

临南洼陷江家店地区沙三下亚段储集层成岩流体演化

操应长, 王新桐, 王艳忠, 杨田, 程鑫, 王思佳

(中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要:通过对临南洼陷江家店地区10余口井的70余块样品的铸体薄片分析、流体包裹体特征总结及显微测温,揭示了沙河街组沙三下亚段储集层在埋藏过程中,经历了多期次的酸碱流体演化及油气充注:距今 43.7×10^6 — 37.0×10^6 a,地层流体呈弱碱性,成岩作用以压实作用为主,并发育少量早期黄铁矿胶结物;距今 37.0×10^6 — 28.2×10^6 a,有机质热演化导致地层流体呈酸性,发生长石的溶蚀及石英的I期次生加大现象;距今 28.2×10^6 — 24.6×10^6 a,有机酸开始脱羧,沙四下亚段的石膏层开始脱水,地层水变为碱性,发生石英溶解及碳酸盐矿物的胶结现象;距今 24.6×10^6 — 14.0×10^6 a,有机质热演化使地层水持续呈酸性,发生长石、碳酸盐胶结物的溶蚀及石英的II期次生加大现象;距今 14.0×10^6 — 2.8×10^6 a,烃源岩再次演化生烃,地层水持续呈酸性; 2.8×10^6 a至现今,地层水呈弱碱性,发育少量的晚期黄铁矿胶结物。

关键词: 济阳坳陷;惠民凹陷;临南洼陷;沙河街组;成岩流体;油气充注;流体包裹体

中图分类号: TE112.221

文献标识码: A

Evolution of Diagenetic Fluids in Reservoirs of Es₃ in Jiangjiadian Area of Linnan Sag

CAO Yingchang, WANG Xintong, WANG Yanzhong, YANG Tian, CHENG Xin, WANG Sijia

(School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Based on the thin section analysis, fluid inclusion summarizing and microthermometry for more than 70 pieces of samples obtained from more than 10 wells in the Jiangjiadian area of Linnan sag, the paper reveals that the Es₃ reservoir of Shahejie formation underwent multi periods of acid-base fluid evolution and hydrocarbon charging during its burial process: 43.7×10^6 a — 37.0×10^6 a ago, the formation fluid was weakly alkaline, the diagenesis was dominated by compaction and a few early pyrites occurred; 37.0×10^6 a — 28.2×10^6 a ago, the thermal evolution of organic matter led to the acidity of formation fluid, and feldspar dissolution and the first phase of quartz overgrowth took place; 28.2×10^6 a — 24.6×10^6 a ago, decarboxylation of organic acid as well as dehydration of gypsum bed in the lower Sha-4 member occurred, thus the formation water became alkaline, and carbonate cementation and quartz dissolution were noted; 24.6×10^6 a — 14.0×10^6 a ago, thermal evolution of organic matter made the formation water acidic and the second phase of acid dissolution and quartz overgrowth began; 14.0×10^6 a — 2.8×10^6 a ago, re-evolution and hydrocarbon generation happened to the source rocks, which made the formation water continuously acidic; since 2.8×10^6 a ago till now, the formation water was acidic and a few late pyrite cements were found.

Keywords: Jiyang depression; Huimin sag; Linnan sag; Shahejie formation; diagenetic fluid; hydrocarbon charging; fluid inclusion

包裹体是至今仍包裹在矿物晶格缺陷或者穴窝中,与主矿物之间存在明显“相”界线的物质^[1]。由于其内部流体的稳定性,包裹体在大多数情况下不会因为外界地质环境的改变而发生改变^[2],因此,通过对其物理及化学特性的研究,可以推断其形成时的地质环境,从而成为了解盆地古流体及其活动的重要依据^[3]。

临南洼陷江家店鼻状构造带是油气运聚的主要地区,以构造油气藏及岩性油气藏为主^[4]。近年来,一些学者对江家店地区渐新统沙河街组沙三下亚段的储集层进行了研究,认为其成岩作用主要包括压实作用、胶结作用、交代作用及溶解作用,储集层孔隙以次生溶孔为主,尤以长石溶孔含量最高,但是由于储集

层在演化过程中历经多期溶蚀、胶结以及复杂的交代作用,导致物性发生了复杂的变化^[5-9]。本文通过分析成岩作用类型及成岩流体性质,结合砂体沉积埋藏演化史以及有机质热演化史,明确江家店地区沙三下亚段储集层的成岩流体演化规律,旨在对研究区今后的油气勘探开发有所裨益。

1 区域地质概况

临南洼陷是济阳坳陷惠民凹陷西端的一个次级构造单元(图1),南界的夏口断层系和北界的临邑断层系呈雁形排列^[10]。临南洼陷古近系自下而上发育有古新统孔店组、渐新统沙河街组和东营组,沙河街

收稿日期: 2016-09-21

修订日期: 2016-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(41402095); 国家科技重大专项(2016ZX05006-007); 中央高校基本科研业务费专项资金(16CX02027A)

作者简介: 操应长(1969-),男,安徽潜山人,教授,博士生导师,沉积学、层序地层学及储层地质学, (Tel) 13505325516 (E-mail)

caoych@upc.edu.cn

椭圆形、长条形及近圆形,边界清楚,直径主要为1.5~3.0 μm,部分可达4.5 μm。绝大多数的包裹体呈群体、带状、片状或者孤立状,沿着石英加大边或微裂缝分布,部分分布在碳酸盐胶结物中(图4)。

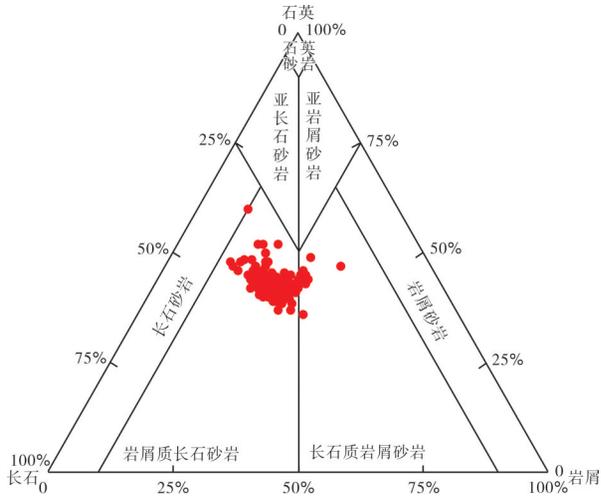


图3 江家店地区沙三下亚段三角洲相储集层岩石成分三角图

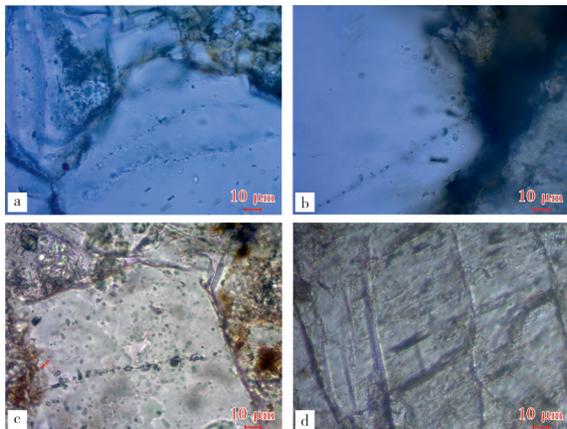


图4 江家店地区沙三下亚段储集层包裹体显微特征

a—沿石英加大边群体分布的包裹体,夏52井,3 166.55 m,单偏光;
b—沿石英加大边带状分布的包裹体,夏943井,3 785.40 m,单偏光;
c—沿石英微裂缝带状分布的包裹体,夏33井,3 285.80 m,单偏光;
d—孤立分布于碳酸盐胶结物中的包裹体,夏33井,3 287.90 m,单偏光

(2)有机包裹体荧光特征 当烃类流体在储集层中发生运移或者聚集时,储集层矿物在晶体生长过程中就会捕获周围的烃类流体,形成有机包裹体^[13]。不同的荧光颜色代表了有机包裹体不同的成分,反映了有机质的热演化程度^[14-15],荧光颜色由火红色→橙色→黄色→绿色→蓝白色的变化,代表着有机质的成熟度依次变高^[14-17]。沙三下亚段储集层中的有机包裹体主要发(黄)绿色(图5a,图5b)及蓝白色(图5c,图5d)2种荧光颜色,据此初步推断研究区主要存在2期油气成藏。

(3)包裹体均一温度特征 包裹体测温的前提是包裹体所捕获的流体是均匀流体,捕获后成为封闭体系,并具有等容特性^[18]。通过对包裹体特征的研究,

利用反演即可推断出储集层流体在成岩历史时期的油气运移和成藏过程^[13]。本次研究的包裹体大都形状规则,在常温下呈单相或者气-液两相,通过对研究区沙三下亚段储集层包裹体均一温度的测定,发现存在着2期包裹体:第1期包裹体均一温度为110~125℃,峰值为115~120℃,代表着第1期的流体演化;第2期包裹体均一温度为130~140℃,峰值为130~135℃,代表着第2期的流体演化(图6)。

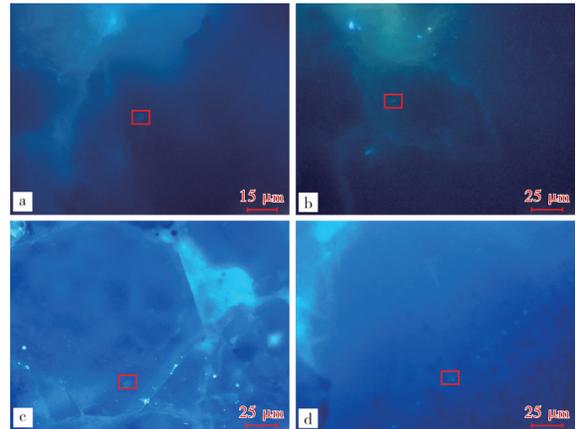


图5 江家店地区沙三下亚段三角洲相储集层有机包裹体荧光特征

a—沿石英加大边分布,呈黄绿色荧光的有机包裹体,夏33井,3 292.15 m,荧光;
b—孤立分布于碳酸盐胶结物中,呈绿色荧光的有机包裹体,夏斜502井,3 325.93 m,荧光;
c—沿石英加大边分布,呈蓝白色荧光的有机包裹体,夏斜502井,3 325.93 m,荧光;
d—沿石英微裂隙分布,呈蓝白色荧光的有机包裹体,夏52井,3 169.50 m,荧光

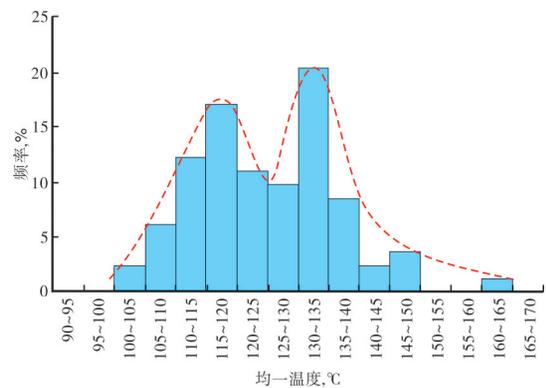


图6 江家店地区沙三下亚段三角洲相储集层包裹体均一温度分布

(4)包裹体盐度特征 一般认为,包裹体中的流体以NaCl-H₂O体系为主。随着溶液中盐度含量的增加,溶液冰点温度会随之降低,因此,常利用冰点温度计算包裹体的盐度来反映成岩流体水化学的演化过程^[19-20]。通常依据气泡突变法来测量冰点温度^[21],然后根据Potter的盐度计算公式^[22]计算出流体的盐度:

$$W = 1.769 5\theta - 0.042 384\theta^2 + 0.000 527 78\theta^3 \pm 0.028,$$

式中 W——盐度,%;

θ ——冷冻温度,℃($\theta=0-t$, t 为冰点温度,℃).

利用包裹体的盐度及均一温度绘制散点图(图7),可以确定研究区沙三下亚段储集层存在着不同盐度条件下捕获的2期包裹体,第1期包裹体的盐度在10%左右,温度为110~120℃;第2期包裹体的盐度在20%左右,温度为133~145℃,由此可见晚期流体的盐度要明显高于早期流体的盐度。

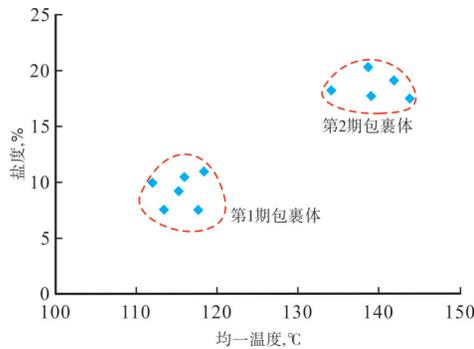


图7 江家店地区沙三下亚段三角洲相储集层包裹体均一温度和盐度分布

(5) 油气充注时间 当地层中存在有机包裹体时,说明在地质历史时期肯定出现过烃类的生成、运移或者聚集。在排除样品深度干扰的前提下,将与有机包裹体相伴生的各期盐水包裹体的均一温度作为其捕获时的最小古地温,结合镜质体反射率,可以间接地确定油气运聚的期次以及成藏的时间^[23-26]。由于有机包裹体的形成温度相对较低,因此对均一温度的测量结果预处理时可以不进行压力的校正^[23]。

夏942井(3 789 m)的岩心样品中,与有机包裹体同期的盐水包裹体的平均均一温度为121.50℃和131.48℃,将温度分别投影在该井的埋藏史图上,可以确定发生过2期油气充注:第1期油气充注发生在东营组沉积中期,镜质体反射率约为0.7%,烃源岩的成熟度较低并且生、排烃量十分有限;第2期油气充注发生在明化镇组沉积期,镜质体反射率已大于1.0%,烃源岩的成熟度高,已进入了大规模的生、排烃期。

综合包裹体的荧光特征及均一温度的测量结果,将与有机包裹体同期的盐水包裹体的均一温度投影到相应的埋藏史图中,发现江家店地区洼陷中心地区沙三下亚段确实发生过2期油气充注过程(图8):时间分别为东营组沉积期(26.2×10⁶—24.6×10⁶ a)以及馆陶组沉积中期至明化镇组沉积期(7.5×10⁶—2.8×10⁶ a)。而洼陷边缘地区只经历过1期油气充注,时间大约发生在明化镇组沉积期(4.1×10⁶ a)。

由于东营组沉积期,研究区发生构造抬升,导致生烃过程被迫中断,油气生成数量十分有限,因而仅在洼陷中心地区形成少量的油气聚集。馆陶组沉积

中期至明化镇组沉积期,江家店地区进入整体拗陷时期,烃源岩随着埋深的增加,相继达到生烃门限,生成大量的油气,进而发生大规模的油气充注过程^[5]。

3.2 成岩流体演化综合序列确定

当地层中流体性质发生变化时,储集层中矿物颗粒会发生相应组分的溶解及自生矿物的沉淀,所以研究地层中流体性质的变化对于研究成岩作用的演化尤为重要。由于烃源岩在其热演化过程中会释放出大量的有机酸,膏岩层在演化过程中会释放出大量的Ca²⁺,而江家店地区沙三下亚段发育多套烃源岩^[4],下伏沙四下亚段发育有膏岩层^[27]。因此,烃源岩和膏岩层的演化会直接改变地层中流体的性质,进而影响成岩作用的演化。结合文献调研,以夏326井为例,通过对成岩作用的类型及演化顺序、油气充注期次等综合分析,揭示研究区目的层段储集层成岩流体的演化经历了5个主要阶段:①距今43.7×10⁶—37.0×10⁶ a,沙三下亚段底界温度小于75℃,烃源岩尚未成熟,地层流体呈弱碱性,储集层以压实作用为主,发育有少量黄铁矿胶结物(图2h);②距今37.0×10⁶—28.2×10⁶ a,沙三下亚段底界温度升至100℃,顶界温度达到80℃,此温度有利于干酪根释放含氧基团,形成大量有机酸,并被保存下来,致使沙三下亚段的地层水呈酸性,发生长石溶蚀及石英的I期次生加大现象;③距今28.2×10⁶—24.6×10⁶ a,沙三下亚段底界温度升至105℃,顶界温度达到90℃,此时地层处于有机酸分解区,有机酸发生脱羧反应产生烃类并释放出CO₂,与此同时,沙四下亚段的石膏层开始脱水,导致沙三下亚段地层水呈碱性,发生石英溶解及碳酸盐矿物胶结现象(图2a,图2c,图2d,图2e),其中在距今26.2×10⁶—24.6×10⁶ a(东营组沉积期)发生第1期油气充注;④距今24.6×10⁶—14.0×10⁶ a,沙三下亚段地层因构造抬升,底界温度降至97℃,顶界温度降至81℃,有机质热演化重新生成大量有机酸,由于碱源不足,烃源岩地层主要处于有机酸有利保存区,导致地层水呈酸性,发生长石、碳酸盐胶结物的溶蚀及石英的II期次生加大现象(图2b,图2f);⑤距今14.0×10⁶—2.8×10⁶ a,地层快速沉降,地层温度迅速升高,沙三下亚段底界温度达到120℃,烃源岩2次生烃产生油气,加之烃源岩地层持续处于有机酸有利保存区,导致地层水呈酸性。2.8×10⁶ a之后,地层处于有机酸分解区,加之沙四下亚段的石膏层脱水排出的碱性水进入储集层,导致现今地层水呈弱碱性,可生成少量晚期黄铁矿胶结物(图2i),其中在距今7.5×10⁶—2.8×10⁶ a(馆陶组沉积中期—明化镇组沉积期)发生油气的第2期大规模充注(图8)。

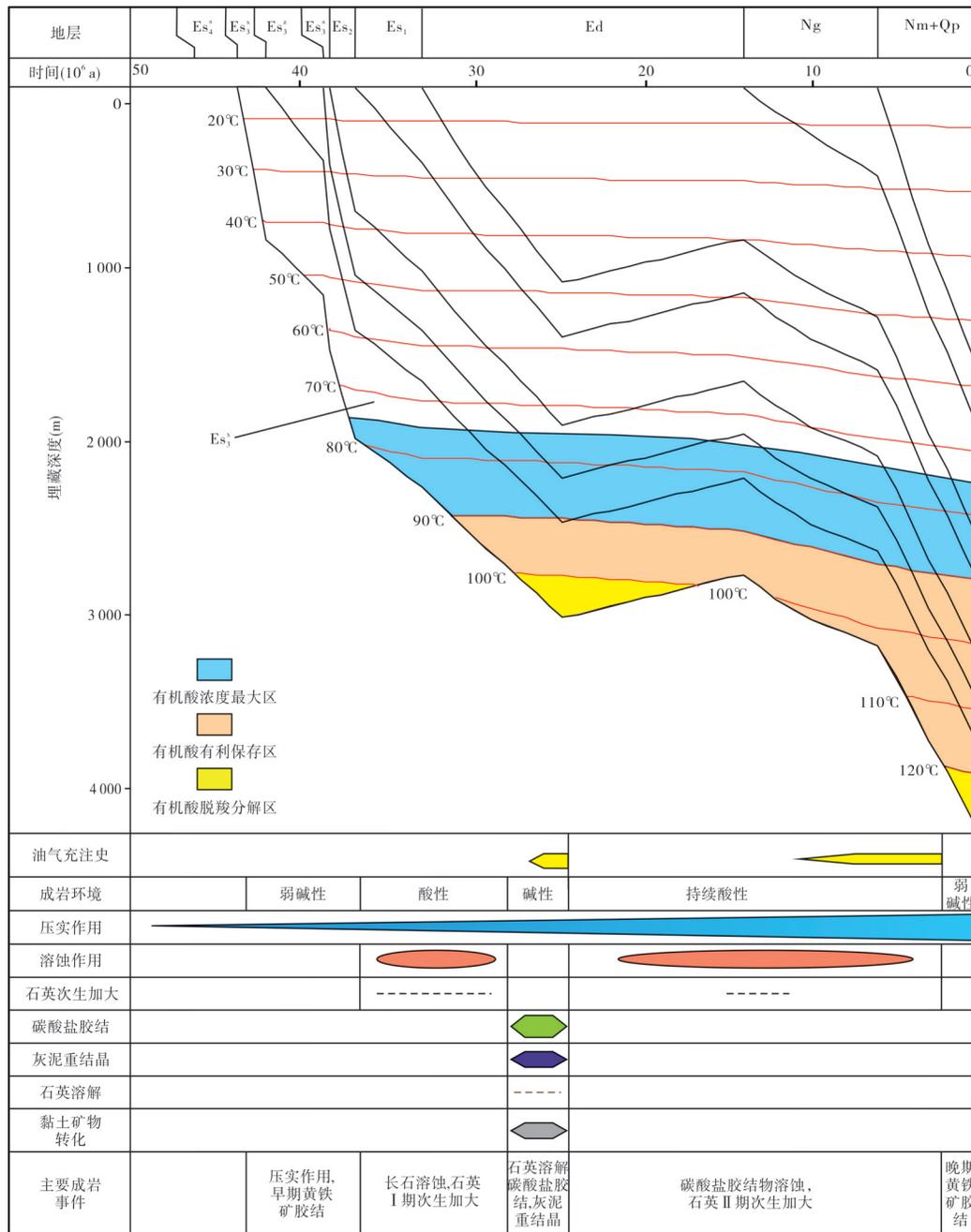


图8 江家店地区沙三下亚段三角洲相储集层成岩演化及油气充注史

4 结论

(1)依据成岩矿物的形态、交代切割及溶解充填关系,江家店地区沙三下亚段三角洲相储集层成岩流体演化序列为:早期黄铁矿胶结→长石溶蚀+ I 期石英次生加大→碳酸盐胶结物胶结+石英溶蚀→长石溶蚀/碳酸盐胶结物溶蚀+ II 期石英次生加大→晚期黄铁矿胶结。

(2)通过埋藏演化史、有机质的热演化、酸碱流体演化顺序等综合分析,并结合油气的充注期次,确定了成岩流体的演化顺序:距今 43.7×10⁶—37.0×10⁶ a, 地层流体呈弱碱性,压实作用为主,发育少量黄铁矿

胶结物;距今 37.0×10⁶—28.2×10⁶ a,地层流体呈酸性,发生长石溶蚀及石英的 I 期次生加大现象;距今 28.2×10⁶—24.6×10⁶ a,地层流体呈碱性,发生石英溶解及碳酸盐矿物的胶结现象;距今 24.6×10⁶—14.0×10⁶ a,地层流体持续呈酸性,发生长石、碳酸盐胶结物的溶蚀以及石英的 II 期次生加大现象;距今 14.0×10⁶—2.8×10⁶ a,地层流体呈酸性;2.8×10⁶ a 至现今,地层流体呈弱碱性,发育少量的晚期黄铁矿胶结物。

(3)根据包裹体的岩相学特征、有机包裹体的荧光特征,以及盐水包裹体的均一温度和流体盐度的特征,研究区沙三下亚段发生了 2 期油气充注:第 1 期主要发生在东营组沉积期,距今约 26.2×10⁶—24.6×10⁶ a,

此时烃源岩成熟度较低,油气充注规模较小;第2期主要发生在馆陶组沉积中期—明化镇组沉积期,距今约 7.5×10^6 — 2.8×10^6 a,此时烃源岩大规模成熟,为研究区的主力油气充注期。

参考文献:

- [1] 卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 流体包裹体[M]. 北京:科学出版社,2004:20-21.
LU Huanzhang, FAN Hongrui, NI Pei, *et al.* Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 20-21.
- [2] 熊翥. 地震数据梳子处理应用技术[M]. 北京:石油工业出版社,1993:193-194.
XIONG Zhu. Application technology of seismic data comb processing[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 193-194.
- [3] 刘德汉,肖贤明,田辉,等. 含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义[J]. 石油与天然气地质,2008,29(4):491-501.
LIU Dehan, XIAO Xianming, TIAN Hui, *et al.* Fluid inclusion types and their geological significance in petroliferous basin [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(4): 491-501.
- [4] 许小琼. 惠民凹陷临西地区沙三段储层评价[D]. 山东青岛:中国石油大学,2008:49-50.
XU Xiaoqiong. Evaluation of reservoirs in Es3 member in Linxi area, Huimin sag [D]. Qingdao, Shandong: China University of Petroleum, 2008: 49-50.
- [5] 朱志强,曾溅辉. 临南洼陷流体包裹体特征与成藏时间研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(4):31-34.
ZHU Zhiqiang, ZENG Jianhui. Feature of fluid inclusions and the period of petroleum accumulation in Linnan sag [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(4): 31-34.
- [6] 张春明. 山东惠民凹陷临南地区古近系沙三下亚段沉积相与储集性能研究[D]. 北京:中国地质大学,2012:105-106.
ZHANG Chunming. The sedimentary facies and reservoir characteristics of the lower part of the third member of Paleogene Shahejie formation, in Linnan area, Huimin depression, Shandong province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012: 105-106.
- [7] 覃利娟. 惠民凹陷古近系深层储层成岩作用及其对储层性质的影响[D]. 山东青岛:中国海洋大学,2007:139-140.
QIN Lijuan. Diagenesis and its impact on the reservoir quality of deep reservoir from Paleogene in Huimin depression [D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2007: 139-140.
- [8] 常象春. 临南洼陷沙三段岩性油气藏形成机理与分布规律[D]. 山东青岛:山东科技大学,2007:93-94.
CHANG Xiangchun. Formation mechanism and occurrences of lithological petroleum reservoirs of Es3 in Linnan subsag [D]. Qingdao, Shandong: College of Geo-information Science and Engineering, 2007: 93-94.
- [9] 许小琼,张学平. 惠民凹陷江家店地区沙三下亚段储集层评价[J]. 录井工程,2005,16(3):64-67.
XU Xiaoqiong, ZHANG Xueping. Evaluation of reservoirs of Es3 in Jiangjiadian area, Huimin depression [J]. Logging Project, 2005, 16(3): 64-67.
- [10] 王秉海,钱凯. 胜利油田地质研究与勘探实践[M]. 山东东营:石油大学出版社,1992:18-19.
WANG Binghai, QIAN Kai. Geology research and exploration practice of Shengli oilfield [M]. Dongying, Shandong: University of Petroleum Press, 1992: 18-19.
- [11] 韩天佑,漆家福,杨桥,等. 惠民凹陷临南地区第三系油气运移聚集特征研究[J]. 油气地质与采收率,2003,10(6):21-23.
HAN Tianyou, QI Jiafu, YANG Qiao, *et al.* Study on the characteristics of hydrocarbon migration and accumulation of Linnan area in Huimin sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(6): 21-23.
- [12] 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 Yanxia, LIU Hongjun, YUAN Dongshan, *et al.* Effect of oil charging on reservoir's diagenetic mineral evolution [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 274-280.
- [13] 李荣西,席胜利,邸领军. 用储层油气包裹体岩相学确定油气成藏期次——以鄂尔多斯盆地陇东油田为例[J]. 石油与天然气地质,2006,27(2):194-199.
LI Rongxi, XI Shengli, DI Lingjun. Oil/gas reservoiring phases determined through petrographic analysis of hydrocarbon inclusions in reservoirs: taking Longdong oilfield, Ordos basin, as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 194-199.
- [14] BURRUSS R C. Hydrocarbon fluid inclusions in studies of sedimentary diagenesis [G]//HOLLISTER L S, CRAWFORD M L. Fluid inclusions: applications to petrology. Mineralogical Association of Canada Short Course Notes, 1981: 138-156.
- [15] BURRUSS R C. Practical aspects of fluorescence microscopy of petroleum fluid inclusions [G]//BARKER C E, KOPP O C. Luminescence microscopy and spectroscopy: qualitative and quantitative applications. SEPM Short Course 25, 1991: 1-7.
- [16] MUNZ I A. Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematics, analytical methods and application [J]. Lithos, 2001, 55(1-4): 195-212.
- [17] 孙秀丽,陈红汉,宋国奇,等. 东营凹陷胜坨地区深层油气成藏期及其主控因素分析[J]. 石油学报,2010,31(3):386-393.
SUN Xiuli, CHEN Honghan, SONG Guoqi, *et al.* Hydrocarbon accumulation period and its controlling factors in deep formations of Shengtuo area in Dongying depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(3): 386-393.
- [18] 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):68-73.
LIU Shaobo, GU Jiayu. Application of fluid inclusions to petroleum geological study and discussion [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(4): 68-73.
- [19] HALL D L. Freezing point depression of NaCl-KCl-H2O solution [J]. Economic Geology, 1988, 83: 194-202.
- [20] 刘斌,段光贤. NaCl-H2O溶液包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. 矿物学报,1987,7(4):345-352.
LIU Bin, DUAN Guangxian. The density and isochoric formulae for NaCl-H2O fluid inclusions and their applications [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1987, 7(4): 345-352.
- [21] 王延吉,单林. 气泡突变法判断气液包裹体的冰点[J]. 华东地质学院学报,1987,10(1):51-56.
WANG Yanji, SHAN Lin. Determination of freezing point in fluid inclusions by bubble change method [J]. Journal of East China College of Geology, 1987, 10(1): 51-56.
- [22] POTTER R W, BROWN D L. The volumetric properties of aqueous sodium chloride solutions from 0 to 500°C at pressures up to 2000 bars based on a regression of available data in the literature [M]. Geological Survey Bulletin 1421-c, Washington: U. S. Government Printing Office, 1977.
- [23] 张文忠,郭彦如,汤达祯,等. 苏里格气田上古生界储层流体包裹体特征及成藏期次划分[J]. 石油学报,2009,30(5):685-691.
ZHANG Wenzhong, GUO Yanru, TANG Dazhen, *et al.* Characteristics of gas accumulation period in the Upper Paleozoic reservoirs of Sulige gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(5): 685-691.
- [24] 陈红汉. 油气成藏年代学研究进展[J]. 石油与天然气地质,2007,28(2):143-150.
CHEN Honghan. Advances in geochronology of hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(2): 143-150.
- [25] 郭振华,陈红汉,赵彦超,等. 利用储层流体包裹体确定鄂尔多斯盆地塔巴庙区块上古生界油气充注期次和时期[J]. 现代地质,2007,21(4):712-718.
GUO Zhenhua, CHEN Honghan, ZHAO Yanchao, *et al.* Using fluid inclusions of reservoir to determine hydrocarbon charging orders and times in the Upper Paleozoic in Tabamiao block, Ordos basin [J]. Geoscience, 2007, 21(4): 712-718.
- [26] 郭栋,夏斌,陈红汉,等. 利用矿物流体包裹体法分析济阳拗陷CO2气成藏期次与成藏时期[J]. 现代地质,2005,19(增刊):212-216.
GUO Dong, XIA Bin, CHEN Honghan, *et al.* Using Mineral fluid inclusion method analysis the CO2 forming period and times in Jiayang depression [J]. Geoscience, 2005, 19(Supp.): 212-216.
- [27] 操应长,贾艳聪,王艳忠,等. 渤南洼陷北带沙四上亚段储层成岩流体演化[J]. 现代地质,2014,28(1):197-207.
CAO Yingchang, JIA Yancong, WANG Yanzhong, *et al.* Diagenetic fluid evolution of reservoirs in Es3 in the North zone of the Bonan sag [J]. Geoscience, 2014, 28(1): 197-207.

(编辑 顾新元)