

文章编号:1673-5005(2010)02-0013-06

储层石英生长影响因素的实验证据

李茹^{1,2}, 葛云锦¹, 陈勇¹, 周瑶琪¹, 周红建¹

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 胜利油田 东胜精工石油开发集团股份有限公司, 山东 东营 257000)

摘要:设计不同盐度、不同油水比及不同油品的人工合成石英烃类包裹体的实验,考察不同成岩条件下油气充注对石英生长的影响,对合成烃类包裹体的岩相学特征、均一温度、荧光测试结果进行分析,讨论油水比、油品性质、盐度等因素对石英生长的影响。结果表明:含油气条件下石英晶体能够继续生长从而捕获烃类包裹体,但是也受到了一定抑制,抑制作用随着含油饱和度增高而增强;油气可能会完全终止矿物的生长,但边界条件还有待于进一步确定;较高的盐度促进了石英包裹体的形成,轻质油对石英晶体生长的抑制作用要相对大于重质油的抑制作用。

关键词:烃类包裹体;人工合成;石英

中图分类号:P 586; TE 122.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2010.02.003

Experimental evidence of influential factor of quartz growth in reservoir

LI Ru^{1,2}, GE Yun-jin¹, CHEN Yong¹, ZHOU Yao-qi¹, ZHOU Hong-jian¹

(1. College of Geo-Resources and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. Dongsheng Petroleum Development Stock Company, LTD of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China)

Abstract:Experiments of different salinity, oil-water ratio and oil were carried out to synthesize oil (hydrocarbon)-bearing inclusions in quartz. Effects of hydrocarbon emplacement on quartz growth were studied on the basis of experimental results. Through analysis of petrographical character, homogenization temperature and fluorometric analysis results of synthetic hydrocarbon inclusions, the effects of oil-water ratio, salinity and oil quality on quartz growth were researched. As shown from the experiments, quartz could continue growing and trapping hydrocarbon inclusions under hydrocarbon emplacement. But it was restrained by hydrocarbon. The effect became more intense along with oil saturation increasing. Oil might terminate the growth of mineral but the boundary needs to be confirmed. Trapping inclusions in quartz was improved by relatively high salinity. The inhibiting effect of light oil on quartz growth was relatively more intense than that of heavy oil.

Key words: oil (hydrocarbon)-bearing inclusions; synthetic; quartz

目前,含油气条件下的成岩作用一直存在争议,有学者认为石油充满储层会抑制成岩作用以致石英停止生长,其依据是一些含油砂岩储层孔隙度的显著差异^[1-5]。但是,由于在石英胶结物中存在的石油包裹体具有相似的均一温度范围,胶结物和孔隙体积在水区和饱含油区具有很好的相关性,这又为油侵不会中断石英胶结作用的观点提供了主要经验证据^[6-9]。有学者对济阳坳陷东营凹陷的石英矿物研究发现,与水层相比,不同含油级别油层中的石英矿物相对含量没有明显的差别,油的充注并没有使石英的胶结作用终止^[10]。袁东山等^[11]通过对黄骅凹

陷石英矿物中油气包裹体的研究认为,石油充注到一定程度后胶结作用将会停止,后期进入储层的原油可能未被捕获。因此,油气充注对碎屑岩储层石英成岩作用的影响一直是一个有待深入研究的科学问题。由于储层中的烃类包裹体与储层成岩作用密切相关,它反映储层成岩作用是否进行、强弱程度及期次等,是研究储层成岩作用的有效手段。为了深入了解碎屑岩储层石英的成岩作用机制,笔者进行在石英中人工合成烃类包裹体的实验,希望实验结果能够为储层成岩作用研究提供依据。

收稿日期:2009-08-15

基金项目:国家“863”计划课题(2007AA06Z210);国家自然科学基金项目(40902040);山东省自然科学基金项目(Y2008E25);油气资源与探测国家重点实验室开放课题(2009006)

作者简介:李茹(1976-),女(汉族),山东东营人,博士研究生,研究方向为油气成藏机理与分布规律。

1 实 验

烃类包裹体(油气包裹体)是存在于储层并被捕获、封闭于成岩自生矿物晶格缺陷或者碎屑矿物成岩裂隙中的显微流体,它不仅记录了沉积成岩流体的成分、温度、压力等信息,同时也记录了盆地油气生成和演化信息,因而在储层成岩作用、油气运移、油气成藏、盆地分析、油藏地球化学等研究领域中有重要的理论意义和应用价值^[12]。流体包裹体的形成过程其实就是矿物与流体的相互作用过程,其中有物质和能量的交换,因而通过实验人工合成烃类流体包裹体可以研究烃类包裹体的捕获机制及含油流体条件下矿物晶体的生长情况,进而研究水-烃-岩的相互作用机制^[13-16]。

1.1 实验步骤

由于本研究的主要目的是探讨碎屑岩储层的成岩作用,所以本次实验采用石英作为主矿物。将晶体切割成尺寸合适的小四方短柱,放入去离子水中

进行超声波清洗,清除其表面的杂物,减少外界物质干扰。将石英晶体短柱加热至 350 ℃,迅速投入去离子水中淬火冷却使其产生微裂隙,然后取出放入干燥箱中干燥待用。选取一定长度的金管(外径约 5 mm,壁厚约 0.2 mm,长度约 5 cm),一端封闭后,加入汽油(或原油)、过量 SiO₂ 粉末及 NaCl 溶液,放入已经产生微裂隙的石英短柱。实验中加入的汽油为 97[#]汽油,颜色为淡黄色,成分相对简单,组成成分的相对分子质量较低,不易发生裂解。加入的原油为成分较为复杂的重质油,黑色,较黏稠。

合成包裹体实验在中国石油大学(华东)地球化学与岩石圈动力学开放实验室的高温高压实验室完成,使用设备为内淬火高温高压釜。前两批实验为了探讨不同油气丰度及油品对石英成岩作用的影响,加入试样油水比及油品不同。第三批实验为探讨地层水盐度对储层成岩作用的影响,加入的 NaCl 溶液盐度不同。实验方案见表 1。

表 1 实验方案

Table 1 Experimental project

实验编号	油水比 F_{ow}	油品	盐度 $w/\%$	温度 $T/^\circ\text{C}$	压力 p/MPa	时间 t/d
S1	3:7, 2:8, 1:9, 1:14	97 [#] 汽油	4	300	50	15
S2	3:7, 2:8, 1:9, 1:14	原油	4	300	50	15
S3	2:8	原油	4, 8, 12, 16	300	50	15

1.2 合成包裹体岩相学特征

实验结束后将石英晶体取出后磨片观察,第一批实验的 2,3 号样品、第二批实验的 1,2,3 号样品以及第三批实验的 4 个样品中有包裹体形成。通过观察得到人工合成包裹体的岩相学信息如下:

(1)包裹体的形状。形状取决于主矿物的特点、解理的性质和不同结晶方向。矿物中的包裹体形状有规则和不规则的区别,规则的包裹体形状与主矿物晶形相同或接近,不规则的包裹体形状与主矿物晶形完全不同。各个薄片中的包裹体形状也不尽相同。本次实验观察到的包裹体形状多为近圆形和长条状,也有小部分形状不规则的包裹体出现。

(2)包裹体的大小。包裹体的大小取决于晶体缺陷或微裂隙的大小,同时也取决于微裂隙的愈合程度,若裂隙愈合较好,则包裹体尺寸较小,反之则可能形成较大的包裹体。通过观察,薄片中的包裹体长度大都在 10~20 μm,也有部分长条形包裹体的长度可达到 60 μm。

(3)包裹体的气液比。实验合成的气液两相包裹体气液比总体在 30% 左右,此外还有部分纯液相烃类包裹体存在。

(4)包裹体的分布特征。包裹体受晶体微裂缝

控制,呈线状分布(图 1(a))。本次实验所观察到的包裹体很好地体现了这个特点,显示了其是在裂缝愈合时形成的。由于水与油不混溶,造成包裹体形成时,富集烃的和富集水的包裹体分别集中的现象(图 1(b),(c))。

(5)不混溶包裹体。根据包裹体捕获机制,包裹体可以捕获不混溶流体。本次实验中见到捕获了不混溶的油和水的包裹体(图 1(d))。此类包裹体体积较大,说明较大的裂隙容易充入不混溶流体而形成不混溶包裹体。

1.3 合成包裹体荧光

石油包裹体和含烃包裹体的特征是在紫外光或蓝光等激发下发出不同颜色的荧光,所以荧光成为分辨烃类包裹体和水溶液包裹体的有效方法。荧光的颜色和强度与包裹体中有机组成的分子结构类型有关,纯饱和烃不发荧光,含 C=C 共轭双键的分子易发荧光。一般认为,随着油气演化程度的提高,油气包裹体中液态烃的荧光颜色由亮黄、浅黄→棕色、褐黄、褐色→暗蓝、蓝灰→蓝→乳白色^[17]。

为了验证合成包裹体的性质,对添加了原油的样品中的包裹体进行了荧光分析(图 2),荧光颜色为黄棕色,说明包裹体捕获的油成熟度较低,与实验

加入的原油荧光性质一致,通过荧光分析可以说明

在实验设定条件下石英生长捕获了烃类包裹体。

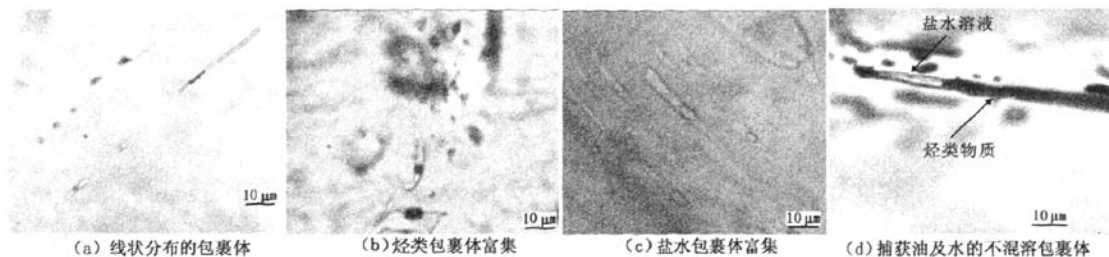


图1 人工合成包裹体镜下特征

Fig.1 Character of synthetic inclusions under microscope

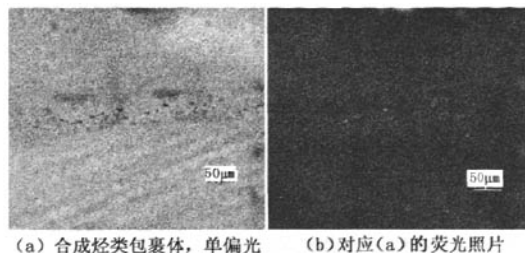


图2 人工合成烃类包裹体及荧光照片

Fig.2 Synthetic hydrocarbon inclusions and their fluorescent photo

1.4 合成包裹体均一温度

实验所获得的烃类包裹体为油水不混溶和单相油包裹体两类,基本没有气液两相的烃类包裹体,不能获得均一温度。所以,仅对合成样品中盐水包裹体的均一温度进行了测试,得出的数据较为集中。3批实验的盐水包裹体均一温度集中在240~250℃(图3),有少数包裹体均一温度超过370℃,为不混

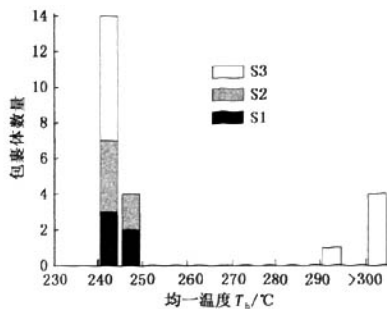


图3 盐水包裹体均一温度直方图

Fig.3 Histogram of homogenization temperature of synthetic aqueous inclusions

溶捕获的包裹体。因为包裹体捕获时实验压力为50 MPa,而均一温度为常压下测得,所以要对均一温度进行压力校正,以获得包裹体的形成温度。本文中采用了Potter II^[18]的压力校正曲线对盐水包裹

体的均一温度进行压力校正,校正后得到的捕获温度在285~290℃,与实验设定的300℃吻合较好,这说明与烃类包裹体同期生成的盐水包裹体的捕获温度能够代表烃类包裹体捕获的实际地质温度。

2 石英成岩作用影响因素

2.1 油水比的影响

油水比的变化与含油气条件下储层成岩作用关系极为密切,它影响着储层自生矿物的生长,进而影响储层的质量。通过实验的荧光、均一温度分析可以得出试样中均有油气包裹体及盐水包裹体生成,烃类包裹体数量与油水比关系如图4所示。可见,较高的油水比对应着较多的烃类包裹体。

图4表明:①含油气条件下石英仍在生长,没有停止,裂缝在生长过程中愈合,捕获包裹体;②油和水溶液一起参与了石英晶体生长的成岩过程,表现在油含量较高时,形成的烃类包裹体较多。但是,

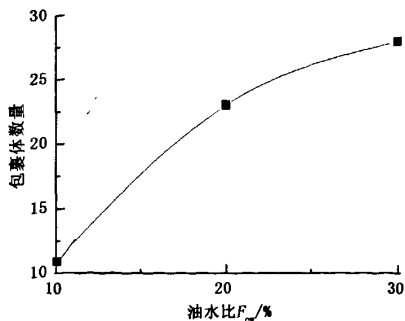


图4 烃类包裹体数量与油水比的关系

Fig.4 Relationship between oil-water ratio and quantity of hydrocarbon inclusions

本次实验最高的油水比只有30%,所以只能说明在较低油水比条件下,油气不会完全停止油气包裹体的形成,只是对包裹体的生长具有一定的抑制作用,晶体中存在被油气侵染而没有愈合的裂隙可以证明

这一点。Teinturier 等^[19]的实验证实,在油水比高达90%的情况下石英晶体也能捕获烃类包裹体,这似乎证明油气的充注不会影响石英的生长和包裹体的捕获,但值得注意的是 Teinturier 的实验温度、压力条件都比较高,与实际地质环境有一定差距。因此,确定油水比对碎屑岩储层中烃类包裹体的生长到底有多大影响,寻找不同成岩条件下烃类包裹体形成的边界条件是确定要解决的关键问题之一。

目前应用较广的含烃流体包裹体丰度法恢复油藏古油水界面的基本原理为:油在砂岩疏导体内的主要运移动力为浮力,而孔隙的毛细管阻力则构成了运移的阻力。当少量原油在非均质输导层或储层中运移时,如果没有阻挡层,地层毛细管压力将使原油沿最大的孔隙喉道网运移,在这种情况下地层只有少量孔隙与原油接触,结果只有少量矿物能截获原油并形成含烃包裹体;当圈闭中的原油持续注入时,储层的油柱升高,压力增大,原油能克服毛细管压力进入更小的孔隙喉道,使储层相应的含油饱和度增高到40%~90%,在储层处于高含油饱和度且有稳定油柱的情况下,大部分孔隙与原油接触,这样可使大量成岩矿物或颗粒裂纹中发育含烃包裹体^[20-21]。图5的模型显示出了高含油饱和度对充注有石油的孔隙数量和石油包裹体丰度的影响^[22]。这种方法

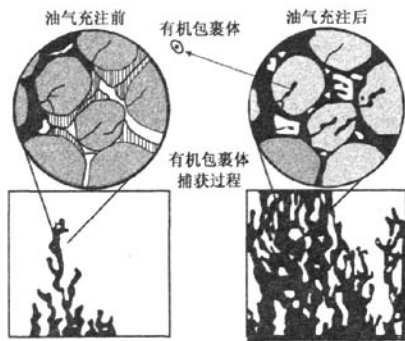


图5 砂岩中石油包裹体被捕获的概念模型
Fig. 5 Conceptual model of oil inclusions trapped in sandstone

的理论基础还需要合成烃类包裹体的实验提供依据。因为储层中烃类包裹体的形成可能有一个油气饱和度上限,如果超过了这个上限,由于油气流体的分隔,地层水与矿物无法接触,水岩作用受到抑制或终止,矿物的生长则有可能完全被抑制,也就不存在捕获大量油气包裹体的可能。此外,根据幕式成藏理论,油气成藏可能是一个快速的过程,储层中油气饱和度骤然升高,快速成藏导致储层油气饱和度迅

速超过了烃类包裹体形成的油水比上限,这样的成藏过程将不被记录,烃类包裹体记录的可能只是排烃早期或排烃末期油水比比较低时的信息。这些问题的关键都在于储层中烃类包裹体形成的边界条件,需要进一步利用合成烃类包裹体实验来提供基础数据和理论依据。

2.2 油品性质的影响

不同性质原油对矿物生长的影响不同,这在实验中有体现。实验结果显示,加入汽油的样品中合成的烃类及盐水包裹体数量都较少,加入原油的样品中的包裹体数量则相对较多。由此可以推断,轻质油对石英的生长加大抑制作用较强。其原因可能是轻质油含极性组分较少,与水的互溶性较差,当其占据了大部分孔隙空间时,对水的排替能力较强,从而抑制了石英的生长。原油的密度大,黏度高,当其充注孔隙空间时,可能会将部分地层水也封堵在孔隙里(图1(d)),这部分地层水有利于包裹体的发育,所以原油对石英的生长及包裹体的形成抑制较弱。

2.3 盐度的影响

盐度对晶体的生长影响很大。一般各种矿物都是在一定温度、压力及浓度的成岩成矿溶液中生长的。如果溶液的过饱和度增大,晶体生长速度就会加快,从而产生带凹入角的枝蔓状形式,导致整个晶体的体积增大,但盐度过大反而会使晶体生长速度减缓,因此只有在一定的盐度范围内,晶体的生长速度才是最完全有效而合理的^[23]。随着加入的NaCl溶液的质量分数由4%升高到16%,实验中观察到包裹体的数量增多,说明随盐度增高,溶液中的金属阳离子(Na^+)会促使石英晶体溶解从而产生更多的缺陷,这对包裹体捕获有利。试样中加入了过量的 SiO_2 粉末,营造了过饱和溶液环境,所以石英容易结晶形成大量的包裹体。但是,溶液离子浓度增高到一定值后,再进一步增加浓度,石英溶解速度增加的幅度则变得很小^[24],说明盐度的升高对包裹体形成的促进作用是有一定范围的。上限范围需要结合实际的地质资料来确定,如溶液温度、酸碱度等。

3 结论

(1)在油气存在情况下,只要有充足的 SiO_2 物源,石英晶体就可以继续生长并捕获包裹体。但是,目前实验油水比较低,边界条件还有待于进一步确定。

(2)不同成熟度的油品对石英成岩作用有不同的影响,相对于重质油来说,轻质油对石英晶体生长的抑制作用较强。

(3) 盐度对含油气条件下石英晶体的生长影响显著,在一定范围内较高的盐度促进石英晶体表面缺陷的形成,在 SiO_2 物源充足的条件下有利于包裹体的形成。

参考文献:

- [1] DIXON S A, SUMMERS D M, SURDAM R C. Diagenesis and preservation of porosity in Nophlet Formation (Upper Jurassic), southern Alabama [J]. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1989, 73(6): 707-728.
- [2] GLUYAS J G, ROBINSON A G, EMERY D, et al. The link between petroleum emplacement and sandstone cementation [C]//PARKER J R. *Petroleum geology of northwest Europe: proceedings of the fourth conference*. London: Petroleum Geology Conference Series, 1993, 4: 1395-1402.
- [3] NEILSON J E, OXTOBY N H, SIMMONS M D, et al. The relationship between petroleum emplacement and carbonate reservoir quality: examples from Abu Dhabi and the Amu Darya Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15(1): 57-72.
- [4] MARCHAND A M E, HASZELDINE R S, SMALLEY P C, et al. Evidence for reduced quartz-cementation rates in oil-filled sandstones [J]. *Geology*, 2001, 29(10): 915-918.
- [5] MARCHAND A M E, SMALLEY P C, HASZELDINE R S, et al. Note on the importance of hydrocarbon fill for reservoir quality prediction in sandstones [J]. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 2002, 86(9): 1561-1571.
- [6] WALDERHAUG O. A fluid inclusion study of quartz-cemented sandstones from offshore mid-Norway-possible evidence for continued quartz cementation during oil emplacement [J]. *Sed Petrol*, 1990, 60(2): 203-210.
- [7] RAMM M. Porosity-depth trends in reservoir sandstones: theoretical models related to Jurassic sandstones, offshore Norway [J]. *Mar Petrol Geol*, 1992, 9(5): 324-327.
- [8] SAIGAL G, BJORLYKKE K, LARTER S. The effects of oil emplacement on diagenetic processes-examples from the fulmar reservoir sandstones, Central North Sea [J]. *Am Assoc Petrol Geol Bull*, 1992, 76(7): 1024-1033.
- [9] MIDTBØ R E A, RYKKJE J M, RAMM M. Deep burial diagenesis and reservoir quality along the eastern flank of the Viking Graben, evidence for illitization and quartz cementation after hydrocarbon emplacement [J]. *Clay Miner*, 2000, 35(1): 227-237.
- [10] 李艳霞,刘洪军,袁东山,等. 石油充注对储层成岩矿物演化的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(3): 274-280.
LI Yan-xia, LIU Hong-jun, YUAN Dong-shan, et al. Effect of oil charging on reservoir's diagenetic mineral evolution [J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 274-280.
- [11] 袁东山,张枝焕,朱雷,等. 油气聚集对石英矿物成岩演化的影响 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2315-2320.
YUAN Dong-shan, ZHANG Zhi-huan, ZHU Lei, et al. Effects of oil charge on quartz cement [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9): 2315-2320.
- [12] 刘德汉. 包裹体研究——盆地流体追踪的有力工具 [J]. *地学前缘*, 1995, 2(3/4): 149-154.
LIU De-han. Fluid inclusion studies—an effective means for basin fluid investigation [J]. *Earth Science Frontier*, 1995, 2(3/4): 149-154.
- [13] 刘超英,周瑶琪,杜玉民,等. 碳酸盐岩流体包裹体 ($\text{NaCl-H}_2\text{O}$) 的合成及捕获机理分析 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(2): 25-29.
LIU Chao-ying, ZHOU Yao-qi, DU Yu-min, et al. Synthetics and trapping mechanism of carbonate fluid inclusion ($\text{NaCl-H}_2\text{O}$) [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(2): 25-29.
- [14] 倪培,王—刚. 人工合成烃类包裹体的实验研究 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2033-2038.
NI Pei, WANG Yi-gang. Experimental study on synthetic oil (hydrocarbon)-bearing inclusions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(9): 2033-2038.
- [15] 倪培,孟凡巍. 碳酸盐岩中烃类包裹体的人工合成实验研究 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(1): 161-165.
NI Pei, MENG Fan-wei. Experimental study on synthetic oil (hydrocarbon)-bearing inclusions in carbonatite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(1): 161-165.
- [16] 葛云锦,陈勇,周瑶琪. 不同成岩条件下油气充注对碳酸盐岩成岩作用的影响 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(1): 18-22.
GE Yun-jin, CHEN Yong, ZHOU Yao-qi. Effects of hydrocarbon emplacement to diagenesis of carbonatite in different conditions: evidences from synthetic oil (hydrocarbon)-bearing inclusions [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33(1): 18-22.
- [17] 潘立银,倪培,欧光习,等. 油气包裹体在油气地质研究中的应用: 概念、分类、形成机制及研究意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25(1): 19-28.
PAN Li-yin, NI Pei, OU Guang-xi, et al. Application of organic inclusion study in petroleum geology: conception, classification, formation mechanism and significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(1): 19-28.
- [18] POTTER R W II. Pressure correction for fluid inclusion homogenization temperature based on the volumetric properties of the system $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ [J]. *J Res V S Geol Surv*, 1977, 5(5): 603-607.

- [19] TEINTURIER S, PIRONON J. Experimental growth of quartz in petroleum environment (Part I): procedures and fluid trapping [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68(11): 2495-2507.
- [20] 白国平. 包裹体技术在油气勘探中的应用研究现状及发展趋势[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 136-140.
BAI Guo-ping. State of research on fluid inclusion technology applied to oil and gas exploration [J]. *Journal of University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2003, 27(4): 136-140.
- [21] 宋明水. 含烃流体包裹体丰度法追溯古油水界面的局限性[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 5-8.
SONG Ming-shui. Limitation of restoring the paleohydrocarbon-water contact by GOI [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(3): 5-8.
- [22] 姜福杰, 姜振学, 庞雄奇, 等. 含油包裹体丰度指数确定油气运聚范围及应用[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(5): 15-18.
JIANG Fu-jie, JIANG Zheng-xue, PANG Xiong-qi, et al. Method of determination oil and gas migration by grains with oil inclusion and its application [J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 2006, 28(5): 15-18.
- [23] 刘超英, 周瑶琪, 陈勇, 等. 人工合成碳酸盐岩流体包裹体实验与定量分析[J]. 岩矿测试, 2004, 23(3): 161-167.
LIU Chao-ying, ZHOU Yao-qi, CHEN Yong, et al. Experimental techniques and quantitative analysis of synthetic carbonate fluid inclusions [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2004, 23(3): 161-167.
- [24] 邱隆伟, 姜在兴. 陆源碎屑岩的碱性成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- (编辑 徐会永)

(上接第12页)

- [9] 祁兴芬, 庄振业, 韩德亮, 等. 秦皇岛市海岸风成沙丘的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(4): 617-624.
QI Xing-fen, ZHUANG Zhen-ye, HAN De-liang, et al. Research on the aeolian dunes in the Qinhuangdao area [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(4): 617-624.
- [10] 江新胜, 徐金沙, 潘忠习. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英砂颗粒表面特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 416-422.
JIANG Xin-sheng, XU Jin-sha, PAN Zhong-xi. Microscopic features on quartz sand grain surface in the Cretaceous desert of Ordos Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2003, 21(3): 416-422.
- [11] GLENNIE K W. Desert sedimentary environments, present and past—a summary [J]. *Sedimentary Geology*, 1987, 50(2): 135-165.
- [12] 李志德, 程守田, 蒋磊, 等. 风成沙丘间沉积成因类型与风成垂向层序——以鄂尔多斯早白垩世内陆古沙漠为例[J]. 地质科技情报, 2004, 23(3): 30-34.
LI Zhi-de, CHENG Shou-tian, JIANG Lei, et al. Inter-dune sedimentary genetic types and aeolian vertical sequence: an example from early cretaceous continental paleodesert of ordos [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(3): 30-34.
- [13] 李海燕. 低渗透储层成岩储集相及储集空间演化模式[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 1-6.
LI Hai-yan. Diagenetic reservoir facies and pore space evolution pattern of low permeability reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2007, 31(5): 1-6.
- [14] 司学强. 博兴洼陷沙四上亚段滩坝砂岩成岩作用及其与储层质量的关系[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 6-10.
SI Xue-qiang. Relation between beach bar sandstones diagenesis and reservoir quality in the upper Es₄ of the Palaeogene in Boxing sag [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2008, 32(2): 6-10.
- [15] 江新胜, 朱同兴, 冯心涛, 等. 藏南特提斯晚三叠世海岸风成沙丘的发现及其意义[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(5): 447-452.
JIANG Xin-sheng, ZHU Tong-xing, FENG Xin-tao, et al. Discovery of the late triassic coastal aeolian dune in South Tibet Tethys and its significance [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2003, 30(5): 447-452.
- [16] 里丁. 沉积环境和相[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 105-126.
- [17] 陈清华, 庞飞, 渠冬芳. 苏北盆地白垩系赤山组沉积与储层特征及研究意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(6): 95-99.
CHEN Qing-hua, PANG Fei, QU Dong-fang. Depositional and reservoir characteristics of the cretaceous Chishan formation in Subei Basin and their significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(6): 95-99.
- (编辑 徐会永)