仙关组探明天然气地质储量 $2\,597 \times 10^8 \text{ m}^3$, 控制储量 $67 \times 10^8 \text{ m}^3$, 预测储量 $596 \times 10^8 \text{ m}^3$, 展示了该区飞仙关组良好的天然气勘探前景, 并已成继石炭系后的重要勘探接替层系。这些气藏的储层孔隙中含有丰富的沥青。这些沥青是古油藏原油在高温热降解成气过程中形成的中间产物。通过储层流体包裹体、古流体势及构造演化的分析, 认为喜马拉雅运动对气藏的最终定型成藏及形成规模聚集具有重要的作用^[1]。

1 气藏特征

罗家寨气田位于四川省宣汉县及重庆市开县境内。区域构造位置属于川东断褶带的北部, 五宝场坳陷的东南侧。罗家寨气田的圈闭主要是由近东西向的罗 ① 号北倾逆断层和近北西向的罗 ④ 号南倾逆断层控制的断背斜 (图 1), 断层向上断至下三叠统嘉陵江组, 向下消失在志留系内部, 最大断层落差 $1\,800 \text{ m}^*$ 。

罗家寨气田飞仙组三段——一段 (以下简称飞一段、飞二段、飞三段) 厚度稳定, 一般为 $340 \sim 380 \text{ m}$, 气藏埋深在 $3\,200 \sim 4\,000 \text{ m}$, 鲕滩储层主要发育于飞二段中下亚段至飞一段的上亚段, 有效厚度 $5.25 \sim 85.05 \text{ m}$, 储层距飞三段顶部 $104.5 \sim 167 \text{ m}$, 其储层发育在整个构造上完全可以对比。储集层平均有效孔隙度为 7% , 渗透率平均为 $22.8 \times 10^{-3} \sim 54.0 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$, 构造东段的孔隙性能好于西段。储集空间以各类溶蚀孔隙为主。构造带上的罗家 1 井、罗家 2 井、罗家 4 井、罗家 6 井、罗家 7 井和罗家 8 井属于同一压力系统, 压力系数为 $0.97 \sim 1.28$ 为近常压气藏。

天然气甲烷含量一般为 $75.29\% \sim 84.95\%$, 乙烷含量 $0.07\% \sim 0.11\%$, 硫化氢含量为 $7.13\% \sim 10.49\%$, 二氧化碳含量 $5.13\% \sim 10.41\%$, 属于高含硫化氢、中等含量二氧化碳的过成熟干气藏。探明天然气地质储量 $581 \times 10^8 \text{ m}^3$, 为目前在四川盆地发现的第 3 个储量大于 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大型气田。飞仙关组天然气的烃源岩为二叠系上统滨海海相煤层系和海相暗色泥晶灰岩^[1]。气藏的直接封堵层为其上的致密灰岩以及飞仙关组四段的膏泥质岩, 区域封盖层是中下三叠统嘉陵江组和雷口坡组的膏盐岩系。

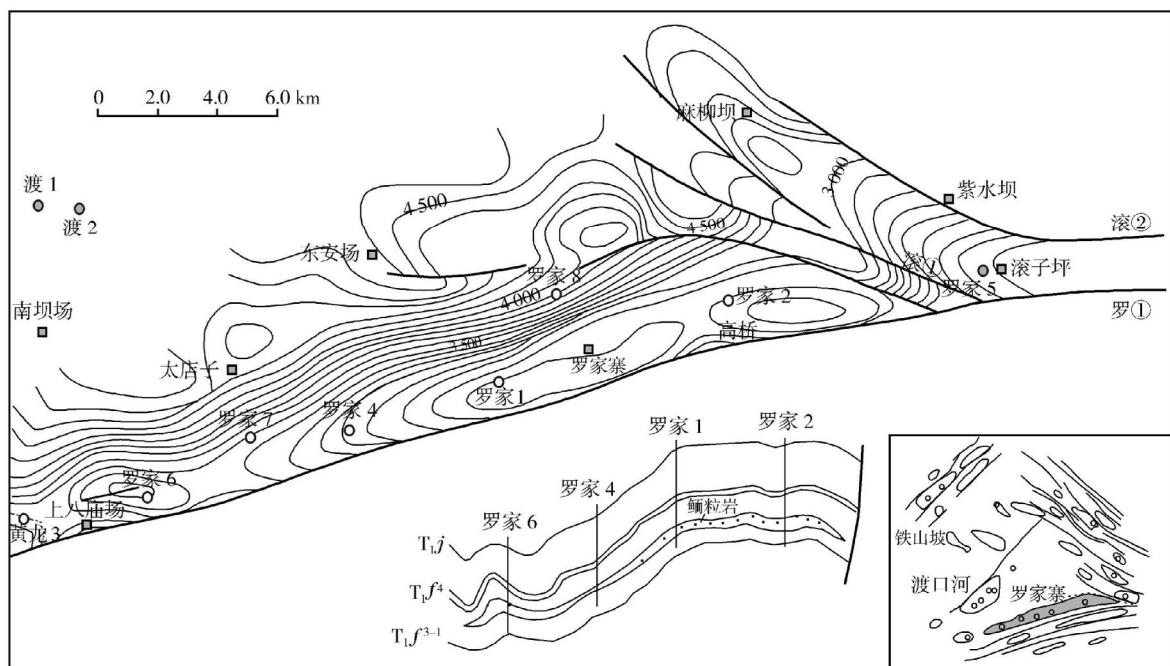


图 1 罗家寨气田飞仙关组气藏分布图

Fig. 1 Distribution of Feixianguan gas pools in Luojiashai gas field

* 徐人芬, 左云安, 伍丽红. 罗家寨气田飞仙关组气藏天然气探明储量报告. 2002

2 天然气性质

Kenneth等^[2~4]的研究结果表明,在地层条件下,地层温度是促使原油发生裂解的主要因素。当层地温度小于 160℃时,原油裂解量极小,而当地层温度达到 200℃时,原油则几乎全部裂解。罗家寨飞仙关组顶面现今埋深为 3 000~ 5 000 m,目前的地温小于 140℃,低于原油发生裂解的最低温度条件,但是,由于中三叠世的印支早期运动和晚侏罗世的燕山中期运动,使该区地层被剥蚀的厚度累计在 3 000~ 4 000 m,尤其是中上侏罗统,被剥蚀地层厚度在 2 500 m 以上^{*}。剥蚀前,川东北地区飞仙关组地层温度普遍超过 190℃。因此具备了发生原油裂解成气的条件。

国内外学者^[5~11]通过模拟实验和典型实例的解剖,证实干酪根初次裂解气和原油二次裂解气的 C₁/C₂ 比值与 C₂/C₃ 比值有一定差异:干酪根初次裂解气 C₁/C₂ 比值逐渐增大, C₂/C₃ 比值基本不变;相反原油二次裂解气 C₁/C₂ 比值基本不变, C₂/C₃ 比值逐渐增大。罗家寨气藏天然气与川东北其他高含硫天然气一样,具有 ln(C₁/C₂) 值变化小 (6.5~ 7.8)和 ln(C₂/C₃) 值变化大 (0.1~ 4.0)的特点,表现出原油二次裂解气的特征。

沥青在地层中是一种常见的产物,其成因多种多样。通过多种地球化学的分析,检测到该气田各类生物标志物分布正常,没有遭受降解、破坏的迹象,并通过模拟实验证实了沥青仍能产气,而且热解产物的 δ³C₁ 值为 - 38.8‰ ~ - 31.4‰, δ³C₂ 值为 - 36.8‰ ~ - 29.5‰,反映了腐泥型有机质的同位素组成特点。同时,应用有机岩石学的方法得到了沥青含量与储层的储集性能及富气带呈正相关关系^{**}。这些结果进一步证实飞仙关鲕滩储层沥青为热解成因的。

3 成藏过程

根据烃源岩生排烃史,储层演化史,圈闭形成史确定烃类的形成时期是较常用的一种研究手段^[12]。20世纪 80年代以来,储层流体包裹体方法在油气成藏研究中得到了广泛的应用^[13~21]。罗家寨(包括滚子坪的罗家 5 井)气田飞仙关组方解石矿物中包裹体均一温度为 90~ 200℃,其中以 140~ 160℃的样品占多数。在该段内大致可分为小于 100℃, 100~ 140℃, 140~ 180℃和大于 180℃ 4 组(图 2)。该区古地温梯度按每百米 2.8℃推算,这些包裹体捕获时的深度约为 2 600~ 6 300m,这一深度所对应的地质时代为中侏罗世一晚侏罗世。

根据包裹体均一温度的测定结果,进一步估算不同期次包裹体中的流体势,从而确定油气运聚的方向,这是近年来包裹体研究领域的新进展。它再现了地质历史时期内油气的动态变化过程。从流体势的计算结果可以看出,罗家寨飞仙关组鲕滩气藏构造带上不同时期流体总的运移方向是从西向东。这一结果与古构造演化反映流体运聚方向的趋势是一致的(表 1)。也就是在地质历史中,罗家寨构造带上流体运移的方向始终是由西向东。

图 3展示了罗家寨气田不同构造部位在不同

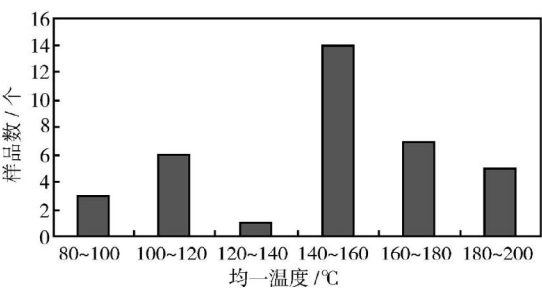


图 2 罗家寨气田飞仙关组包裹体均一温度分布直方图
Fig. 2 Histogram showing distribution of homogenization temperature of inclusions in Feixianguan Fm in LuoJiazhai gas field

表 1 罗家寨构造流体势与古埋深

Table 1 Fluid potential and paleoburial depth in LuoJiazhai structure

均一温度 /℃	捕获深度 /m	流体势 /(m ² · s ⁻²)				古埋深 /m			
		罗家 6	罗家 1	罗家 2	罗家 5	罗家 6	罗家 1	罗家 2	罗家 5
< 100	< 2 600	77 185		58 143		1 784	1 737	1 581	1 632
100~ 140	2 700~ 4 000	79 069	69 662			3 808	3 317	3 041	2 728
140~ 180	4 100~ 5 300			36 239	26 314	5 250	4 870	4 590	4 330
> 180	> 5 400	53 429		43 756		6 810	6 420	6 140	5 930

注: 空白为未测得数据

* 王世谦, 罗启后, 张华义, 等. 四川盆地油气资源评价研究. 2002
** 谢增业. 川东北地区下三叠统飞仙关组鲕滩气藏成藏机理及成藏模式研究. 2003

地质时期内飞仙关组顶面的古地貌、流体势及储层沥青含量的变化趋势。

早三叠世飞仙关期, 鲕粒岩原生孔隙形成之后, 经历了强烈的白云化作用, 孔隙更为发育, 为油气的充注提供了良好的储集空间。

印支晚期—燕山早期, 烃源岩生成的液态烃类, 通过断裂的疏导, 向上运移至飞仙关储层。虽然此时构造圈闭尚未形成, 但该构造带上鲕粒岩的展布从西向东为连续分布, 加上古地貌条件, 促使已进入鲕粒岩中的烃类可以在横向上由西向东进行运移, 并在孔隙性好的鲕粒岩中富集, 与周围的致密岩层形成一种很好的岩性圈闭油藏。从罗家 6 井至罗家 2 井, 流体势由 $77\ 185\ \text{m}^2/\text{s}^2$ 变为 $58\ 143\ \text{m}^2/\text{s}^2$, 反映了烃类从罗家 6 向罗家 2 井运移的趋势 (图 3a)。

燕山中期, 仍然以鲕粒岩控制烃类的富集。随着油气藏埋深的增大和地层温度的升高, 液态烃类逐渐发生裂解, 形成以甲烷为主的干气 (图 3b); 从

罗家 6 井至罗家 1 井, 流体势由 $79\ 069\ \text{m}^2/\text{s}^2$ 变为 $696\ 613\ \text{m}^2/\text{s}^2$, 烃类由西向东运移。

喜马拉雅期, 构造挤压强烈, 构造圈闭最终形成^[22], 气藏由原来主要受岩性控制变成主要由构造控制的断背斜气藏 (图 3c)。罗家 6 井和罗家 2 井流体势分别为 $53\ 429\ \text{m}^2/\text{s}^2$ 和 $43\ 756\ \text{m}^2/\text{s}^2$, 流体运移方向由西向东。由于储层沥青含量与天然气产能呈正相关, 因此储层沥青含量的变化规律也可以作为天然气运移富集的一种佐证。

4 聚集效率

天然气的聚集成藏包括天然气从生成、运移、聚集、保存直至散失的全过程。天然气成藏过程的有效性可以用天然气的净聚集速率 (即天然气向圈闭的充注速率与天然气散失速率的差值) 来衡量^[23], 而净聚集速率则是用天然气成藏—保存阶段内单位面积的净聚集量 (地质储量) 来表示, 即

$$q = Q / (t \times s)$$

式中 q 为天然气净聚集速率, $10^6\ \text{m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$; Q 为天然气藏的地质储量, $10^8\ \text{m}^3$; S 为气藏的圈闭面积, km^2 ; t 为天然气成藏的时间, Ma

沟通上二叠统烃源岩与飞仙关组储层的断裂是罗家寨气田天然气重要的垂向运移通道。虽然在罗家寨气田 $76.9\ \text{km}^2$ 的圈闭范围内只有两条烃源断层, 但其输导效率高, 聚集了 $581.08 \times 10^8\ \text{m}^3$ 的规模储量, 断层的输导效率达到 $3.77 \times 10^8\ \text{m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{条})$, 而且气田的定型成藏时间较晚, 为 $23\ \text{Ma}$ 因此其聚集速率为 $33 \times 10^6\ \text{m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{Ma})$, 与我国其他大中型气田的聚集速率 $[1\ 181 \times 10^6 \sim 0.36 \times 10^6\ \text{m}^3 / (\text{km}^2 \cdot \text{Ma})]$ ^[23] 相比, 属于中效成藏的大型气田。

参 考 文 献

- 1 杨家静, 王一刚, 王兰生, 等. 四川盆地东部长兴组—飞仙关组气藏地球化学特征及气源探讨 [J]. 沉积学报, 2002, 20 (2): 349~353
Yang Jiajing, Wang Yigang, Wang Lansheng, et al. The origin of natural gases and geochemical characters of Changxing reef and Feixianguan oolitic beach gas reservoirs in eastern Sichuan basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 2002, 20(2): 349–353
- 2 Kenneth J J, Alan K B, Robert L B, et al. Temperature and pressure dependence of n-hexadecane cracking [J]. Organic Geochemistry, 1995, 23(10): 941–953
- 3 Schenk H J, Primio R D, Horsfield B. The conversion of oil into

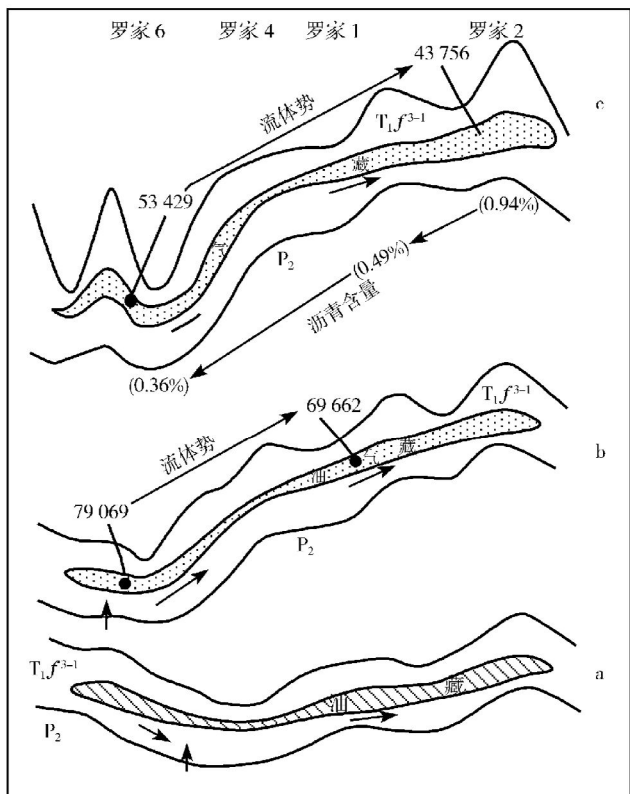


图 3 罗家寨飞仙关组气藏形成过程图

Fig. 3 Diagram showing reservoiring process of Feixianguan gas pool in Luojiashan

a—喜山期, 气藏定型期及岩性—构造控气阶段; b—燕山中期, 烃源岩、液态烃解生气期及鲕粒岩控油气阶段; c—印支晚期—燕山早期, 烃源岩生烃高峰期及鲕粒岩控油气阶段

- gas in petroleum reservoirs Part I: Comparative kinetic investigation of gas generation from crude oils of lacustrine, marine and fluviodeltaic origin by programmed-temperature closed-system pyrolysis[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7/8): 467–481
- 4 Waples D W. The kinetics of in-reservoir oil destruction and gas formation: constraints from experimental and empirical data and from thermodynamics[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(6): 553–575
 - 5 Behar F, Kressmann S, Ludkiewicz J, et al. Experimental simulation in a confined system and kinetic modeling of kerogen and oil cracking[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19(1–3): 173–189
 - 6 Behar F, Vandenbroucke M, Teernann S C, et al. Experimental simulation of gas generation from coals and marine kerogen[J]. *Chemical Geology*, 1995, 126(3–4): 247–260
 - 7 Alain A P, Alain Y H. Genetic and post-genetic molecular and isotopic fractionations in natural gases[J]. *Chemical Geology*, 1995, 126(3–4): 281–290
 - 8 赵孟军, 张水昌, 廖志勤. 原油裂解气在天然气勘探中的意义[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(4): 47–49
Zhao Mengjun, Zhang Shuichang, Liao Zhiqin. The cracking gas from crude oil and its significance in gas exploration[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2001, 28(4): 47–49
 - 9 赵孟军, 曾凡刚, 秦胜飞, 等. 塔里木发现和证实两种裂解气[J]. *天然气工业*, 2001, 21(1): 35–39
Zhao Mengjun, Zeng Fangang, Qin Shengfei, et al. Two pyrolytic gases found and proved in Talimu basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(1): 35–39
 - 10 王振平, 付晓泰, 卢双舫, 等. 原油裂解成气模拟实验、产物特征及意义[J]. *天然气工业*, 2001, 21(3): 12–15
Wang Zhenping, Fu Xiaotai, Lu Shuangfang, et al. An analogue experiment of gas generating by crude oil cracking: characters of products and its significance[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(3): 12–15
 - 11 陈世加, 马力宇, 付晓文, 等. 塔里木盆地海相腐泥型天然气的成因判识[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(2): 100–101, 118
Chen Shijia, Ma Liyu, Fu Xiaowen, et al. Genetic discrimination of marine sapropelic type gas in Tarim basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2001, 22(2): 100–101, 118
 - 12 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西坳陷上三叠统须家河组天然气分布及成藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(5): 501–505
Yang Keming, Ye Jun, Lu Zhengxiang. Characteristics of gas distribution in Upper Triassic Xujiahe Formation in Western Sichuan depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(5): 501–505
 - 13 Horsfield B, McLinn R K. Geothermometry and geochemistry of aqueous and oil-bearing fluid inclusions from Fatch Field, Dubai[J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 6: 733–740
 - 14 Hulen J R, Bereskin S R, Lemieux M. Timing and temperature of petroleum entrapment in the Grand Canyon oilfield, Nevada[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(8): 1328–1329
 - 15 Karlson D A, Nedkvitne T, Larter S R, et al. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(15): 3641–3659
 - 16 柳少波, 顾家裕. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论[J]. *石油与天然气地质*, 1997, 18(4): 326–331
Liu Shaobo, Gu Jiayu. Application of fluid inclusions to petroleum geological study and discussion[J]. *Oil & Gas Geology*, 1997, 18(4): 326–331
 - 17 郑有业, 王思源, 李小菊, 等. 有机包裹体研究在石油地质领域中的应用现状[J]. *地质地球化学*, 1998, 26(2): 72–76
Zheng Youye, Wang Siyuan, Li Xiaojie, et al. Application of organic inclusion research in petroleum geology[J]. *Geology-Geochemistry*, 1998, 26(2): 72–76
 - 18 赵靖舟. 油气包裹体在成藏年代学研究中应用实例分析[J]. *地质地球化学*, 2002, 30(2): 83–89
Zhao Jingzhou. Hydrocarbon inclusions analysis: application in geochronological study of hydrocarbon accumulation[J]. *Geology-Geochemistry*, 2002, 30(2): 83–89
 - 19 高先志, 陈发景. 应用流体包裹体研究油气成藏期次——以柴达木盆地南八仙油田第三系储层为例[J]. *地质学报*, 2000, 74(4): 548–554
Gao Xianzhi, Chen Fajing. Application of fluid inclusions to determination of the times and stages of hydrocarbon reservoir filling: a case study of Nanbaixian oilfield in the Qaidam basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 74(4): 548–554
 - 20 赵靖舟, 戴金星. 库车前陆逆冲带天然气成藏期与成藏史[J]. *石油学报*, 2002, 23(2): 6–11
Zhao Jingzhou, Dai Jinxing. Timing and filling history of natural gas reservoirs in Kuqa foreland thrust belts, Tarim basin[J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2002, 23(2): 6–11
 - 21 李荣西, 金奎励, 周雯雯, 等. 渤海坳陷油气包裹体与油气成藏[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 605–610
Li Rongxi, Jin Kuili, Zhou Wenwen, et al. Oil-gas inclusions and reservoir formation in Bozhong depression of the Bohaiwan basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4): 605–610
 - 22 王庭斌. 中国气藏主要形成、定型于新近纪以来的构造运动[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 126–132
Wang Tingbin. Gas pools in China have mainly been formed and finalized during tectonic movements since Neogene[J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 126–132
 - 23 柳广第, 李剑, 李景明, 等. 天然气成藏过程有效性的主控因素与评价方法[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(1): 1–6
Liu Guangdi, Li Jian, Li Jingming, et al. The controls and the assessment method for the effectiveness of natural gas migration and accumulation process[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(1): 1–6

(编辑 高岩)