

济阳拗陷东营凹陷盐岩中的烃类包裹体 及其地质意义

陈勇¹⁾, 周振柱²⁾, 高永进³⁾, 王鑫涛¹⁾, 高婷¹⁾, 陈中红¹⁾

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

2) 山东科技大学 地质科学与工程学院, 山东青岛, 266590;

3) 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东东营, 257000

内容提要:本文报道在东营凹陷盐岩中发现大量烃类包裹体,这证实盐岩曾经失去封闭能力,成为油气运移通道。在对其盐水包裹体进行均一温度测试时发现,由于捕获压力与实验环境压力差异很大,再加上岩盐在水中溶解度随温度升高而增大,导致测温过程盐水包裹体体积变化和拉伸效应明显,所以同期盐水包裹体的均一温度出现较大波动,结果也不可靠,而纯烃类包裹体在一定程度上可以避免溶解度变化的影响,其均一温度有一定指示意义。通过对岩盐中的烃类包裹体均一温度初步校正,结合埋藏史和热史分析,认为至少存在两期与盐岩层变形有关的烃类流体活动,活动时期分别在东营期和明化镇期。流体对岩盐颗粒滑动和盐岩层变形有极其重要的影响,重结晶的岩盐晶体及其中的流体包裹体是流体作用的直接证据。盐岩中的流体来源、运移方向、活动期次和流体作用下的盐岩变形温度和压力是需要解决的关键问题,这对于了解含油气盆地中盐岩层对油气成藏的控制作用有重要意义。

关键词:盐岩;烃类包裹体;济阳拗陷东营凹陷;流体作用;封闭能力

已有研究和勘探结果表明,世界上许多含油气盆地油气藏的形成和分布都与盐岩层有关,含盐油气盆地控制了全球80%以上的探明储量(汤良杰等,2003;余一欣等,2007)。从盐岩层在全球的分布来看,几乎从前寒武纪到第四纪的各地质年代地层中都有分布;中国的渤海湾盆地、南襄盆地、江汉盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、塔里木盆地和柴达木盆地等均有膏盐岩分布;因此,盆地中膏盐岩层与油气成藏的关系一直受到广大石油地质学家的重视,是石油地质研究的热点之一。前人的研究成果主要集中在膏盐岩有关的沉积学、盐相关构造、盐岩对烃源岩、储层的影响、盐岩与超压及其封盖能力等方面(Trusheim,1960;Talbot and Jarvis,1984;Jackson and Talbot,1986;Jackson,1995;张世奇等,1997;李熙哲等,1997;Davison et al.,2000;吕修祥等,2000;汤良杰等,2003;徐士林等,2004;周兴熙,2004;刘晓峰等,2005a;金之钧等,2006;刘晖等,2009),而与盐岩有关的流体性质和流体作用方面涉及相对较少(刘晓峰等,2001,2005b)。长期以来,一直认为盐岩是

比较理想的盖层,然而 Schoenherr 等(2007)曾报道岩盐封闭性的下限问题,其文中提到岩盐中的烃类包裹体。本文报道在东营凹陷岩盐晶体中发现了大量的烃类包裹体,认为烃类包裹体是油气活动的直接证据,指出应当对流体作用有关的盐岩封闭性地质问题的重新思考,指出了岩盐流体包裹体分析遇到的问题,以期通过本文与广大同行进行探讨。

1 盐岩中的流体包裹体研究现状

盐岩中的流体包裹体研究主要在沉积古环境和古气候研究中得到了广泛的应用,国内外已有不少研究成果报道。国外最早是 Roberts 等(1995)发表文章指出岩盐中包裹体在研究古气温的重要意义及其可靠性;Lowenstein 等(1999)通过对盐岩中包裹体研究分析了 Death Valley 近 200 ka 以来的气候变化;Bukowski 等(2000)对 Wieliczka 盐岩中流体包裹体进行了研究,获知了沉积体系的物源与盐水类型;最近 James 等(2013)利用岩盐中的流体包裹体研究发现二叠纪地球上出现过高达 73℃ 的古气温。国

注:本文为国家自然科学基金(编号 41172111、41272140)、山东省优秀中青年科学家奖励基金(编号 BS2012NJ014)、中央高校基本科研业务费专项资金(编号 10CX05004A)资助项目和中国石油大学(华东)研究生自主创新科研计划项目(编号 14CX06019A)的成果。

收稿日期:2013-04-25;改回日期:2013-12-30;责任编辑:章雨旭。

作者简介:陈勇,男,1976 生。博士,副教授。主要从事流体地球化学研究。Email:yongchenzy@upc.edu.cn。

内杨吉根(1994)对我国东南四省五个盐岩矿床岩盐中流体包裹体进行了研究,分析矿床成因;刘兴起等(2005,2007)、葛晨东等(2007)利用盐湖岩盐中的流体包裹体研究了古气候和湖泊古环境的变化;Meng Fanwei等(2011)用岩盐中的流体包裹体获得了寒武纪古海水的温度。而刘成林等(2005)对天然岩盐包裹体均一温度进行了分析探讨,指出利用岩盐包裹体均一温度反映古温度时需谨慎。

关于岩盐中的烃类包裹体,曾有不少文献提到,但很少有人对此进行详细研究。刘晓峰和解习农(2001)曾指出流体包裹体是示踪盐构造有关热流体活动的重要样品之一,同时报道了与盐构造有关的烃类流体活动现象。Schoenherr等(2007)的文章曾指出了盐岩中的烃类包裹体在研究盐岩构造变形中的意义。岩盐中烃类包裹体的详细研究只有Jacque等(1995a,1995b)较早报道过,Jacque等(1995a,1995b)主要对Bresse盆地岩盐中烃类包裹体的相态、荧光、组成及含量等特征进行了分析,同时分析了两相烃类包裹体的均一温度、盐度等特征,指出了盆地地温梯度和有机质热演化特征。Grishina等(1998)对东西伯利亚寒武纪蒸发岩中钾盐中的包裹体进行了研究,发现了四类烃类包裹体,并对富含 N_2 包裹体中的 N_2 成因进行了分析讨论。李本超等(1987)曾对江汉油田膏岩中烃类包裹体进行了研究,并与泥岩中烃类进行对比发现岩盐中的油气具有明显的运移特征的现象,但未对有关油气运聚过程进行详细阐述。根据目前的文献查阅结果显示,关于盐岩中烃类包裹体与油气运聚的关系分析不多,特别是关于盐岩中的烃类包裹体流体来源及其有关的成藏过程缺少深入研究。

2 东营凹陷盐岩中的烃类包裹体特征

东营凹陷位于渤海湾盆地东部,属于济阳拗陷中的一个次级构造单元,是一个四周凸起环绕的晚侏罗世—古近纪时期的断陷复合盆地。关于东营凹陷的地质条件和油气成藏已有大量文章发表,本文不再赘述。东营凹陷膏盐层主要分布在始新统孔店组一段及始新统沙河街组四中一下亚段,自下而上发育三套,孔一段、沙四下、中段各有一套。与膏盐有关的岩性类型相对较多,主要包括:盐岩、石膏岩、膏盐岩、泥盐岩、盐膏岩、泥膏岩、石膏质泥岩、盐质泥岩、含膏泥岩、含盐泥岩、含膏含盐泥岩等。

目前研究在东风3、东风5、丰深2井、丰深6、丰8等井的盐岩中发现了大量烃类包裹体,包裹体大

小从几微米到几十微米均有。本文以烃类包裹体类型较全的东风3井为例进行分类表述,烃类包裹体照片如图1所示,采样位置如图8所示。根据包裹体中组分性质和相态差别,可以把盐岩中的含烃流体包裹体分为四种类型:①纯烃类包裹体(图1a、b),指在显微镜下基本上看不到水溶液相,只见烃类物质,一般为气液两相;②含水烃类包裹体(图1c、d),此类包裹体可以在包裹体的边缘看到水溶液相,包裹体以烃类为主,其中烃类可以出现气液两相;③含气盐水包裹体(图1e、f),整个包裹体以水相为主,含有气态烃为主的烃类物质,烃类也可以出现气液两相;④含烃盐水包裹体(图1g、h),指以水溶液相为主,水溶液中溶有部分烃类而发荧光。除第①类外,其他三种类型含烃包裹体可能为非均一捕获,都难以获得均一温度,估计与非均一捕获有关。烃类包裹体寄主的岩盐颗粒都比较透明,可以看出发生过明显的重结晶现象,这说明在流体作用下岩盐重结晶过程捕获了烃类流体。

3 岩盐中的流体包裹体均一温度特征

3.1 盐水包裹体均一温度特征

由于表生环境下岩盐流体包裹体的捕获压力和均一温度测试时的环境压力差别非常小,所以表生岩盐中的单相流体包裹体广泛用于古气温研究,但是对于深部高温高压条件下捕获的岩盐流体包裹体,其均一温度受到诸多因素的影响,情况有所不同。显微镜下可以看到(图2),烃类包裹体和盐水均在岩盐结晶过程捕获,同期共生的盐水包裹体在相态、气液比等参数会出现明显差异,引起这种差异的原因可能是多方面的,比如非均一捕获、拉伸作用、泄漏等原因。研究中对大量的盐水包裹体进行了测试,在测试流体包裹体均一温度加热过程中往往出现以下的情况:先随温度升高气泡逐渐变小,120℃之后气泡基本不再变化,200℃后包裹体开始发生变形,由方形或矩形向圆形或椭圆形转变,且气泡开始变大。一些常温下纯液相包裹体开始出现气泡,说明包裹体由于岩盐的变形而体积增大,加上温度升高,可能导致气体的溶解度降低,从而有气体析出。随着温度的进一步升高,相邻很近的包裹体往往合并成为一个较大的包裹体,且气泡不断变大,最后包裹体爆裂,爆裂温度一般在380~470℃。因此,除了少数盐水包裹体能够测出其均一温度外,大部分包裹体得不到其均一温度,即便测出均一温度,结果也不可靠。分析上述现象的原因,可能是由于

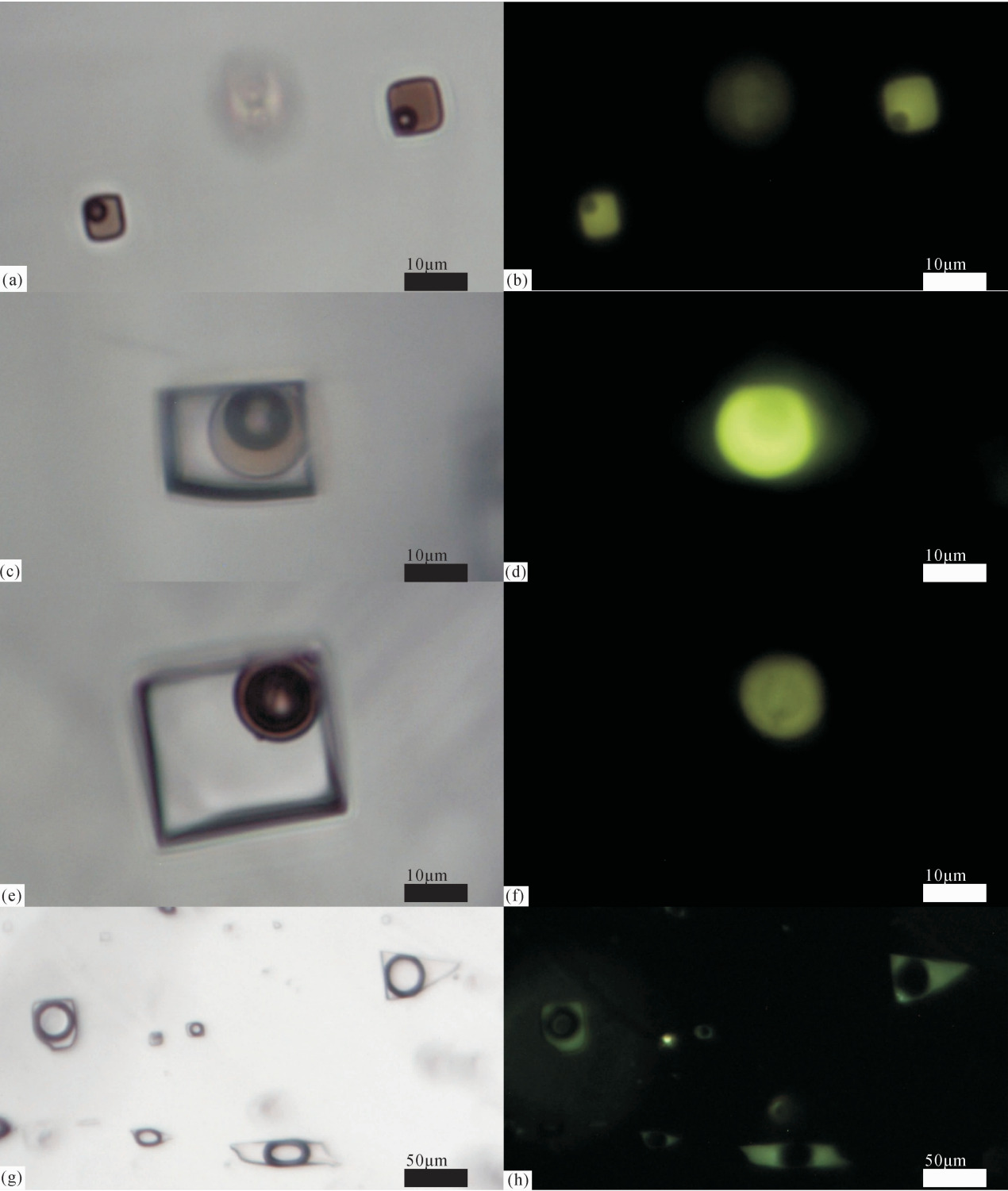


图 1 岩盐中的烃类包裹体(东风 3—3022. 2 m)

Fig. 1 Hydrocarbon inclusions contained in salt at the depth 3022. 2 m of well DF3

(a)、(c)、(e)、(g)为透射光下包裹体照片;(b)、(d)、(f)、(h)为对应的荧光下照片

Photos (a), (c), (e), and (g) are under transmit light; photos (b), (d), (f), and (h) are under fluorescence

NaCl 在水中的溶解度随温度升高而增大,结果导致岩盐中的盐水包裹体在均一温度测试过程中体积变

化较大。根据 Sterner 和 Bodnar(1988) 的溶解度公式计算,NaCl 在水中的溶解度 25℃ 为 26. 24%, 而

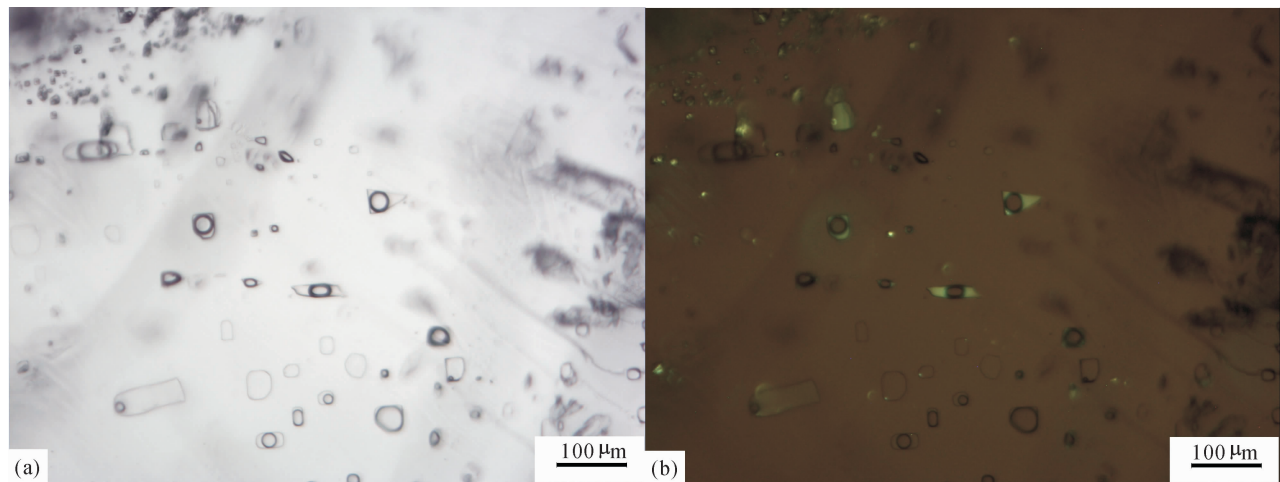


图 2 岩盐中的油水共生包裹体(东风 3 井 3022.2 m)
(a) 为透射光下石盐中的流体包裹体照片;(b) 为对应的荧光下照片

Fig. 2 Co-existing hydrocarbon inclusions and aqueous inclusions in halite (Well DF3, 3022.2 meter underground)
Photo (a) was fluid inclusions in halite under transmit light; photo (b) was under fluorescence

125℃时为 28.75%,温度增加 100℃,溶解度增加了 2.51%,这个数值对于流体包裹体体系的体积和压力变化是不可忽视。再考虑到捕获压力与均一温度测试的环境压力差值,包裹体的体积将会出现明显的变化,对均一温度测试将会产生明显的影响。Roedder(1984)曾指出由于岩盐容易拉伸、变形等原因,其中流体包裹体均一温度测试存在很大的不确定性。因此,岩盐中流体包裹体均一温度的可靠性值得审视,如何准确获取岩盐中盐水包裹体的捕获温度是需要解决的重要问题。

3.2 烃类包裹体期次和均一温度特征

烃类包裹体的岩相学特征表现出两期烃类流体活动,第一期烃类包裹体主要捕获在重结晶的石盐晶体中,包裹体自型程度较高,多数呈近立方型,截面呈四方形,包裹体个体相对较大,多数成群沿解理分布或单个分布,透光下多为棕褐色,荧光颜色多数为黄绿色,暗示油气成熟度较低,如图 3a、b 所示;第二期烃类包裹体数量较少,主要由后期裂隙愈合形成,呈线状分布,包裹体个体相对较小,形态不规则,多数成长条型,透光下液相多为无色,气相颜色发暗,荧光颜色多为蓝白色,指示油气成熟度相对较高,如图 3c、d 所示。

对于纯烃类包裹体,这里是指在显微镜下看不到独立水溶液相的烃类包裹体,由于水对岩盐溶解的影响很小,其均一温度具有一定的代表性。通过显微测温,并对每个烃类包裹体的均一温度进行详

细记录,并对结果进行统计,作出均一温度分布直方图,东风 3 井的烃类包裹体均一温度直方图如图 4 所示。结果显示,尽管同期的烃类包裹体均一温度存在一定差异,但是岩盐中两期烃类包裹体的均一温度还是存在明显区别,第一期主要集中在 60 ~ 80℃,第二期主要分布在 90 ~ 100℃,其平均值分别为 69.7℃和 94.0℃。由于烃类包裹体均一温度与其捕获温度之间有一定的差值,且岩盐在地下温度条件中往往呈塑性,流动性很强,其所含油气包裹体的均一温度与捕获温度差值可能更大,需要对均一温度进行校正后才能用于确定成藏年代。根据赵艳军(2008)对东营凹陷共生盐水包裹体和烃类包裹体均一温度的差值统计结果,可以推测第一期共生盐水包裹体的平均均一温度大致为 100℃,第二期盐水包裹体平均均一温度约为 115℃。结合东风 3 井的埋藏史和热史分析,初步确定第一期成藏时间为东营期,第二期成藏时间为明化镇期,这与前人(朱光有等,2004)对东营凹陷确定的油气成藏期次时间基本一致(图 5)。

相对盐水包裹体,由于烃类包裹体所含流体溶解岩盐而造成包裹体体积变化很小,基本上可以忽略,且均一温度不是很高,保证了岩盐的刚性,未达到岩盐的塑性变形的温度范围,因此,烃类包裹体的均一温度通过校正能够在一定程度上反映烃类流体活动的期次。结合烃类包裹体的岩相学特征,两期烃类包裹体具有不同的产状、荧光颜色和均一温度

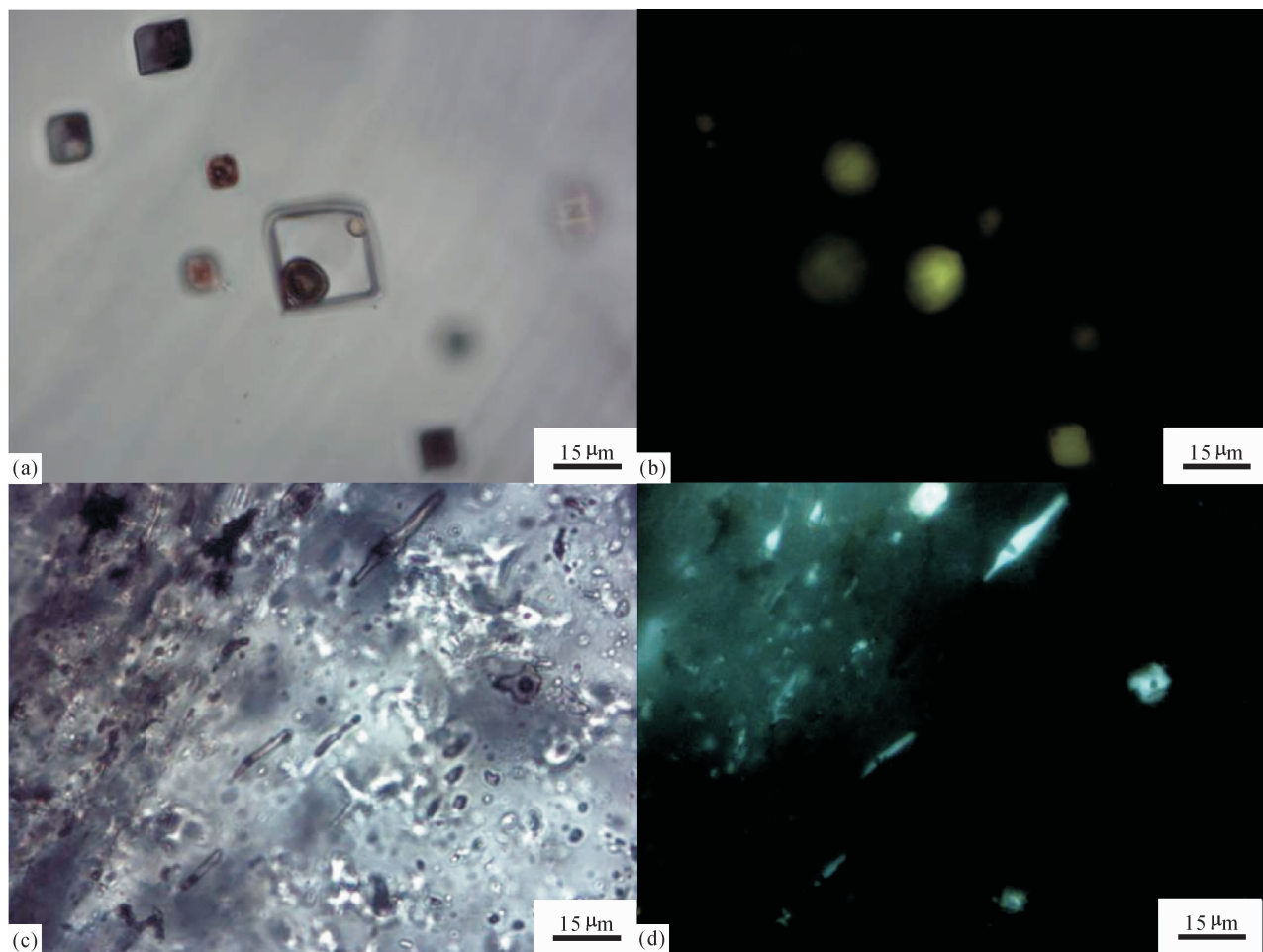


图3 岩盐中不同期次的烃类包裹体特征:(a)第一期烃类包裹体照片,石盐结晶时捕获,包裹体自形特征明显,多数呈立方型;(b)对应照片(a)荧光;(c)第二期烃类包裹体照片,包裹体沿裂隙分布;(d)对应照片(c)荧光

Fig. 3 characteristics of different stages hydrocarbon inclusions in halite photo: (a) shows the first stage hydrocarbon inclusions, which were formed by growth of halite crystal. These inclusions show cubic crystal. Photo (b) was the same position of flake as photo (a) under fluorescence. Photo (c) shows the second stage hydrocarbon inclusions under transmitted flight, inclusions were distributed along cranny. Photo (d) was the same position of flake as photo (c) under fluorescence

特征,基于埋藏史和热史资料,由此可以确定岩盐层至少经历了两期的烃类流体活动。

4 盐岩中烃类包裹体的地质意义

4.1 盐岩层封闭性破坏的流体证据

由于在大多数情况下盐岩具有非常好的封盖性能,可以作为油气藏得优质盖层,但在合适的条件下,盐岩也可能会失去封盖能力。在进行岩芯观察时,看到部分岩盐被油气浸染,岩盐呈现褐黄色,如图6所示。而在微观上,对岩盐颗粒的显微荧光观察显示,不少颗粒的微裂隙因被油气浸染而发荧光,如图7所示。这些现象都是暗示盐岩的封闭性在某个时期遭到破坏,烃类流体进入或穿透了盐岩层。

同时,结合岩盐中烃类包裹体可以证明,作为优质盖层的盐岩层对油气的封盖能力并非绝对的,在某些条件下会失去封盖能力。

以东风3井为例,东风3井位于东营凹陷中央隆起带,断层十分发育,部分断层深入沙四下亚段地层中,构造剖面简图如图8所示。虽然盐岩层的塑性和流动性很强,但发育的深断层可以切穿膏盐层,到达其以下的地层中,这样就沟通了盐岩层上下两个含油气系统,可能成为油气运移的通道。东营凹陷膏盐层之下发育异常高压,且烃源岩有机质含量丰富,生成了大量的油气,当深断层活动时,这些高压流体就会沿着泄压通道(断层)上涌,穿过封盖性已遭破坏的膏盐层,进入压力较低的上部地层中。

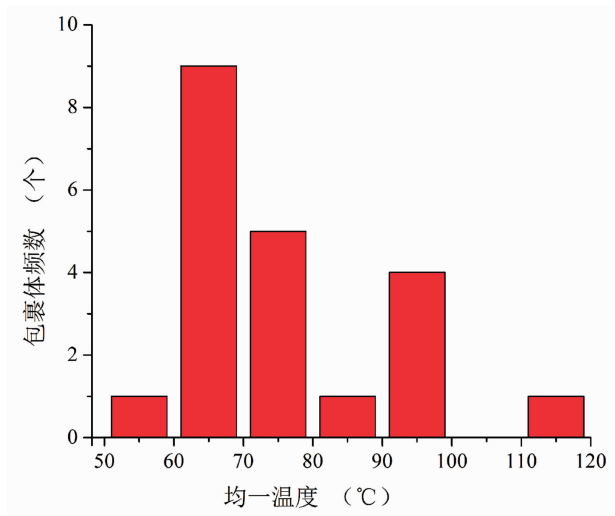


图 4 东风 3 井岩盐中烃类包裹体均一温度直方图
Fig. 4 Homogenization temperature histogram of hydrocarbon-bearing inclusions in salt of well DF3

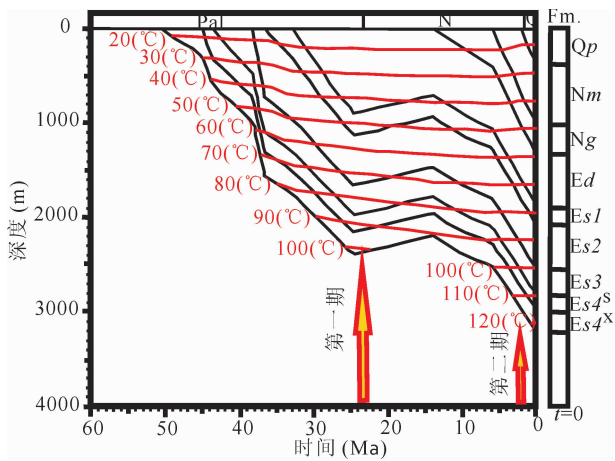


图 5 东风 3 井埋藏史与油气成藏期次
Fig. 5 Burial history of well DF3 and stages of oil accumulation

另外,由于膏盐层流动性强,造成了一系列的盐构造,在上部地层中形成了圈闭,为油气的聚集提供了良好的场所。因此,在中央隆起带这一断层和盐构造都发育的地区,由于构造活动,油气能够沿断层突破盐岩层的封堵,向上运移,在上部地层中充注成藏,并在岩盐中留下烃类流体活动的包裹体记录。随着断层活动的减弱,流体压力的降低以及盐岩层的流动补偿和结晶作用,盐岩层的封闭能力逐渐恢复,再次将上下两个系统隔离。



图 6 被油气浸染的盐岩层
Fig. 6 Salt rock dyed by oil

4.2 流体与盐岩层变形

Roedder(1984) 早就指出岩盐中的微量水(包括流体包裹体中的水)对盐岩层的稳定性可能会有重要的影响。盐岩相对其他岩石具有其特殊性,那就是盐易溶于水,当有流体出现时,溶解作用可能会引起盐岩性质的明显变化。Urai 等(1986)曾指出微量的水会导致岩盐软化变形,而流体包裹体组合、相态及分布特征可以指示岩盐的变形软化过程,同时,流体包裹体特征可以反映岩盐晶体重结晶的过程,这也反映了流体与岩盐之间具有非常密切的关系。Urai 等(1987)的实验证实颗粒边界的流体膜可以明显增加流动性,并观察到流体包裹体形成与微构造(裂隙)发育有着密切的关系。Carter 等(1993)曾对盐岩的流变学进行了研究。Schenk 和 Urai (2005)认为,相对其他岩石而言,盐岩中只要有及少量的水就可以引起颗粒边缘的滑动运移和压溶作用发生;他们的实验研究指出,当颗粒边缘发生移动时,流体包裹体与颗粒边缘相互作用,这个作用过程对盐岩的流变学会产生非常重要的影响。Schenk 等(2006)利用低温扫描电镜技术直接观察了充满流体的岩盐颗粒边界,对无水和有水条件下的岩盐重结晶颗粒边界特征进行了详细研究。由此可见,盐岩中的流体包裹体对盐岩变形有关的构造作用机制研究有着非常重要的指示意义。在本次研究中,找到烃类包裹体的岩盐颗粒都是在一定程度上发生过重结晶的,也证实了流体作用下的构造变形事件的存在。

尽管 Urai 等(1986)、Popp 等(2001) 对此进行了实验研究,但是关于地质条件下盐岩失去封盖能

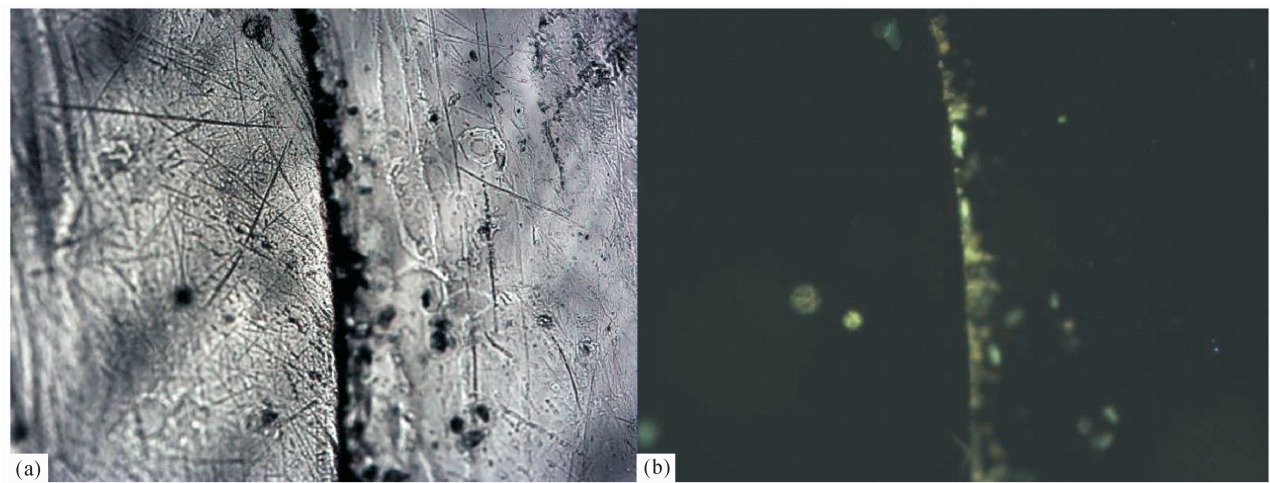


图 7 石盐颗粒微裂隙中的烃类物质及其荧光照片

(a) 为透射光下石盐中微裂隙照片;(b) 为对应的荧光下照片

Fig. 7 Transmission and fluorescence photos of hydrocarbon in micro-crack of halite
Photo (a) was fracture in halite under transmit light; photo (b) was under fluorescence

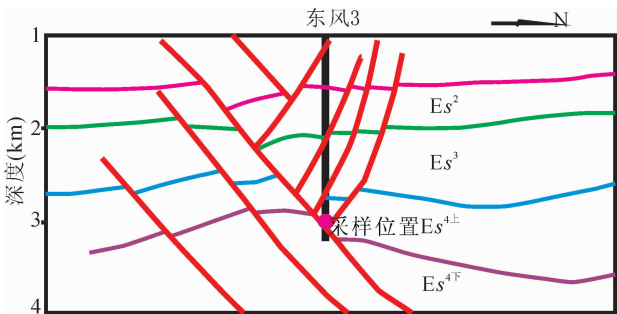


图 8 过东风 3 井地质剖面示意图及采样位置

Fig. 8 Geologic section through well DF3 and the location of samples

力及其有关条件和流体作用机制了解还不多。Schoenherr 等(2007)基于实际地质条件对盐岩封盖能力的下限进行了研究和讨论,但关于流体与岩盐的作用机制讨论不多。因此,地质条件下流体与岩盐的作用机制还需要深入研究,应当重点分析在构造活动(比如断裂活动)背景下盐水和烃类流体对盐岩层稳定性的影响。

5 结论

东营凹陷盐岩中的烃类包裹体引发了对盐岩层封闭性的重新认识,通过对盐岩及其中的流体包裹体进行显微观察、分类和测温分析,结合前人的研究成果,初步得到如下认识:

(1)盐岩中的烃类包裹体证实盐岩层曾经失去

封闭能力,油气进入或穿透盐岩层发生运移,但东营凹陷盐岩中的烃类流体与盐上和盐下油气藏的关系还需要进一步认识。盐岩有关的流体作用对盐岩层的封闭性和构造变形有重要影响,特别是流体存在可以促进盐岩层变形,这应当受到重视。

(2)根据岩盐中烃类包裹体岩相学特征和测温结果,初步判断存在两期与岩盐封闭性变化有关的油气活动,通过对烃类包裹体均一温度的初步校正,结合埋藏史和热史确定了油气活动的时间,第一期为东营期,第二期为明化镇期,与前人得到的东营凹陷油气成藏期次基本吻合。这证实了在关键油气成藏期,靠近断裂带的盐岩层封闭性可能变差,会有油气穿过。

(3)由于岩盐中包裹体的捕获压力与均一温度测试的环境压力差别较大,加上岩盐在水中的溶解度随温度升高而增大,导致岩盐中的盐水包裹体均一温度受到诸多因素影响,其结果可靠性差,难以给出有意义的结果;但岩盐中的纯烃类包裹体可以得到相对可靠的均一温度,对于区分油气成藏期次有一定帮助。如何恢复岩盐中流体的捕获温度和捕获压力是一个需要解决的问题。

因此,通过分析盐岩有关的流体来源、流体性质、运移方向及其流体作用机制,可以剖析盐岩中烃类流体活动与油气生成、运聚、成藏、保存之间关系,对于深入研究含盐岩油气盆地的油气成藏规律有重要意义。

参 考 文 献 / References

葛晨东,王天刚,刘兴起,孟凡巍,刘吉强.2007. 青海茶卡盐湖岩盐中流体包裹体记录的古气候信息. 岩石学报,23(9):2063~2068.

金之钧,龙胜祥,周雁,沃玉进,肖开华,杨志强,殷进垠. 2006. 中国南方膏盐岩分布特征. 石油与天然气地质, 27(5):571~583.

李本超,贾蓉芬.1987. 流体包裹体中的有机成分及其应用. 地质地球化学,7:39~44.

李熙哲,杨玉凤,郭小龙. 1997. 渤海湾盆地压力特征及超压带形成的控制因素. 石油与天然气地质. 18(3):236~242.

刘成林,陈永志,焦鹏程,李荫清,王弼力.2005. 罗布泊卤水室内蒸发及天然岩盐包裹体均一温度分析探讨. 东华理工学院学报(自然科学版),28(4):306~312.

刘晖,操应长,姜在兴. 2009. 渤海湾盆地东营凹陷沙河街组四段膏盐层及地层压力分布特征. 石油与天然气地质,30(3):287~293.

刘晓峰,解习农.2001. 与盐构造相关的流体流动和油气运聚. 地学前缘,8(4):343~349.

刘晓峰,解习农,姜涛,张成.2005a. 东营凹陷盐一泥层构成及其特征. 地球科学,30(5):604~608.

刘晓峰,解习农,张成,姜涛.2005b. 东营凹陷盐一泥构造的样式和成因机制分析. 地学前缘,12(4):403~409

刘兴起,倪培.2005. 表生环境条件形成的岩盐流体包裹体研究进展. 地球科学进展,20(8):854~862.

刘兴起,倪培,董海良,王天刚.2007. 内陆盐湖岩盐流体包裹体均一温度指示意义的现代过程研究. 岩石学报,23(1):113~116.

吕修祥,金之钧,周新源,皮学军.2000. 塔里木盆地库车坳陷与膏盐岩相关的油气聚集. 石油勘探与开发,27(4):20~21. 汤良杰,贾承造,皮学军,陈书平,王子煌,谢会文.2003. 库车前陆褶皱带盐相关构造样式. 中国科学(D 辑),33(1):38~46.

徐士林,吕修祥,杨明慧. 2004. 库车坳陷膏盐岩对异常高压保存的控制作用. 西安石油大学学报,19(4):5~9.

杨吉根.1994. 我国东南四省五个盐岩矿床岩盐中流体包裹体的初步研究. 盐湖研究,(3):1~9.

张世奇,纪友亮.1997. 东营凹陷早第三纪古气候变化对层序发育的控制. 石油大学学报(自然科学版)22(6):26~30.

赵艳军,陈红汉.2008. 油包裹体荧光颜色及其成熟度关系. 地球科学,33(1):91~96.

周兴熙. 2004. 库车油气系统油气相态分布及其控制因素. 天然气地球科学,15(3):205~213.

朱光有,金强,戴金星,张水昌,郭长春,张林晔,李 剑.2004. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究. 石油与天然气地质,25(2):209~215.

Bukowskia K, Galamayb A R, Góralskia M. 2000. Inclusion brine chemistry of the Badenian salt from Wieliczka. Journal of Geochemical Exploration, 69~70: 87~90.

Carter N L, Handin J, Russell J E, Horseman S T. 1993. Rheology of rock salt. Journal of Structural Geology, 15: 1257~1271.

Davison I, Alsop I, Birch P, Elders C, Evans N, Nicholson H, Rorison P, Wade D, Woodward J, Young M. 2000. Geometry and late-stage structural of Central Graben salt diapirs, North Sea. Marine and Petroleum Geology, 17: 499~522.

Jackson M P A, Talbot C J. 1986. External shapes, strain rates and dynamics of salt structures. AAPG Bulletin, 97(3): 305~323.

Jacques P, Maurice P, Frédéric W, Odile B. 1995a. Organic inclusions in salt. Part 2: oil, gas and ammonium in inclusions from the Gabon margin. Organic Geochemistry, 23(8): 739~750.

Jacques P, Maurice Pl, Marie-Hélène L, Michel M. 1995b. Organic inclusions in salt, part I: solid and liquid organic matter, carbon dioxide and nitrogen species in fluid inclusions from the Bresse basin (France). Organic Geochemistry, 23: 391~402.

Jackson M P A. 1995. Retrospective salt tectonics. AAPG Memoir, 65: 1~28.

James J, Zambito I V and Kathleen C B. 2013. Extremely high temperatures and paleoclimate trends recorded in Permian ephemeral lake halite. Geology, 41(5): 587~590.

Lowenstein T K, Li J R, Brown C, Roberts S M, Ku T L, Luo S D, Yang W B. 1999. 200 k. y. paleoclimate record from Death Valley salt core. Geology, 27(1): 3~6.

Meng F, Ni P, Schiffbauer J D, Yuan X, Zhou C, Wang Y, and Xia M. 2011. Ediacaran seawater temperature: evidence from inclusions of Sinian halite. Precambrian Research, 184: 63~69.

Popp T, Kern H, and Schulze O. 2001. Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation. Journal of Geophysical Research, 106, 4061~4078.

Roberts S M, Spencer R J. 1995. Paleotemperatures preserved in fluid inclusions in halite. Geochimica and Cosmochimica Acta, 59: 3929~3942.

Roedder E. 1984. The fluids in salt. American Mineralogist, 69: 413~439.

Schenk O, Urai J L. 2005. The migration of fluid-filled grain boundaries in recrystallizing synthetic bischofite: First results of in-situ high-pressure, high-temperature deformation experiments in transmitted light. Journal of Metamorphic Geology, 23: 695~709.

Schenk O, Urai J L, Piazzolo S. 2006. Structure of grain boundaries in wet, synthetic polycrystalline, statically recrystallizing halite – Evidence from cryo-SEM observations. Geofluids, 6: 93~104.

Schoenherr J, Urai J L, Kukla P A, Littke R, Schlöder Z, Larroque J M, Newall M J, Nadia A A, Hisham A S, Rawahi Z. 2007. Limits to the sealing capacity of rock salt: A case study of the infra-Cambrian Ara Salt from the South Oman salt basin. AAPG Bulletin, 91: 1541~1557.

Sternner S M, Hall D L, Bodnar R J. 1988. Synthetic fluid inclusions V: solubility relations in the system NaCl—KCl—H₂O under vapor-saturated conditions. Geochimica and Cosmochimica Acta, 52: 989~1006.

Svetlana G, Jacques P, Mikhail M, Sergey G, Anatoly P, German F D F, Alain G. 1998. Organic inclusions in salt, part 3: oil and gas inclusions in Cambrian evaporite deposit from East Siberia, a contribution to the understanding of nitrogen generation in evaporates. Organic Geochemistry, 28: 297~310.

Trusheim F. 1960. Mechanism of salt migration in northern Germany. AAPG Bulletin, 44: 1519~1540.

Talbot C J, Jarvis R J. 1984. Age, budget and dynamics of an active salt extrusion in Iran. Journal Structure Geology, 6(5): 521~533.

Urai J L, Spiers C J, Zwart H J, Lister G S. 1986. Weakening of rock salt by water during long term creep. Nature, 324: 554~557.

Urai J L, Spiers C J, Peach C J, Franssen R C, Liezenberg J L. 1987. Deformation mechanisms operating in naturally deformed halite rocks as deduced from microstructural investigations. Geologie en Mijnbouw, 66: 165~176.

Hydrocarbon Inclusions in Salt Rock of Dongying Sag, Jiyang Depression, and Their Geological Implications

CHEN Yong¹⁾, ZHOU Zhenzhu²⁾, GAO Yongjin³⁾, WANG Xintao¹⁾, GAO Ting¹⁾, CHEN Zhonghong¹⁾

1) School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266580;

2) College of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266590;

3) Geological Research Institute, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong, 257000

Abstract: This paper reports that hydrocarbon inclusions were found in halite of salt rocks from the Dongying sag, Jiyang depression, east of China. Hydrocarbon inclusions in halite indicate that the sealing capacity of salt rocks may be lost under special condition, oil and gas can migrate though them. The micro-thermometry shows that the homogenization temperatures of aqueous inclusions in halite are not reliable because the volume of inclusions will change during heating. The change of volume was caused by two aspects factors, including difference between trapping pressure and pressure in lab, solubility of halite increasing with temperature. But the hydrocarbon inclusions can avoid the effect of solution dissolution, their homogenization temperatures are more reliable comparing to aqueous inclusions. Based on analysis of hydrocarbon inclusions in halite, we speculate that two activities active stages of hydrocarbon fluid related to deformation of salt rock appeared in Dongying depressionsag. The first stage was Dongying period, and the second one was Minghuzhen period, which were similar to stages of oil accumulation in Dongying depression. Fluids play an important role in salt grains moving and deformation of salt rocks. Recrystallization and fluid inclusions in halite are direct evidences for fluids activities. There are some key problems should be understood including where the fluids in halite came from and went, stages of fluids activities, the temperature and pressure of deformation under fluids adding. The answers of these questions are helpful to know how the salt rocks control migration and accumulation of oil and gas in hydrocarbon-bearing basins.

Key words: salt rock; hydrocarbon inclusions; Dongying sag Jiyang depression; fluids process; sealing capacity