

高邮凹陷阜宁组一段储层成岩环境演化的流体包裹体证据

戴祉平¹, 陈 勇², 于雯泉¹

(1. 中国石化江苏油田分公司 地质科学研究院, 江苏 扬州 225009;

2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘 要:在对苏北盆地高邮凹陷阜宁组一段储层岩心薄片的大量观察和分析基础上,对与阜一段储层成岩作用有关的流体包裹体进行了系统分析,明确了成岩作用流体性质。根据流体性质可以分为四个重要成岩流体活动阶段:①早期弱碱性流体活动,成岩温度 50~80 °C;②成岩流体演变为酸性,成岩温度 80~105 °C;③成岩流体演变为碱性,成岩温度 95~120 °C;④成岩流体演变为酸性,成岩温度 110~140 °C。碱性流体活动时期发生碳酸盐胶结,酸性流体活动期发生硅质胶结(石英次生加大)。酸性流体对次生孔隙的发育有利,由于成岩演化历史过程中酸性流体有限,其活动区域应当重点分析。

关键词:高邮凹陷;阜宁组;储层;成岩环境;流体包裹体

中图分类号:TE122.21

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)05-0053-08

Evolution of Diagenesis Environment of the 1st Member Funing Formation in Gaoyou Sag: Evidence from Fluid Inclusions

Dai Zhiping¹, Chen Yong², Yu Wenquan¹

(1. Geological Scientific Research Institute, Sinopec Co., Ltd Jiangsu Oil Field Branch, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Based on observation and analysis of rock flakes from the 1st member Funing Formation in Gaoyou Sag, the fluid inclusions connected with diagenesis (the character and stages of diagenesis fluids) were analyzed systematically. The results show that the 1st member Funing Formation mainly underwent four stages of diagenesis environment according to fluids characteristics. The first stage was alkalescent diagenesis fluid, with the diagenesis temperature from 50 to 80 °C; the second stage was acidic fluid with the diagenesis temperature from 80 to 105 °C; the third stage was alkaline fluid with the diagenesis temperature from 95 to 120 °C, and the last stage was acidic fluid with the diagenesis temperature from 110 to 140 °C. Carbonate cementation occurred when alkalescent fluid appeared, while silica cementation (quartz overgrowth) mainly occurred in stage of acidic fluid movement. In addition, acidic fluid was beneficial to the formation of secondary hole in reservoir, but its quantity was very limited in the history of diagenesis, so it was important to determine its activity area.

Key words: Gaoyou Sag; Funing Formation; reservoir; diagenesis environment; fluid inclusions

成岩作用及其环境特征的研究一直是储层研究的重点和热点,成岩流体的酸碱性对储层次生孔隙的发育极为重要,特别是酸性成岩流体受到广泛关注^[1-5]。高邮凹陷是江苏油田的主力产油凹陷,前期勘探结果

收稿日期:2012-06-09

基金项目:国家自然科学基金项目(40902040);中央高校基本科研业务费专项资金项目(10CX05004A)

作者简介:戴祉平(1956—),男,江苏江都人,工程师,主要从事油田科技管理和油气勘探工作。

E-mail: daizp.jsyt@sinopec.com

表明,阜宁组一段是其主要产油层段之一,且油藏丰富,但基本为低渗透油藏^[6-7]。对低渗透储层而言,次生溶蚀孔隙对储层孔隙度有重要贡献,而次生孔隙的发育程度主要受成岩流体作用影响^[5]。因此,了解储层成岩作用的流体性质及其演化历史,对于深入认识低渗透储层成因机制有重要意义。流体包裹体作为记录储层成岩作用的最佳样品,通过储层流体包裹体研究可以划分储层成岩阶段,了解成岩流体性质以及成岩作用的温压条件。因此,本文对苏北盆地高邮凹陷阜宁组一段低渗透储层的成岩流体包裹体进行了系统研究,分析了成岩流体酸碱性的演化史,为解释该区低渗透储层的水岩作用机制和预测储层次生溶蚀孔隙分布规律提供证据。

1 高邮凹陷构造单元划分与阜一段储层特征

1.1 高邮凹陷构造单元划分

高邮凹陷可进一步划分为南部断阶带、中央深凹带和北部斜坡带三个次级构造单元,如图 1 所示。高邮凹陷的构造格局在南北向呈断、凹、坡的特征,即南部断裂带、中央深凹带和北部斜坡带。东西向自西向东发育三个南北向展布的构造带:码头庄—韦庄—马家嘴构造带、卸甲庄—永安—真武构造带、沙埝—富民—竹墩构造带;中央深凹带自西向东发育邵伯、樊川、刘五舍 3 个次级凹陷。

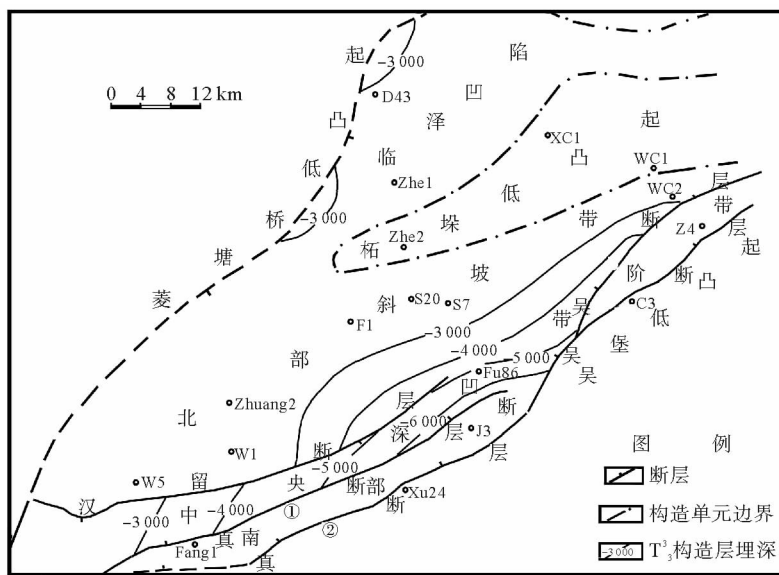


图 1 高邮凹陷构造单元简图

Fig. 1 Outline of Gaoyou Sag structure

1.2 储层岩石学特征

通过对 73 口井 220 个岩心样品进行岩石学统计,结果表明:高邮凹陷阜宁组储集层的砂体类型以细砂岩和粉砂岩为主,主要为长石岩屑石英粉-细砂岩及岩屑长石石英粉-细砂岩,少部分为长石岩屑砂岩或岩屑长石砂岩。阜一段岩性主要为长石砂岩和长石岩屑砂岩。石英含量 55%~70%,长石含量 10%~30%,以斜长石为主,岩屑含量 10%~30%,分选中等-偏差,磨圆中等,呈次圆状-次棱角状,结构成熟度较差。由于阜一段来自多个物源,所以在垂向上和平面上的成熟度均差于阜三段。碎屑间以点、线接触为主,粒间主要为方解石、铁方解石及粘土矿物共同胶结和充填。常见块状层理、平行层理和少量波状砂纹层理。

1.3 储层成岩作用特征

阜宁组储层经历的成岩事件主要包括机械压实作用、胶结作用和交代作用、重结晶作用、溶解作用。关于储层成岩作用特征、自生矿物及粘土矿物显微特征已有文章详细报道^[6],所以不再赘述。阜一段储层中自生矿物类型主要有碳酸盐、自生石英、自生长石、黄铁矿和粘土矿物等。在阴极发光测试条件下,碳酸盐矿物

方解石为较亮的黄色光,白云石为暗红色,铁白云石一般不发光或发很暗的光。自生石英胶结物不发光,高岭石矿物为海兰色光。通过铸体薄片显微观察、阴极发光等方法对矿物成因进行了分析,对成岩序列判断有帮助的自生矿物特征如下。

1.3.1 碳酸盐胶结

方解石胶结物是分布最普遍的一类胶结物,镜下以它形粒状为主,部分呈嵌晶状,在胶结的同时还对颗粒、杂基进行交代,阴极光下呈黄色。结构特征显示,它形成于埋藏成岩作用早期,多分布在 1000~2500 m 埋深段。白云石胶结物含量较方解石胶结物低,但分布较普遍。镜下白云石多呈菱形自形晶体,粉-细晶状分散分布,可与方解石形成刺穿交代,并在晶体中多含未被交代完全的方解石包裹体。它出现的深度与方解石胶结物大致相同,并在 2500 m 呈较大值。铁方解石和铁白云石胶结物出现的深度一般大于方解石、白云石的深度,常见铁方解石包裹方解石或白云石,铁白云石一般在白云石晶体外形成次生加大。含铁碳酸盐的大量出现是中成岩晚期标志之一。

1.3.2 粘土矿物胶结

粘土矿物胶结物在阜宁组储层中含量一般小于 5%,但它广泛分布,以高岭石、绿泥石、伊-蒙混层和伊利石为主,并随埋深增加而发生成岩转化。高岭石在整个阜宁组储层中普遍发育,按其成因可分为沉淀自生和长石蚀变两类,在扫描电镜下前者占绝大多数,自形程度高,晶粒大,多呈蠕虫状和书页状集合体,后者多呈堆积状并附生在长石表面或周围,其内部有时可见长石蚀变残余。绿泥石和伊利石胶结物在阜宁组储层中也普遍存在。扫描电镜下,自生绿泥石呈针叶状分布于粒间或附着于颗粒表面,常见与铁白云石、伊利石和石英加大共生,表明为成岩晚期产物,开始出现在埋深 1600 m 以下,其含量随埋深增大而增加;伊利石呈片状或毛发状平行于粒表,也可形成薄膜或胶结,其分布与绿泥石类似,并表现出与高岭石胶结物具有相互消长的关系。伊蒙混层胶结物在扫描电镜下常呈蜂窝状形态,并多以孔隙充填和孔隙衬垫的形式出现,随着埋深与温度的增加,由蒙脱石转化的产物,当埋深进一步增大时,混层逐渐消失,最终演化成较稳定的伊利石或绿泥石,究竟最终转化成哪一种矿物为主,将决定演化途径中水介质富钾还是富镁。

研究表明,本区属水介质富钾向伊-蒙互层演化的途径类型,于埋深 2300,3200 和 3700 m 以下分别出现第一、二、三迅速转化带,相对应的伊-蒙混层分别由 50%~80% 下降到 30%~50%,20%~30% 和小于 20%。上述转化带深度分布,并不受地层时代的控制,而主要受控于温度。

1.3.3 黄铁矿

黄铁矿镜下呈球粒状集合体,反射光金属色,一般作为最后一期胶结物,在胶结同时,强烈交代周围的各种结构组分。黄铁矿的出现反映了油气成熟后,进入储层,形成于较封闭、还原的环境,含量不超过 1%。

1.4 小结

根据上述阜宁组在埋深过程中胶结物的胶结、交代关系或典型自生矿物形成的产状,能够确定成岩序列:方解石胶结-自生石英-方解石、白云石胶结与交代-长石与碳酸盐矿物溶解-高岭石充填-铁方解石、铁白云石胶结与交代-黄铁矿形成。有的成岩时间是阶段性的,而有的持续时间较长;不同成岩事件具相互承转或重叠的特点。

阜一段溶解作用普遍发育,溶蚀现象丰富,颗粒边缘具明显的溶蚀特征,为锯齿状、港湾状;溶蚀次生孔隙比较发育,形态不规则,或为伸长状,或为复杂多边形。长石是一种不稳定矿物,在酸性水介质条件下易发生溶解,它的溶解为石英次生加大和高岭石沉淀提供了物质基础。该段石英溶蚀也很普遍,部分石英存在粒内溶孔。方解石也是本区很常见的一种溶解对象,它在胶结-交代作用发生以后,在酸性介质条件下溶解,主要形成粒间溶孔。阜一段以方解石等碳酸盐胶结物溶解为主,形成胶结物溶孔、粒间溶孔;阜一段溶解作用十分发育,溶蚀孔隙在总孔隙中所占比例也较高。主要溶解事件或次生孔隙的形成期是在方解石与白云石胶结、交代之后,于铁方解石与铁白云石胶结、交代或充填之前完成的。而流体是控制溶蚀作用的关键因素,所以对成岩作用流体性质分析是很有必要的。

2 成岩环境酸碱性和流体包裹体记录

2.1 成岩环境酸碱度影响

储层成岩环境酸性一致是成岩环境研究的核心问题之一。已有研究成果表明,在不同性质的成岩作用流体环境中矿物的溶解能力存在明显的差异。成岩流体性质对矿物的影响主要表现在流体的酸碱性和(pH)方面,不同 pH 值条件下的水-岩作用不同。前人结果^[8]表明,流体 pH 值为 8.5 可以作为石英溶解度快速变化的分界点,当 pH 为 2~8.5 时,石英溶解度基本不变,石英处于稳定状态,当 pH 值大于 8.5 时,由于溶解度的快速增大而使石英产生溶蚀现象。在较强碱性条件下(pH>9),可以出现长石的次生加大和方解石的沉淀。随着流体 pH 值的变化,石英与方解石(及长石)的溶解或沉淀呈此消彼涨的关系。因此,可以将碳酸盐溶解、长石溶解或蚀变为高岭石以及石英次生加大等典型现象作为经历酸性成岩环境的标志;而将石英颗粒及次生加大边溶解、长石次生加大、铁方解石和铁白云石等碳酸盐矿物沉淀等现象作为经历碱性成岩环境的标志。

2.2 流体包裹体记录

在储层中广泛存在的流体包裹体是埋藏有机质演化、油气运移、成藏过程中被捕获在源岩或储层矿物晶体缺陷、空穴、位错及微裂隙中的流体组分,是有机质不同演化阶段、油气运移、盆地热流体乃至古油气的最直接样品,可以为定量描述油气形成和储层成岩作用机制提供直接依据^[9]。根据上述描述,可以认为石英生长形成的流体包裹体代表了酸性流体活动,而在方解石中的流体包裹体则记录了碱性流体。本次研究重点是对方解石胶结物和石英微裂隙或石英加大边中的流体包裹体进行系统的测温分析,代表性流体包裹体照片如图 2 所示。图 2(a)是位于石英加大边和微裂隙的盐水包裹体;图 2(b)是位于石英微裂隙中的油气包裹体;照片图 2(c)和图 2(d)是方解石脉中的包裹体。由于砂岩颗粒间的碳酸盐胶结物中包裹体非常小,一般无法在显微镜下观察进行测温实验,故不作为测试对象。而方解石脉形成过程往往与碳酸盐胶结是一致的,因此可以用方解石脉中的流体包裹体代表碳酸盐生长的环境。

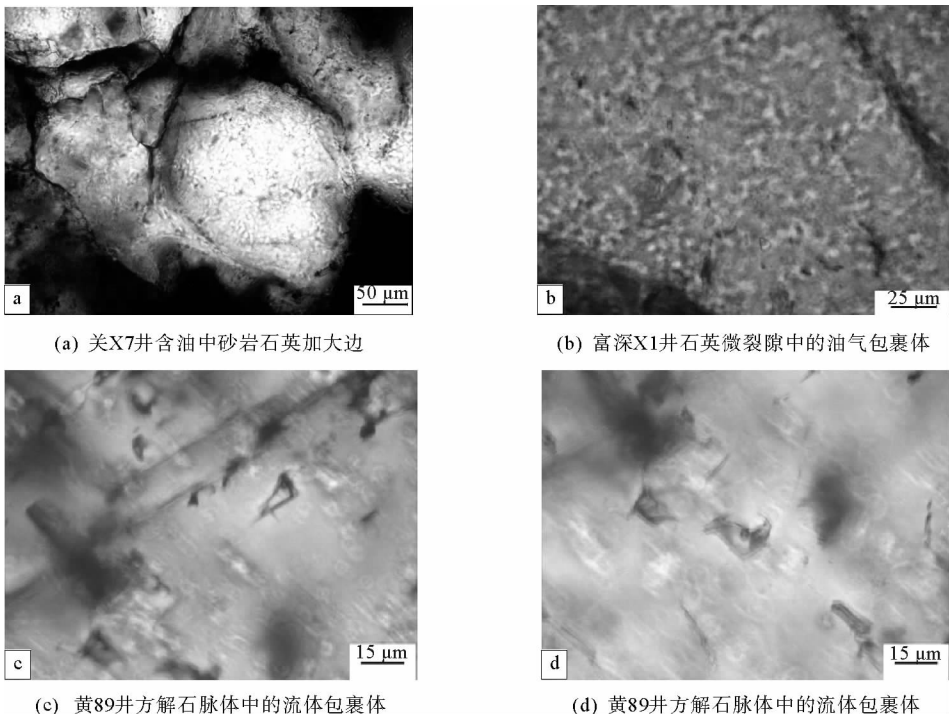


图 2 储层流体包裹体显微照片

Fig. 2 Photos of fluid inclusions in reservoir

3 储层流体包裹体均一温度特征及演化史分析

对高邮凹陷阜宁组 156 张储层包裹体薄片中进行详细的镜下观察及测温分析,实验在中国石油大学(华东)盆地构造与油气储层地质实验室完成,所用仪器为蔡司高级偏光显微镜和 Likman THMS-600 冷热台。共测得流体包裹体均一温度数据 322 个,冰点数据 76 个,下面分别阐述高邮凹陷各个构造单元储层成岩作用的流体类型。

3.1 南部断阶带

高邮凹陷南部断阶带阜宁组一段(E_1f_1)储层中流体盐水包裹体的均一温度范围为 60~140 °C(图 3),受断层多期活动影响,石英胶结的流体活动峰值不明显,盐水包裹体的均一温度主要集中在 90~100 °C 和 120~140 °C 两个区间。

3.2 中央深凹带

高邮凹陷中央深凹带阜宁组一段(E_1f_1)储层中流体盐水包裹体的均一温度范围为 50~140 °C(图 4),石英加大边中盐水包裹体的均一温度主要集中在 90~100 °C 和 120~140 °C 两个区间内(图 4a)。寄主矿物为方解石脉的盐水包裹体的均一温度范围为 50~120 °C,均一温度主要集中在 50~90 °C 和 110~120 °C 两个区间内(图 4b)。

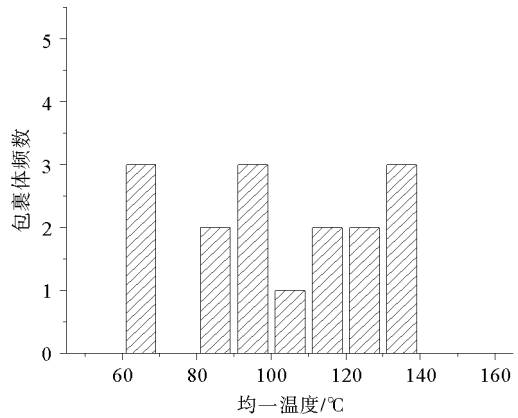
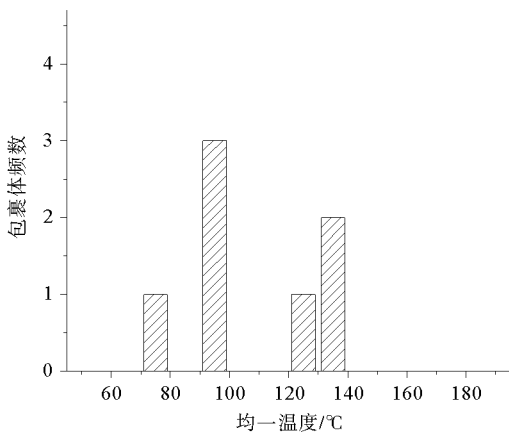
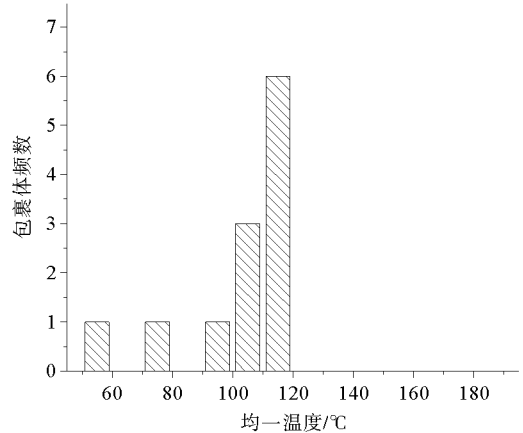


图 3 高邮凹陷南断阶带 E_1f_1 石英裂隙盐水包裹体均一温度直方图
Fig. 3 Histogram of homogenization temperature of fluid inclusions in quartz in E_1f_1 reservoir in south of Gaoyou sag



(a) 深凹带 E_1f_1 石英加大边盐水包裹体均一温度直方图



(b) 深凹带 E_1f_1 方解石脉盐水包裹体均一温度直方图

图 4 高邮凹陷中央深凹带 E_1f_1 包裹体均一温度直方图

Fig. 4 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions in E_1f_1 reservoir in center deep depression of Gaoyou Sag

3.3 北斜坡西部

根据高邮凹陷北斜坡西部 67 个包裹体样品分析,高邮凹陷北斜坡西部阜宁组一段(E_1f_1)储层中盐水包裹体的均一温度范围为 50~150 °C(图 5),其中寄主矿物为石英的盐水包裹体的均一温度范围为 50~150 °C,均一温度主要集中在 90~100 °C 和 110~140 °C 两个区间内(图 5(a))。方解石脉的盐水包裹体的均一温度范围为 40~90 °C,均一温度主要集中在 50~70 °C 和 80~90 °C 两个区间内(图 5(b))。

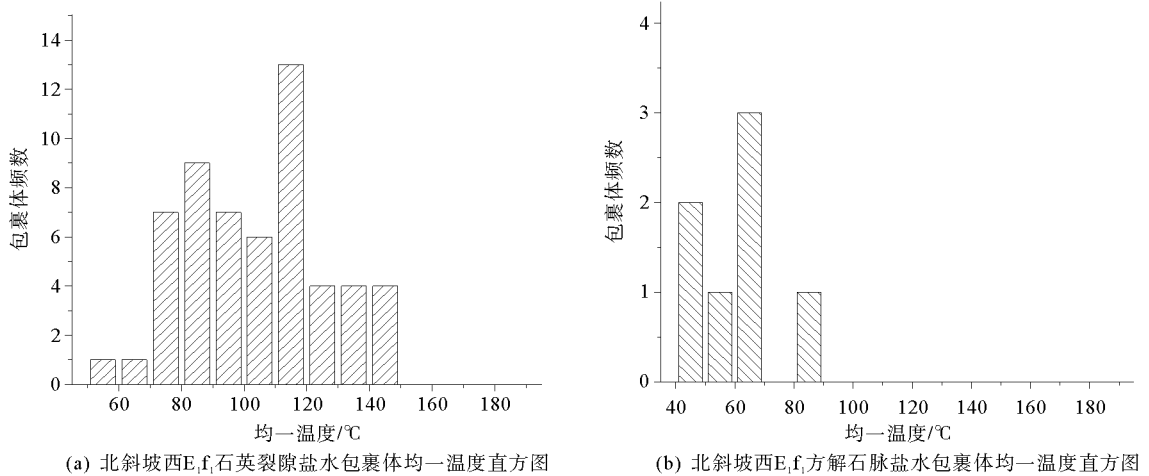


图 5 高邮凹陷北斜坡西部 E_1f_1 包裹体均一温度直方图

Fig. 5 Histogram of homogenization temperature of fluid inclusions in E_1f_1 reservoir in west of northern slope of Gaoyou Sag

3.4 北斜坡东部

根据高邮凹陷北斜坡东部 173 个包裹体分析,高邮凹陷北斜坡东部阜宁组一段(E_1f_1)储层中盐水包裹体的均一温度范围为 60~190 °C(图 6),其中寄主矿物为石英的盐水包裹体的均一温度范围为 70~190 °C,均一温度主要集中在 90~110 °C 区间内(图 6(a)).寄主矿物为方解石的盐水包裹体的均一温度范围为 60~100 °C,均一温度主要集中在 70~90 °C 区间内(图 6(b)).有部分包裹体的均一温度超过 170 °C,造成均一温度过高的可能原因是深部热液的影响或者是含烃盐水包裹体的不均匀捕获等。

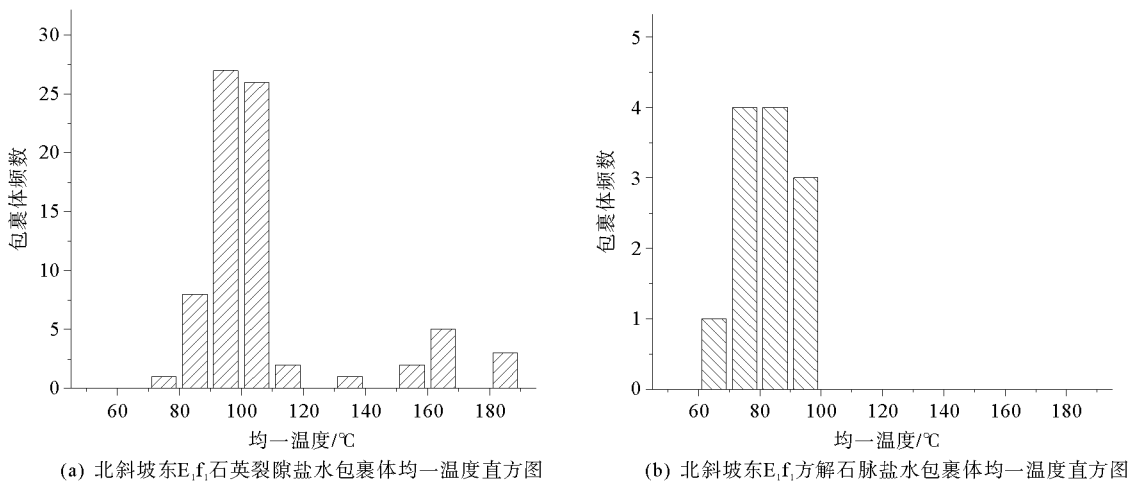


图 6 高邮凹陷北斜坡东部 E_1f_1 包裹体均一温度直方图

Fig. 6 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions in E_1f_1 reservoir in east of northern slope of Gaoyou Sag

综上所述,阜一段储层主要存在两期石英加大和两期方解石胶结作用。从流体包裹体均一温度分布来看,高邮凹陷阜一段储层成岩作用流体演化规律是:第一期碱性成岩流体温度 50~80 °C;第一期酸性流体在其之后,温度为 80~105 °C;之后为第二期碱性流体活动,温度 95~120 °C;最后为第二期酸性流体活动,温度 110~140 °C。各期流体之间有一定的交叉更替过程,其中第二期酸性流体对方解石胶结物的溶蚀作用对改善储层物性具有重要意义,是决定储层次生孔隙的决定因素之一。酸性流体对可溶组分的溶蚀是深层次生孔隙形成的主要机制,在一定程度上控制了深层优质储层的分布。对于均一温度大于 140 °C 的酸性流体

存在,推测主要因为侵入岩的影响。

4 成岩环境变化特征分析

根据储层成岩演化特征,结合自生矿物、镜质体反射率和流体包裹体等测试结果,按照最近划分标准对储层成岩演化阶段进行了划分,如图7所示。通过对阜一段的成岩作用类型和成岩流体性质,分析高邮凹陷阜宁组成岩环境演化特征(图7)。古埋深是在假定古地温梯度为 35 °C/km 和古地表温度为 20 °C 的前提下,由成岩流体温度(流体包裹体均一温度)计算获得。整个阜一段以碱性成岩作用为主,第一期碳酸盐胶结作用主要发生在早成岩 B 期,碱性流体温度 50~80 °C;第一期酸性流体是因为烃源岩开始进入生烃门限温度,排出有机酸带来的,酸性流体温度 80~105 °C;当有机酸消耗殆尽,第二期碱性出现,流体温度为 95~120 °C,发生第二期碳酸盐胶结;随着埋深增加,烃源岩释放的 CO₂ 的量增加,成岩环境逐渐转变为弱酸性,出现第二期酸性流体,石英加大,方解石溶解,温度 110~140 °C;然而有限的酸性流体很快被消耗完,成岩流体最终回到碱性环境,并一直持续至今。

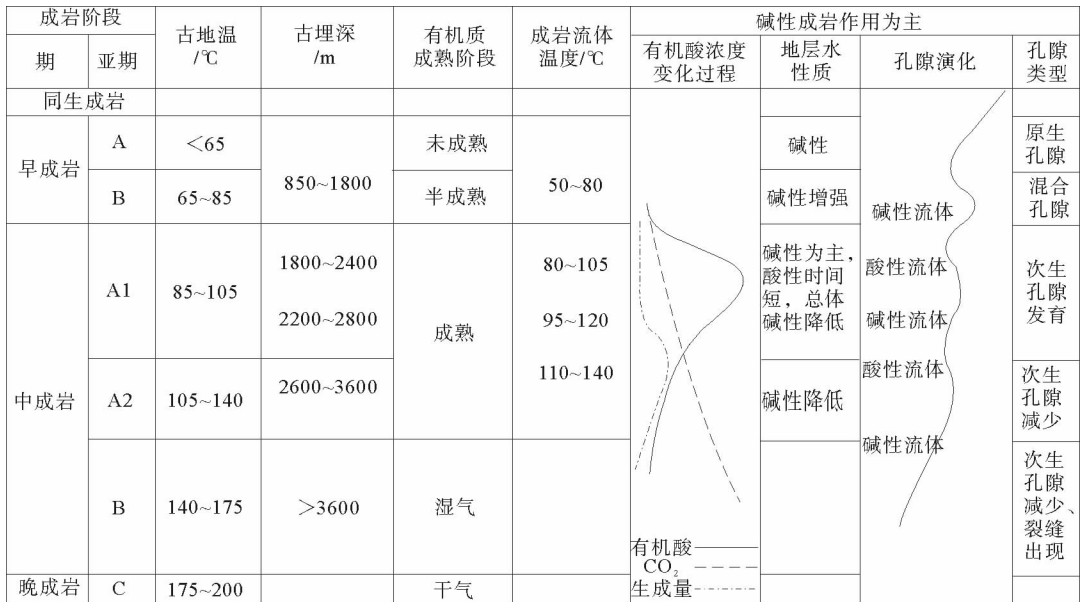


图7 高邮凹陷阜一段储层成岩环境演化图

Fig. 7 Evolution of diagenesis of E₁f₁ reservoir in Gaoyou Sag

沉积初期,地层水中含大量 Ca²⁺ 和 HCO₃⁻,随着压实作用的增强,水溶液浓度降低,pH 值升高,逐渐结晶出方解石等胶结物。随着温压条件增大,到中成岩 A 期,有机质成熟生成大量有机酸和 CO₂,粘土矿物转化脱出层间水和 H⁺(蒙脱石向伊利石转化),从而使流体呈酸性,对长石和碳酸盐矿物都具有很强的溶蚀能力,形成大量次生孔隙。在酸性流体对碳酸盐胶结物和易溶矿物溶蚀过程中,逐渐消耗掉 H⁺,变为富含 Mg²⁺、Ca²⁺、Fe²⁺ 和 HCO₃⁻ 的水溶液,随着深度进一步加深,温度不断升高,环境向偏碱性转化,由于各离子浓度变化的影响,先后结晶出铁方解石和铁白云石胶结物。随着埋深的增加,烃源岩进一步热演化,进入生气阶段,流体酸性较弱,对碳酸盐的溶解能力不大,同时还发生石英的次生加大作用。前人研究^[10-11]认为,古地温在 60~140 °C 是干酪根热离解形成短链羧酸的主要阶段,75~90 °C 是短链羧酸浓度最大时期,即干酪根释放同含氧基团的最高峰相一致,并与 I/S 混层粘土矿物出现带相吻合。

对高邮凹陷阜宁组储层而言,在早期的碳酸盐胶结使储层物性变差之后,由于烃源岩中酸性流体的排出,流体中的有机酸对致密的低渗储层进行了一定规模的溶蚀,使得储层中发育了大量的次生孔隙,改善了储层的物性。因而在酸性流体活动的位置,储层的物性相对较好,在有效圈闭和疏导体体系的多因素作用下,

易形成油气聚集,如沙埕油田、花庄油田、富民油田等。

5 结论

研究表明,高邮凹陷阜一段储层成岩作用环境变化具有如下特征:

- 1) 早期弱碱性流体活动,发生方解石胶结的早成岩 B 期,成岩温度 50~80 °C;
- 2) 早期油气充注,第一期酸性流体活跃阶段,方解石溶蚀作用明显,自生石英形成,成岩温度 80~105 °C;
- 3) 碱性富钙流体活动,成岩温度 95~120 °C,发生第二期碳酸盐胶结,方解石脉充填裂隙;
- 4) 油气大规模充注,酸性流体活动,温度 110~140 °C,石英微裂隙愈合和加大明显,方解石溶蚀,石英微裂隙中形成大量油气包裹体,但酸性流体的溶蚀作用非常有限,方解石中也可见到油气包裹体。

成岩演化历史反映了环境酸碱交替变化的过程,但是酸性流体非常有限。储层物性与勘探结果显示,酸性流体活跃地区对储层次生孔隙的发育是有利的,也是有利的勘探目标区。

参考文献:

- [1] Pittman E D, Lewan M D. Organic acids in geological processes[M]. Berlin: Springer-verlag, 1993: 1-481.
- [2] 朱抱苍,程中第. 地层干酪根有机酸与储层次生孔隙的关系[J]. 石油实验地质, 1996, 18(2): 206-215.
Zhu Baoquan, Cheng Zhongdi. Relation of organic acid generated by kerogen to secondary porosity of reservoir[J]. Experimental Petroleum Geology, 1996, 18(2): 206-215.
- [3] 郭春清,沈忠民,张林晔,等. 砂岩储层中有机酸对主要矿物的溶蚀作用及机理研究综述[J]. 地质地球化学, 2003, 31(3): 53-56.
Guo Chunqing, Shen Zhongmin, Zhang Linye, et al. The corrosion and its mechanism of organic acids on main minerals in oil-gas reservoir sand rocks[J]. Geology-geochemistry, 2003, 31(3): 53-56.
- [4] 张善文,袁静,隋凤贵,等. 东营凹陷北部沙河街组四段深部储层多重成岩环境及演化模式[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 576-587.
Zhang Shanwen, Yuan Jing, Sui Fenggui, et al. Multiple diagenetic environments and evolution model in deep formation of the 4th Member, Shahejie Formation in the northern Dongying Sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 576-587.
- [5] 谢继容. 砂岩次生孔隙的形成机制[J]. 天然气勘探与开发, 2000, 1(3): 52-56.
Xie Jirong. Mechanism of secondary porosity forming in sandstone[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2000, 1(3): 52-56.
- [6] 张金亮,刘宝珺,毛凤鸣,等. 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组成岩作用及储层特征[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 43-49.
Zhang Jinliang, Liu Baojun, Mao Fengming, et al. Clastic diagenesis and reservoir characteristics of Funing Formation in north slope of Gaoyou Depression in Subei Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 43-49.
- [7] 施振飞,张振城. 苏北盆地高邮凹陷阜宁组储层次生孔隙成因机制探讨[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 429-435.
Shi Zhenfei, Zhang Zhencheng. The mechanism of secondary pores in the reservoir of Funing Formation in Gaoyou Depression of Subei Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 429-435.
- [8] 周瑶琪,周振柱,陈勇,等. 东营凹陷民丰洼陷深部储层成岩环境变化[J]. 地学前缘, 2011, 18(2): 268-276.
Zhou Yaoqi, Zhou Zhenzhu, Chen Yong, et al. Research on diagenetic environmental changes of deep reservoir in Minfeng Area, Dongying Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 268-276.
- [9] 任拥军,陈勇. 东营凹陷民丰洼陷深部天然气储层酸性溶蚀作用的流体包裹体证据[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 257-262.
Ren Yongjun, Chen Yong. Acid dissolution of deep natural gas reservoirs in the Minfeng sag in the Dongying Depression: Evidence from fluid inclusions[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 257-262.
- [10] 罗孝俊,杨卫东. 有机酸对长石溶解度的影响的热力学研究[J]. 矿物学报, 2001, 21(2): 64-67.
Luo Xiaojun, Yang Weidong. The effect of organic acid on feldspar solubility: A thermodynamic study [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(2): 64-67.
- [11] 马亭,梅博文,柳长青,等. 油田卤水中短链有机酸的来源、分布及其地球化学意义[J]. 地质科技情报, 1993, 12(3): 73-77.
Ma Ting, Mei Bowen, Liu Changqing, et al. Origin, distribution and geochemistry significance of short-chain organic acid anions in oil-field brine[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(3): 73-77.