

文章编号:0253-9985(2006)01-0027-06

鄂尔多斯盆地上古生界储层流体包裹体特征 及其地质意义

冯 乔¹, 马硕鹏², 樊爱萍³(1. 山东科技大学 地球信息与工程学院, 山东 青岛 266510; 2. 中国石油 勘探开发研究院
廊坊分院, 河北 廊坊 065007; 3. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要:鄂尔多斯盆地上古生界储层流体包裹体按成因可以分为继承性(非成岩)和非继承性(成岩)包裹体两类。后者又可根据流体成分分为盐水包裹体、CO₂包裹体和烃类包裹体3亚类,每类均具有特定的地质意义。储层中发育两种颜色不同的荧光。流体包裹体中的液态烃类发蓝色、蓝灰色荧光;胶结物中的烃类发浅黄色、黄绿色荧光。前者代表了充注时的石油特征;后者为石油被破坏后的结果。液态烃类包裹体的PVT模拟计算表明,石油是在相对较高的温度(120℃)和较高的流体压力(38.49 MPa)环境下充注的,至现今储层温度、压力均发生了显著下降,从而导致储层油气性质发生了明显改变。

关键词:流体包裹体类型;荧光特征;烃类充注;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE112.2

文献标识码:A

Characteristics of fluid inclusions in Upper Paleozoic reservoirs in Ordos basin and their geological significance

Feng Qiao¹, Ma Shuopeng², Fan Aiping³(1. Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266510, China; 2. Langfang Branch of
Petroleum Exploration & Development Research Institute, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China;
3. Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

Abstract: Fluid inclusions in the Upper Paleozoic reservoirs in Ordos basin can be classified into 2 types, namely inherited (non-diagenetic) and non-inherited (diagenetic) inclusions, according to their genesis. Based on fluid composition, the latter can be further divided into 3 sub-types, including brine inclusion, CO₂ inclusion and hydrocarbon inclusion. Each inclusion type or sub-type has its own specific geological significance. The reservoirs show two kinds of fluorescence colors. The liquid hydrocarbons in the fluid inclusions show blue and bluish grey fluorescence colors, while the hydrocarbons in the cements show pale yellow and yellowish green fluorescence colors. The former represents the oil feature while it was charged, while the latter represents the results of oil destruction. PVT modeling of liquid hydrocarbon inclusions shows that hydrocarbons would have been charged at relatively high temperature (120℃) and relatively high fluid pressure (38.49 MPa), which are remarkably higher than the present temperature and pressure in the reservoirs, thus the hydrocarbon properties in the reservoirs have evidently been changed.

Key words: type of fluid inclusion; fluorescent characteristic; hydrocarbon charging; Ordos basin

流体包裹体是指矿物晶体中捕获的显微级液态/气态封闭流体体系,是成岩成矿流体的天然样品。因此流体包裹体为人们了解油气藏中的物理

化学条件提供了宝贵资料。矿物包裹体的研究在国外开展较早。19世纪70年代末至80年代初,一些远见卓识的岩石学家和石油地质学家开始将

收稿日期:2005-10-16

第一作者简介:冯乔(1963—),男,教授,油气地质与油气成藏

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB214603)

流体包裹体研究方法引入石油地质勘探领域,取得了显著成效^[1]。近年来,流体包裹体已广泛应用于追踪盆地流体的运聚^[2]。流体包裹体作为地下岩石中古代流体信息的载体和一个相对封闭的地球化学体系,保留了地下流体的许多重要信息,如温度、压力、成分、介质环境等,在盆地热演化、

大的局限性^[13]。其原因如下:1)按其定义,原生包裹体主要形成于成岩作用的早期阶段,次生包裹体对应于成岩作用的晚期阶段或成岩改造阶段,是连续成岩过程不同阶段的产物,而不是两个性质不同的类型;2)沉积岩是由蚀源区的母岩经风化、搬运而来的岩石,必然有一部分包裹体是从母岩区带来

的沉积盆地中的流体包裹体,不同的学者依据其观察角度和分类原则的不同,分出了不同的包裹体类型。目前,最常见的划分类型有包裹体成因分类、包裹体中流体成分分类和宿主矿物成分分类等。

成因分类是按同一矿物中包裹体形成先后及其与母液的成因联系而划分的。Roedder^[11]认为成因分类是应用包裹体解释地质过程时最基本和最重要的步骤。根据包裹体与宿主矿物的关系分为原生、次生和假次生包裹体3类。主矿物结晶生长期间捕获保存的流体包裹体称为原生包裹体。次生包裹体是在主矿物生长沉淀以后,因构造或地应力产生裂隙、或由油气(特别是羧酸)溶解矿物形成空隙以及矿物共轴增生或晶体间断生长捕获流体而形成的。

谢奕汉^[12]等根据室温下包裹体的成分和相态,将与成岩作用有关的流体包裹体划分为3类,即溶液包裹体、CO₂包裹体和烃类包裹体。

在包裹体的研究过程中,要准确判断包裹体的成因类型和包裹体中流体的成分是非常困难的,因此有时候也按包裹体宿主矿物来进行分类,如石英包裹体、长石包裹体、方解石包裹体、填隙物包裹体等。

上述分类方案各有优劣,但很难将沉积盆地中所有的流体包裹体涵盖其中。尤其是经常使用的原生、次生、假次生包裹体的成因分类方案,存在较

4 流体包裹体的分类讨论

流体包裹体的形成过程表明,沉积盆地中的流体包裹体可以分成继承性和非继承性两大类。继承性包裹体是指沉积碎屑矿物中从蚀源区携带来的包裹体,也称为非成岩包裹体。非继承性包裹体是在盆地埋藏成岩过程中形成的,也称为成岩包裹体。非继承性包裹体可根据流体成分进一步细分为盐水包裹体、CO₂包裹体和烃类包裹体等。

鉴别继承性与非继承性包裹体非常重要,因为前者不能代表沉积盆地的成矿、成藏信息,只有后者才是沉积盆地中油气生成、运移、聚集、成藏,以及流体动力等信息的载体,是进一步开展研究工作的主要对象。

2.1 继承性包裹体

继承性包裹体对于沉积盆地研究没有意义,需鉴别出来,以防与非继承性包裹体混淆。继承性包裹体在镜下整体呈现出个体较大、体壁较厚、散乱分布在石英颗粒中的特点,其均一温度很高,一般大于200℃,也有一部分不混溶。

鄂尔多斯盆地上古生界储层中的继承性包裹体分为两种。第一种个体大,一般大于10 μm,形状多为次棱角状,气相部分为黑色,液相部分则为浅灰色,气泡并不来回移动,孤立状产出(图1a)。

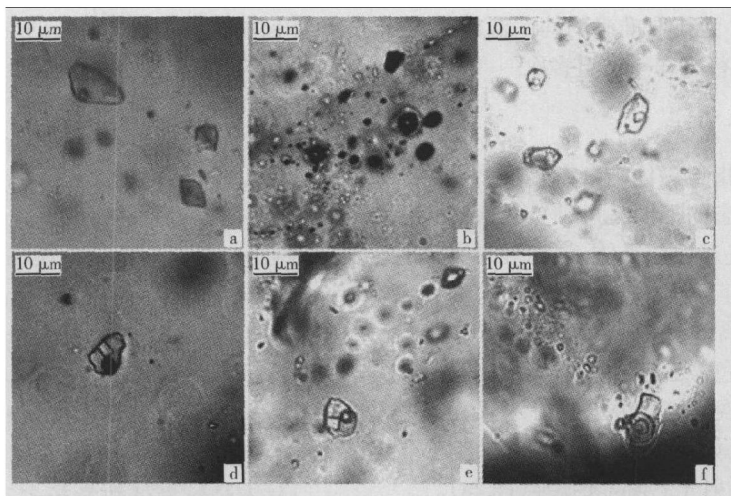


图1 鄂尔多斯盆地上古生界储层不同类型包裹体

Fig. 1 Various types of fluid inclusions in the Upper Paleozoic reservoirs in Ordos basin

(透射光照片,放大倍数 10×63)

- a. 继承性包裹体,陕199井,下石盒子组;b. 继承性包裹体,米4井,山西组;
c. 含石盐子晶的两相盐水包裹体,神18井,下石盒子组;d. 含石盐子晶的三相盐水包裹体,胜1井;
e. 含石盐子晶的三相盐水包裹体,盟5井,山西组;f. CO_2 包裹体,盟5井,山西组

第二种为具有成因矿物标型意义的流体包裹体,如米4井山西组石英颗粒中的流体包裹体(图1b),个体也较大,一般为 $10 \sim 30 \mu\text{m}$,呈混圆形或寄主矿物的负晶形,由玻璃质和气泡组成,玻璃质无色透明或呈淡黄色,气泡多为黑色。此类包裹体为硅酸岩熔浆从地下深处侵入至近地表时在快速冷凝过程形成,它主要分布在火山岩、次火山岩的斑晶矿物中,代表了火山岩的标型特征^[14]。

2.2 非继承性包裹体

非继承性包裹体常成群成带分布在石英加大边和裂隙中,有时也以面状产出,具定向排列特点;即使是面状分布,也是朝着一个方向生长。这可能与主矿物的结晶习性有关^[1],也可能是由流体流动的方向性造成的,或是包裹体形成后的变化所致^[15]。

根据室温下包裹体的相态(固、液、气)和成分等特征,鄂尔多斯盆地上古生界储层中的非继承性包裹体还可以进一步细分。

2.2.1 盐水包裹体

盐水包裹体较丰富,个体不大, $2 \sim 5 \mu\text{m}$,个别大于 $7 \mu\text{m}$;形态各异,颜色较浅,在石英裂隙和加大边中均有发育,也有少量串珠状排列或沿面状分布。根据包裹体中流体的相态可以识别出纯液相、

气液两相和含石盐子晶盐水包裹体(图1c,d,e)。

纯液相盐水包裹体个体小, $2 \mu\text{m}$ 左右;轮廓清晰,多呈负晶形;在镜下无色透明,或带淡黄色,与主矿物的折射率相差较大,一般沿石英边部产出。气液两相盐水包裹体主要由液相和气相组成,数量较多,大小不等;由于比重和表面张力的关系,气相常呈球形或椭圆形悬浮在液相中;当气/液比较小时,气相变成气泡可来回不停地跳动。

2.2.2 CO_2 包裹体

CO_2 包裹体主要呈三相产出,由 CO_2 气体、液态 CO_2 和盐水溶液组成(图1f)。包裹体体积较大,主要分布在石英加大边,约占包裹体总量的5%。在 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系中,包裹体中的 CO_2 在临界温度(31.1°C)下可分别呈液相和气相,呈现出一种“气泡”中有气泡的现象。由于三者的折射率(n)差别较大(H_2O 为 $1.32 \sim 1.33$, 液态 CO_2 为 1.12 , 气态 CO_2 为 1.00),它们之间的相界粗黑。液相 CO_2 较气相 CO_2 颜色浅,这是因为气相 CO_2 折射率很小,使 CO_2 气泡呈黑色。在达到 31.1°C 之前,液相 CO_2 转变为气相 CO_2 ;反之,包裹体由三相变为两相。

实际工作中,可根据颜色和均一温度鉴别。透射光下, CO_2 气泡呈紫色,液相 CO_2 呈淡紫色。在热台上对 CO_2 包裹体加温, 31°C 左右 CO_2 气泡

消失,均一为液相。为获取准确的均一温度值,可在31℃左右重复进行冷却—加温多次。

2.2.3 烃类包裹体

烃类包裹体是指包裹体内含有烃类物质。根据其烃类成分和相态的不同又可细分为液态烃包裹体、含液态烃的气态烃包裹体、气态烃包裹体和含气态烃包裹体等。

液态烃包裹体形态不规则,一般小于10 μm;透射光下以无色、淡褐色为主,荧光照射下发淡蓝色(图2b)。该类包裹体仅见于盟5井山西组,主要分布在石英颗粒加大边中。如图2区域I所示,包裹体成群发育,形态不规则,透射光下轮廓不明显(图2a)。

含液态烃的气态烃包裹体直径从2~30 μm不等,形态各异,气液比为60%~90%,两相界线较明显(图2),液相颜色无色或淡褐色,气相则为淡褐色或褐色;主要沿石英颗粒边部产出。鉴别

这类包裹体通常是观察它的均一化过程和荧光颜色。在荧光灯下照射时,包裹体的气相部分不发光,液相部分发蓝色荧光(图2b),说明液相部分为液态烃。将包裹体放在热台上加热,随温度升高,包裹体气相部分逐渐增大,液相部分减少至消失,最后均一为气相,说明包裹体中的液态烃在高温时为气态烃,因此包裹体中的液相部分为凝析油,气相部分为湿气。

含气态的液态烃包裹体主要见于盟5、神6、神7和神18井。这些井主要分布在盆地的东北部。尤其是盟5井,含液态烃包裹体数量较多,表明盆地东北部在地质历史时期曾有较多的液态烃类生成。

气态烃包裹体数量较多,在透射光下呈单一相,主要为圆球状(与最低表面能有关),以褐色、深褐色为主,包裹体中心为一亮点,主要分布在微裂隙和石英加大边中。

含气态烃盐水包裹体数量很多,2~20 μm;气液比约为10%~15%,气相特点与气态烃包裹体相似,主要呈圆球状与液相共存,液相部分颜色较浅,无色透明或淡黄色,在石英加大边、石英颗粒的愈合裂缝中均有产出。

3 烃类包裹体的地质意义

3.1 不同烃类的荧光特征

鄂尔多斯盆地上古生界储层中发育两类特征完全不同的荧光。第一类围绕石英颗粒外缘加大边发育,呈串珠状环带分布,发蓝色、蓝灰色荧光,是包裹体中所含液态烃的反映;第二类在石英颗粒之间的胶结物中分布,呈云雾状,浅黄色、浅黄绿色荧光,为胶结物中烃类的反映(图3)。从两

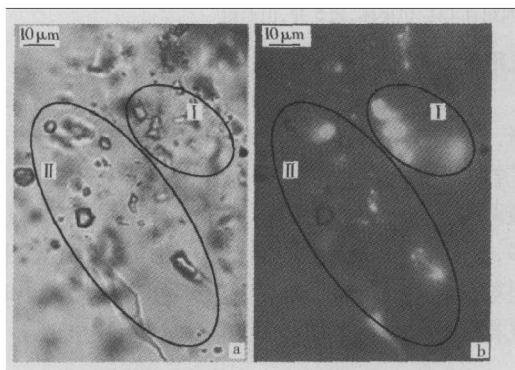


图2 盟5井山西组不同烃类包裹体形态及荧光特征

Fig. 2 Shapes and fluorescent characteristics of hydrocarbon inclusions in Shanxi Fm encountered in Meng 5 well

a. 透射光; b. 荧光

I. 液态烃包裹体; II. 含液态烃的气态烃包裹体

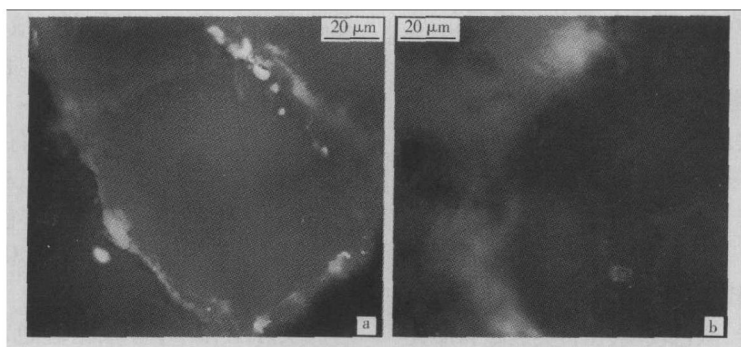


图3 盟5井山西组储层中不同烃类的荧光特征

Fig. 3 Fluorescent characteristics of hydrocarbons in Shanxi Fm reservoirs in Meng 5 well

a. 包裹体中的液态烃; b. 胶结物中的烃类

类荧光在石英颗粒周围的分布来看,第一类烃类充注早,第二类充注晚,其间被快速生长的石英加大边分隔。

由于荧光的产生主要取决于石油烃中的共轭 π 键体系和 $C=O$ 官能团,其强度决定于芳香族化合物的浓度及经受的温度。随着有机质从低成熟向高成熟演化,荧光颜色由浅黄(亮黄)色—褐黄色(黄绿色)—棕色—暗蓝色—蓝灰色—无荧光。由此看来,本地区流体包裹体中的烃类比胶结物中的烃类不仅芳香族化合物浓度高,而且成熟度也较高。显然,这一认识与烃类的产状(围绕石英颗粒分布)相矛盾。因此胶结物中烃类的荧光除了与成熟度有关外,可能还受其他因素的影响。

Hagemann 和 Hollerbach^[16]认为生物降解作用对原油的荧光性质有较大影响。在分别对生物降解原油和低成熟度原油进行研究后发现,生物降解原油的荧光光谱红移的程度更大。这是因为生物降解作用降低了脂肪族化合物与芳香族化合物的比率,增加了极性分子的比率,从而影响石油的成分,改变了石油的荧光特征。由此可以推测,因燕山运动的影响,在盆地东北部强烈抬升、剥蚀期间,胶结物中的烃类发生了较明显的降解,芳香烃化合物有较多损失,包裹体中的烃类因封闭好而被保存下来,因此其中烃类的荧光强度大,能客观反映储层烃类的充注,而胶结物中的烃类因降解致使荧光颜色发生较大改变。

3.2 烃类充注的流体环境

在冷-热台上,将烃类包裹体降温至 -120°C 时,气泡不再缩小;然后回温至 -40°C ,气液比开始增大,升到 79.4°C ,液相气化,形成一个均一气相的包裹体。与烃类包裹体共生的盐水包裹体均一温度大约在 120°C 左右,两者相比差约 40°C 。其可能的原因有:1)沉积盆地中,石油总是与地下水共存。即使在高度饱和石油的储层中,层间水也不能被完全替换,因此需要考虑水-烃相互作用。由于石油中水的溶解度非常低,且水对石油极性成分的影响很小,因而可以忽略水在石油中的溶解度^[17]。但是水中烃类的溶解度不能被忽略。甲烷和低分子芳香族化合物在水中的溶解度很大,且甲烷与水在化学性质上有很大差异,溶解的甲

烷因此可改变水的PVT特性。如果水、烃不混溶,共生的烃类包裹体和盐水包裹体则有不同的均一温度。Aplin^[18]等人对北海盆地流体包裹体的研究也得出同样结论。2)烃类包裹体由于甲烷的存在容易散失氢离子,从而改变包裹体的成分,造成所测的均一温度同捕获时的均一温度不同。因此,利用流体包裹体均一温度作分析研究时,通常采用的都是盐水包裹体。

应用PVTsim软件模拟计算了与烃类包裹体具有相同层位的盐水包裹体的捕获压力^①。盟5井流体包裹体样品深度为1890 m,均一温度介于 $119.5 \sim 123.1^{\circ}\text{C}$ 之间,模拟计算的捕获压力介于 $35.83 \sim 43.26 \text{ MPa}$ 之间,平均均一温度为 121.0°C ,平均捕获压力为 38.49 MPa 。由于盟5井无实测地层压力,而盆地东部10口井山西组实测地层静压力梯度为 $8 \sim 10 \text{ MPa/km}$,平均为 9.2 MPa/km ,由此计算的盟5井1890 m的现今地层压力为 $15.12 \sim 18.90 \text{ MPa}$,平均为 17.39 MPa 。因此,在石油充注期间,孔隙中具有极高的流体压力,在燕山运动之后,流体压力逐渐降低,至今累计下降了55%;同时孔隙中的烃类也逐渐散失,从而残留下发浅黄色荧光的烃类。

4 结论

鄂尔多斯盆地上古生界储层中发育丰富的流体包裹体,根据其成因可以分成继承性(非成岩)包裹体和非继承性(成岩)包裹体。后者又可以根据流体成分进一步分出盐水包裹体、 CO_2 包裹体和烃类包裹体3亚类。每一类包裹体均具有特定的地质意义。

储层中的液态烃发两种颜色明显不同的荧光。流体包裹体中的液态烃类发蓝色、蓝灰色荧光;胶结物中的烃类发浅黄色、黄绿色荧光。前者代表了充注时的石油特征;后者为石油被破坏后的结果。液态烃类包裹体的PVT模拟计算表明,石油是在相对较高的温度(120°C)和较高的流体压力(38.49 MPa)环境下充注进入储层的,至现今,储层压力下降了55%,储层中的油气性质发生了明显改变。

①耿安松,冯乔,熊永强,等.川陕气源与储层地球化学研究(十五攻关报告).中科院广州地球化学研究所,2002

参 考 文 献

- 王汝成, 翟建平, 陈培荣, 等. 地球科学现代测试技术[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999. 79~123
Wang Rucheng, Zhai Jianping, Chen Peirong, et al. Modern experimental technology in earth science[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999. 79~123
- 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 Dehan. Fluid inclusion studies—an effective means for basin fluid investigation[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(3~4): 149~154
- 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
- 肖贤明, 刘祖发, 刘德汉, 等. 应用储层流体包裹体信息研究天然气气藏的成藏时间[J]. 科学通报, 2002, 47(12): 957~960
Xiao Xianming, Liu Zhufa, Liu Dehan, et al. Applications of fluid inclusions in the reservoir to the studies of gas pool forming time[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(12): 957~960
- 陈振岩, 吴文柱. 辽河盆地东部凹陷模式成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 32~35
Chen Zhenyan, Wu Wenzhu. Episodic reservoiring features of eastern sag in Liaohé basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 32~35
- Nedkvite T, Karlsen D A, Bjørlykke K, et al. Relationship between diagenetic evolution and petroleum emplacement in the Ula Field, North Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10: 225~270
- Parnell J, Middleton D, Chen H H, et al. The use of integrated fluid inclusion studies in constraining oil charge history and reservoir compartmentation: example from the Jeanne d'Arc basin, offshore Newfoundland[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18: 535~549
- Aplin A C, Larter S R, Bigge M A, et al. Confocal microscopy of fluid inclusions reveals fluid-pressure histories of sediments and an unexpected origin of gas condensate[J]. Geology, 2000, 28: 1 047~1 050
- 米敬奎, 肖贤明, 刘德汉, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界储层中包裹体最小捕获压力的 PVTsim 模拟[J]. 地球化学, 2002, 1(4): 402~406
Mi Jingkui, Xiao Xianming, Liu Dehan, et al. Simulation for minimum trapping pressure of inclusions occurring in Upper Paleozoic sand reservoir of Ordos basin using PVTsim[J]. Geochemistry, 2002, 1(4): 402~406
- 李贤庆, 胡国艺, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系碳酸盐岩储层流体包裹体特征及对天然气成藏的意义[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(2): 120~124
Li Xianqing, Hu Guoyi, Li Jian, et al. The characteristics of fluid inclusion and its pool-forming significance of natural gas from Ordovician carbonate reservoirs in central Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(2): 120~124
- Roedder E. Fluid inclusions[A]. In: Ribbe P, ed. Reviews in mineralogy 12[C]. Washington, D C: Mineralogical Society of America, 1984.
- 谢奕汉, 范宏瑞, 王英兰. 流体包裹体与盆地油气的生成和演化[J]. 地质科技情报, 1998, 17(增刊): 100~104
Xie Yihan, Fan Hongrui, Wang Yinglan. Fluid inclusion and their relation to the formation and evolution of oil-gas in a basin[J]. Geological Science and Technology Information, 1998, 17(S0): 100~104
- 陶世振. 包裹体应用于油气地质研究的前提条件和关键[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 77~91
Tao Shizhen. Premise conditions and key problems of applied study of inclusion in oil-gas geology[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 77~91
- 谢奕汉, 范宏瑞. 矿物包裹体的成因矿物学标型意义[J]. 现代地质, 2001, 15(2): 202~205
Xie Yihan, Fan Hongrui. Mineralogy typomorphic characteristic of fluid inclusions[J]. Geoscience, 2001, 15(2): 202~205
- Goldstein R H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems[J]. Lithos, 2001, 55: 159~193
- Hagemann H W, Hollerbach A. The fluorescence behaviour of crude oils with respect to their thermal maturation and degradation[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10: 473~480
- Munz I A. Petroleum inclusions in sedimentary basins: systematics, analytical methods and applications[J]. Lithos, 2001, 55: 195~212
- Aplin A C, Larter S R, Bigge M A, et al. PVTX history of the North Sea's Judy oilfield[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69~70: 641~644

(编辑 李 军)