

# 含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义

刘德汉,肖贤明,田辉,卢家烂,闵育顺

(中国科学院广州地球化学研究所“有机地球化学”国家重点实验室,广东广州510640)

**摘要:**根据流体包裹体的透光和荧光性特征,首先将包裹体划分为烃包裹体、含烃包裹体和无荧光的盐水包裹体与非烃包裹体3大类。其次,再根据包裹体的组成和相态特征,将烃包裹体划分为以下9类:液态烃-气液烃包裹体、气态烃包裹体、含沥青包裹体、含烃盐水包裹体、含烃气体包裹体、液相盐水包裹体、两相盐水包裹体、非烃气体包裹体和含子矿物的盐水包裹体。液态烃-气液烃包裹体类进一步划分为以下4个亚类:重质油包裹体、中质油包裹体、轻质油包裹体和凝析油包裹体。论文还重点探讨了烃包裹体在烃源岩、储集岩和输导岩中的分布规律及各类流体包裹体在油气生成、运移和成藏演化中的地质应用。

**关键词:**烃类包裹体;盐水包裹体; $\text{CO}_2$ 包裹体;含油气盆地

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## Fluid inclusion types and their geological significance in petroliferous basins

Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, Lu Jialan, Min Yushun

(SKLOG, Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** This paper presents a systematic nomenclature and taxonomy for fluid inclusions. Three groups of inclusions, namely the hydrocarbon inclusions, hydrocarbon-containing inclusions, and aqueous/non-hydrocarbon inclusions, have been recognized based on microscopic fluorescence and transmitted light properties of inclusions. The hydrocarbon inclusions can be further divided into nine types based on their composition and phase characteristics: liquid hydrocarbon-liquid-gaseous hydrocarbon inclusions, gaseous hydrocarbon inclusions, bitumen-containing inclusions, hydrocarbon-bearing aqueous inclusions, hydrocarbon-bearing gaseous inclusions, liquid phase aqueous inclusions, two-phase aqueous inclusions, non-hydrocarbon gaseous inclusions, and child-mineral-bearing aqueous inclusions. The liquid hydrocarbon-liquid-gaseous hydrocarbon inclusions can also be divided into four subclasses: heavy-oil inclusions, medium-oil inclusions, light-oil inclusions, and condensed oil inclusions. In addition, the paper also focuses on the distribution patterns of hydrocarbon inclusion in reservoirs, source rocks, and carrier beds, and the geological application of these fluid inclusions to the generation, migration, accumulation, and evolution of hydrocarbon.

**Key words:** hydrocarbon inclusion; aqueous inclusion;  $\text{CO}_2$ -inclusion; petroliferous basin

沉积物在沉积、成岩演化阶段产生的新生矿物,或矿物重结晶与次生裂隙愈合面中,不仅可以捕获提供矿物生长的成岩、成矿的流体,形成广泛分布的盐水包裹体,而且还可能捕获盆地在油气生成、运移、聚集和成藏演化过程中产出的烃类流体,形成多种类型的烃类包裹体和含烃包裹体,成

为记录盆地成烃、成藏过程的原始样品。研究当前地层中流体包裹体的类型和产出特征,是再造盆地的热历史和了解古流体性质、追踪盆地含烃流体活动信息的重要依据。油气盆地中流体包裹体类型的划分是进行流体包裹体观测研究的基础。划分原则一方面是考虑包裹体的组成和成

收稿日期:2008-06-10。

第一作者简介:刘德汉(1935—),男,研究员,地球化学、有机岩石学、油气包裹体。

基金项目:中国科学院重点方向项目(KZCX2-YW-114);国家杰出青年基金项目(40625011)。

因,另一方面是考虑流体包裹体的捕获条件与它们在地层中的产出和分布形式。目前,有关书籍和文献中已有一些流体包裹体类型的划分方案和关于流体包裹体类型的描述<sup>[1-9]</sup>。但流体包裹体分类和术语尚不统一,往往影响包裹体资料的对比应用。为此,本文拟在前人已有分类工作的基础上,根据大量流体包裹体的观测实践,进一步探讨适用于油气盆地中流体包裹体类型的划分方案,探讨各类流体包裹体在地层中的分布规律及其在油气勘探、评价中的基本应用。

1 流体包裹体的类型划分

油气盆地中流体包裹体有多种产出形态和分布特征,组成性质也比较复杂。通常,流体包裹体类型的划分是以包裹体在偏光和荧光显微镜下的特征为基础<sup>[2,8,10]</sup>,可按组成性质划分为烃包裹体和非烃、含烃包裹体,也可按捕获条件划分为均

一体系和非均一体系捕获的包裹体,还可按包裹体形成世代划分为不同捕获期次的包裹体。其中,按捕获期次划分的包裹体,可能在某个形成期次中包含有不同组分或类型的流体包裹体。总之,一个盆地中包裹体产出类型的划分原则,是用以阐明流体包裹体的成因与赋存形式,是对大量流体包裹体实际观测结果的综合。

1.1 烃包裹体与非烃包裹体的划分方案

根据油气盆地中流体包裹体观测研究的主要目的,比较简单、适用的分类方法是:首先,根据包裹体的荧光性特征,把流体包裹体划分为有荧光-弱荧光的烃包裹体、弱荧光-无荧光的含烃包裹体及无荧光的盐水包裹体与非烃包裹体 3 大类;其次,再根据各大类包裹体在室温下的相态和组成特征,进一步划分为 9 个类;另外,对于油气盆地中比较重要的烃包裹体,还进一步根据其比重和性质划分了 6 个亚类(表 1)。

表 1 流体包裹体类型划分与产出分布特征  
Table 1 Classification and distribution of fluid inclusions

| 大类                | 类              | 亚类     | 显微透光特征     | 显微荧光特征    | 产出和分布                                                             |
|-------------------|----------------|--------|------------|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| 烃包裹体              | 液态烃和<br>气液烃包裹体 | 重质油包裹体 | 棕褐色        | 黄褐色荧光     | 捕获地层中低成熟油和降解油的包裹体                                                 |
|                   |                | 中质油包裹体 | 棕红色        | 亮黑色       | 主要为捕获地层中成熟油阶段的包裹体                                                 |
|                   |                | 轻质油包裹体 | 浅黄色        | 黄绿色荧光     | 捕获地层中高成熟油阶段的包裹体                                                   |
|                   |                | 凝析油包裹体 | 无色         | 浅蓝灰色荧光    | 捕获地层中凝析油-气藏阶段的包裹体                                                 |
|                   | 气态烃包裹体         |        | 灰黑色        | 无荧光或弱荧光   | 主要分布在气藏或油-气藏储层中                                                   |
|                   | 含沥青包裹体         |        | 黑色或灰黑色     | 无荧光       | 常产于高演化气藏或受分异作用的油气藏                                                |
| 含烃包裹体             | 含烃盐水包裹体        |        | 无色或浅黄褐色    | 弱荧光或浅黄色荧光 | 常为油-水非均一体系的不混溶包裹体                                                 |
|                   | 含烃气体包裹体        |        | 灰黑色        | 一般无荧光     | 含烃层段中含烃类气体和非烃气体的包裹体                                               |
| 盐水包裹体与<br>非烃气体包裹体 | 液相盐水包裹体        |        | 无色透明       | 无荧光       | 主要为地层中低温成因的包裹体                                                    |
|                   | 两相盐水包裹体        |        | 液相无色透明,见气泡 | 无荧光       | 地层中分布较广泛,常用于均一温度测定                                                |
|                   | 非烃气体包裹体        |        | 灰黑色        | 无荧光       | 含 CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, N <sub>2</sub> 等无机或有机成因的包裹体 |
|                   | 含子矿物的<br>盐水包裹体 |        | 液相无色,见固体矿物 | 无荧光       | 捕获于高盐度流体中的盐水包裹体                                                   |

## 1.2 流体包裹体捕获条件的划分方案

### 1.2.1 均一体系捕获的流体包裹体

据大量样品的观察资料,沉积盆地中广泛分布的矿物包裹体多数是由均一体系中捕获的盐水包裹体,形成后也很少明显变化,在常温下主要为两相或单相的流体包裹体,一般符合流体包裹体研究的3个基本条件:①均一体系;②封闭体系;③等容体系。因此,具有均一体系捕获特征的流体包裹体是观测研究的重点,测定的均一温度、冰点温度等是探讨盆地热演化史和地质流体组成性质及进行流体包裹体热动力学研究的基本参数。在同一包裹体组合中的均一温度和气液比等比较相似。因此,包裹体薄片观察中,鉴别观测的包裹体是否为未受后期形变的和具有均一体系特征的流体包裹体,十分重要。

### 1.2.2 非均一体系捕获的流体包裹体

非均一体系的流体包裹体有两种成因:一种是矿物捕获了地质体中存在的非均一相态的流体;另一种是矿物捕获的均一流体包裹体发生了后期变化(包括受热化学作用和机械作用等),形成后生非均一体系的包裹体。前者的成因是沉积盆地中除了广泛分布的组成、性质比较均一的成岩、成矿流体以外,也存在部分不混溶流体。例如:储层中的油-水不混溶体系,地层中的 $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ 不混溶体系,以及流体处于沸腾状态的非均一体系等。在相态和组分比较复杂的体系中,矿物结晶过程或矿物裂隙的愈合面可能捕获多种不混溶包裹体。在观察样品中寻找矿物捕获部分端元组分的流体包裹体,也可进行包裹体均一温度测定和热动力学研究。油气盆地中含烃流体的运移和充注往往在油、气、水等组分和相态比较复杂的不混溶体系中,形成若干不混溶包裹体。在包裹体的测温研究中,需选择不含水的端元组分的石油包裹体或与之共生的盐水包裹的均一温度,测定结果可以进一步用PVTsim等软件模拟计算石油包裹体捕获温度与捕获压力。但矿物包裹体发生热变质作用、泄漏、卡脖子等后期变化形成的包裹体,则完全不能用于流体包裹体测温。

## 1.3 流体包裹体形成期次的划分方案

沉积盆地在成岩演化的各地质历史阶段发育的新生矿物或矿物裂隙愈合面,可能捕获有不同形成阶段的流体包裹体。综合鉴别与划分不同世代的流体包裹体,是研究盆地热演化历史和剖析油气成藏期次的主要依据。流体包裹体形成期次的鉴别与划分,主要根据包裹体岩相学观察资料与包裹体均一温度和组成性质的观测资料相结合,区分矿物原生包裹体的形成阶段、流体包裹体矿物加大边的形成先后和流体包裹体矿物裂隙带的切割关系等,具体划分样品中第一期、第二期、第三期等捕获的流体包裹体。对于碎屑岩储层中的流体包裹体观测,首先要排除碎屑矿物中可能保存的部分继承性包裹体,确保实际观测研究的流体包裹体为沉积、成岩演化阶段中新生矿物或矿物次生裂隙愈合带捕获的流体包裹体,这样才能用以探讨油气盆地热演化历史和反映成岩、成烃、成藏演化的地球化学信息。

为了有效鉴别与说明以上各类烃包裹体和非烃包裹体的基本特征,本文挑选了部分有代表性的无荧光的含非烃的包裹体和各种有荧光的石油包裹体产出形态的显微透光和荧光照片(图1—图3)。

## 2 流体包裹体的产出和分布

流体包裹体在不同地层和矿物岩石中的产出和分布规律有所不同。通常,油气盆地中流体包裹体的观测研究重点主要是砂岩和碳酸盐岩储层。此外,若干富有机质的泥质烃源岩、碳酸盐源岩和含烃流体运移的输导岩,以及与火山岩有关的储集岩等也可能含不同类型的流体包裹体。研究它们的产出和分布特征,可提供油气生成、运移和勘探评价的很多信息<sup>[4,11,12]</sup>。

### 2.1 烃源岩中的流体包裹体

石油和天然气的烃源岩主要包括富有机质的泥质岩、细晶碳酸盐岩和煤系地层。由于烃源岩中一般矿物颗粒十分细小,流体包裹体观测的难度大。用高倍荧光显微镜精细观察,在一些富有机质的泥晶碳酸盐岩和砂质泥岩中也发现富含细小的石油包裹体和微石油包裹体群<sup>[4,13]</sup>。

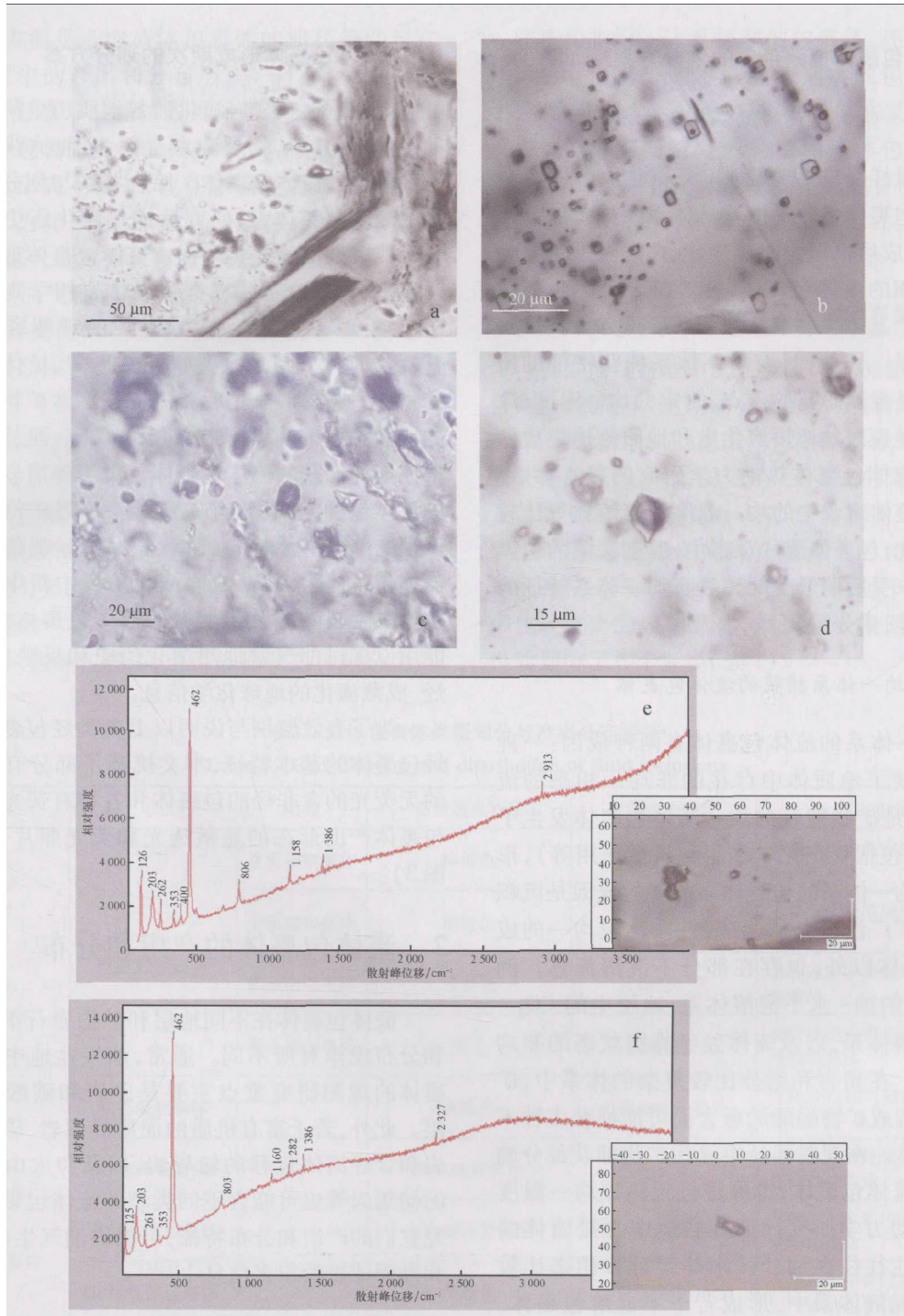


图1 无荧光的盐水包裹体的特征和气体包裹体的显微激光拉曼光谱

Fig. 1 Characteristics of aqueous fluid inclusion without fluorescences and

Raman microspectrometers of gas inclusion

- a. 自生石英及不同生长环带中的盐水包裹体和气体包裹体; b. 方解石矿物中的同期盐水包裹体组合, 气液比和均一温度相似;  
c. 石英中的含烃 CO<sub>2</sub> 包裹体和盐水包裹体; d. 石英中的三相 CO<sub>2</sub> 包裹体; e. 石英中含烃 CO<sub>2</sub> 包裹体的激光拉曼光谱;  
f. 石英中的含氮 CO<sub>2</sub> 包裹体的激光拉曼光谱

(图 1e, f 中 2 913 cm<sup>-1</sup> 为 CH<sub>4</sub>, 1 386 和 1 282 cm<sup>-1</sup> 为 CO<sub>2</sub>, 2 327 cm<sup>-1</sup> 为 N<sub>2</sub>, 462 cm<sup>-1</sup> 为主宿矿物石英的特征峰。)

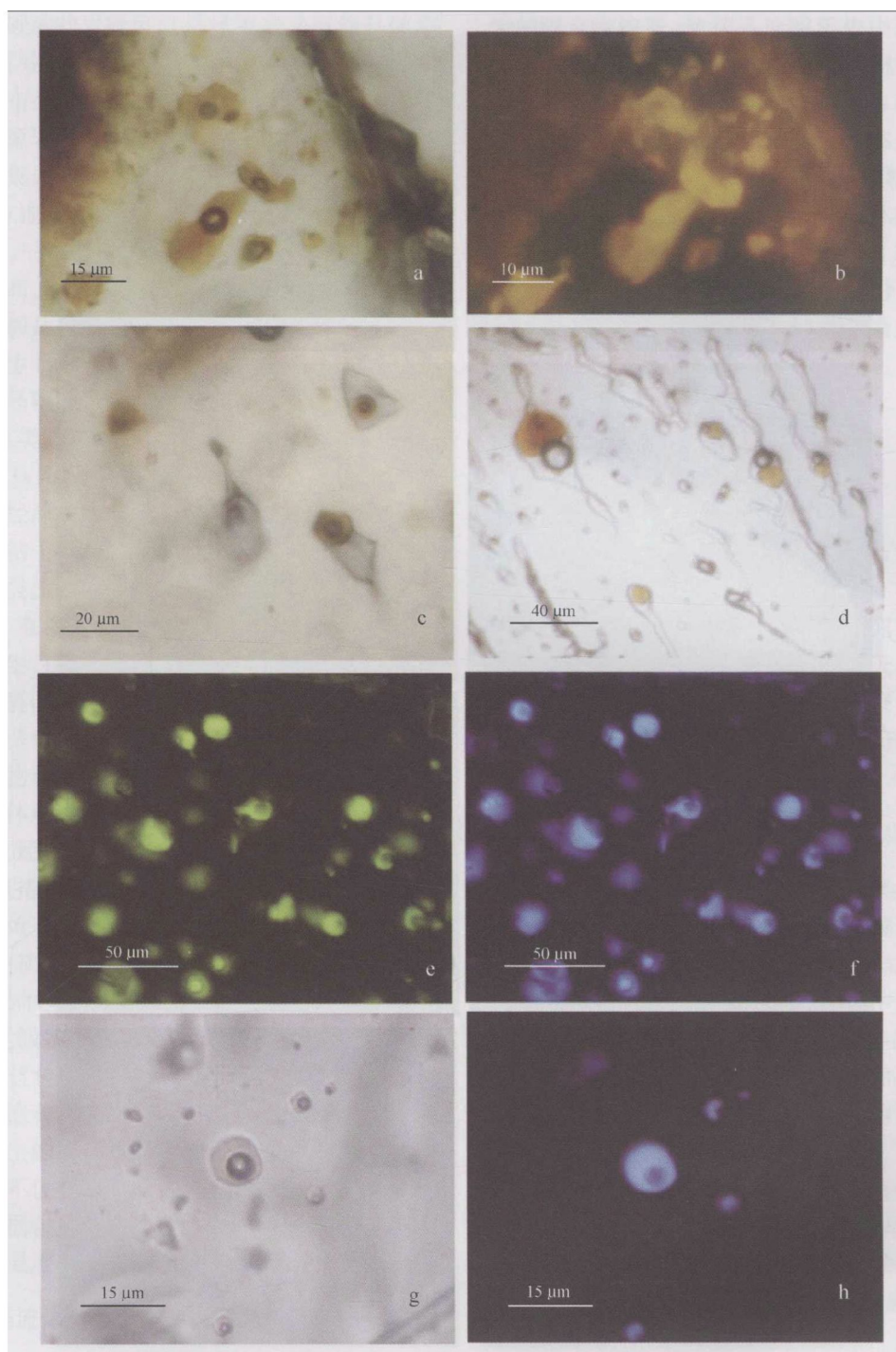


图2 若干天然储层与人工合成石油包裹体的透光和荧光特征

Fig. 2 Photographs of natural and synthesized oil inclusions under fluorescence and transmitted lights  
a, b. 分别为不含水的一般石油包裹体的透射光和荧光显微照片(a透射光为黄色, b为蓝光激发-亮黄色荧光);  
c, d. 分别为天然碳酸盐岩储层中含水石油包裹体与方解石中人工合成含水石油包裹体的透射光照片(c透射光为黄褐色, d透射光为黄色);  
e, f. 方解石中人工合成石油包裹体的荧光显微照片(e为蓝光激发-黄绿色荧光, f为紫外光激发-天蓝色荧光);  
g, h. 方解石中人工合成轻质油包裹体的透射光和荧光显微照片(g透射光为浅黄色, h为紫外光激发-浅蓝色荧光)

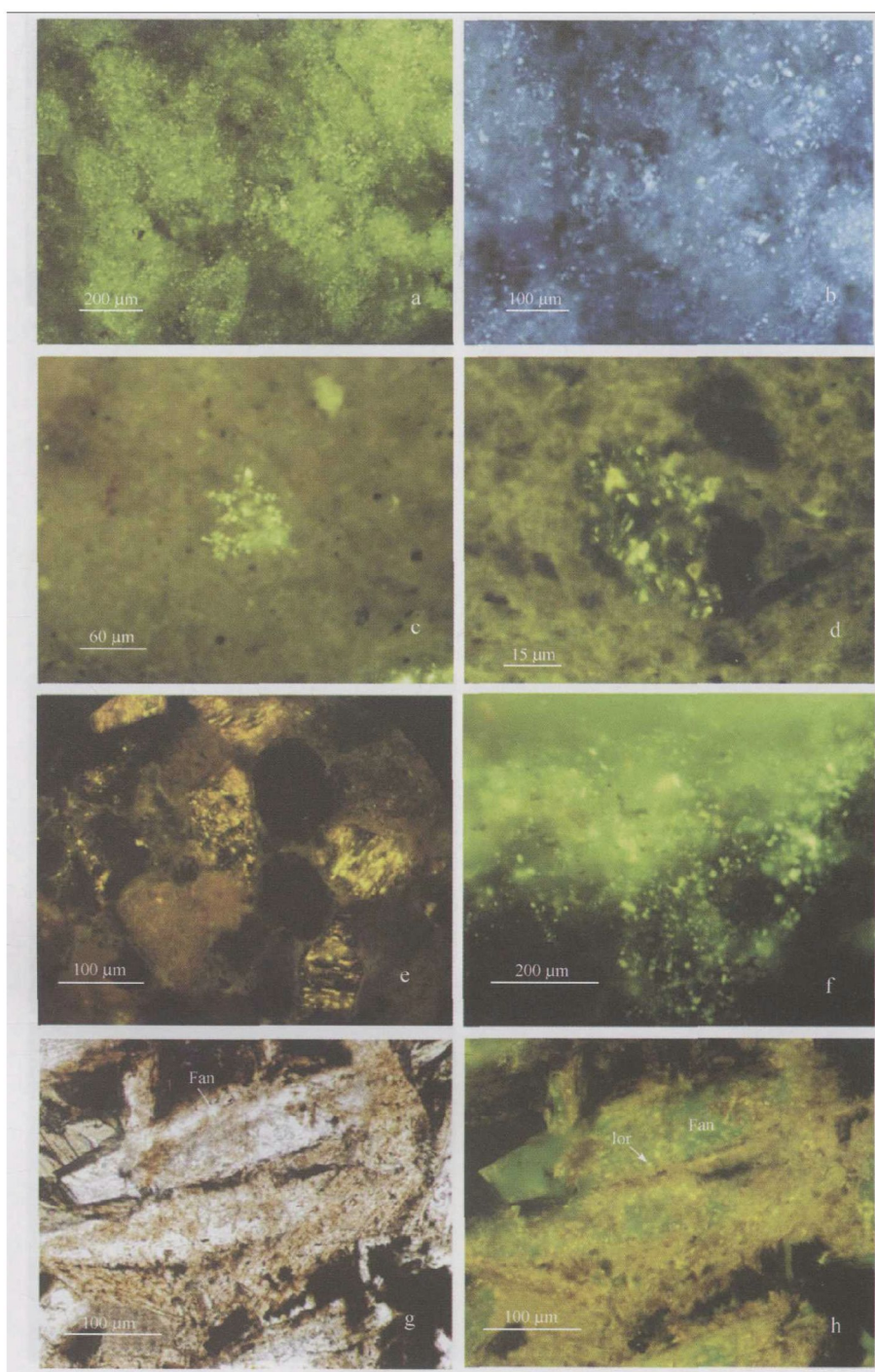


图3 烃源岩和储层中的石油包裹体照片

Fig. 3 Photographs of petroleum inclusions in reservoirs and source rocks

- a, b. 碳酸盐烃源岩中的石油包裹体(a为蓝光激发-黄绿色荧光, b为紫外光激发-蓝白色荧光);  
 c, d. 泥质烃源岩自生矿物中的石油包裹体群(蓝光激发-黄色荧光);  
 e. 砂岩储层中的石油包裹体群(蓝光激发-黄色荧光); f. 碳酸盐岩储层缝合线附近的石油包裹体群(蓝光激发-多种荧光);  
 g, h. 辉绿岩储层长石中的微石油包裹体群(g为透射光, h为蓝光激发-黄色荧光)  
 (图3g, h中, Fan为斜长石, lor为微石油包裹体。)

由于碳酸盐岩既可以是烃源岩又可能是储集岩,因此有效鉴别赋存于源岩中的含烃包裹体的成因和分布是阐明该碳酸盐岩是否为有实际生烃能力的烃源岩或仅仅是存在有烃类活动信息的输导岩或储集岩的重要依据。根据对塔里木盆地奥陶系、南方地区三叠系和二叠系碳酸盐岩地层的广泛观察,一些好的碳酸盐烃源岩不仅分散有机质含量较高、矿物荧光沥青荧光强度高,而且泥晶和细晶碳酸盐岩中常有细小和零星分布或团粒状分布的原生石油包裹体,源岩中的细晶方解石条带或重结晶颗粒中常包含比较丰富的石油包裹体群,表明这类碳酸盐岩为有实际生烃现象的烃源岩<sup>[14]</sup>(图3a,b)。

泥质烃源岩中流体包裹体的分布受很多因素控制。纯粘土质烃源岩和未成熟烃源岩中一般很难见到烃类流体包裹体。富含有机质的砂质-粉砂质泥岩,在源岩的碎屑矿物裂隙或自生矿物中可能捕获生、排烃阶段产出的烃类流体,形成微小的石油包裹体。例如在鄂尔多斯盆地三叠系和胶莱盆地白垩系中,一些富有机质的钙-泥质烃源岩中自生矿物和碎屑矿物的微裂隙中常富含微小的石油包裹体群。在胶莱盆地下白垩统莱阳组,水南段泥质烃源岩总有机碳含量高达1.14%~3.00%,氢指数高达390~671 mg/g,游离烃含量达0.16~0.86 mg/g,为生烃性能很好的烃源岩<sup>4,[13]</sup>。其中,自生矿物和砂质碎屑矿物裂隙中包含十分细小的石油包裹体群,在透射光下为浅黄色-无色,在蓝光激发下发亮黄色和黄色荧光,紫外光激发下发浅蓝色和蓝绿色荧光(图3c,d)。由于源岩中含油饱和度较高,微石油包裹体很发育,但很难见到共生的盐水包裹体。烃源岩中发育的石油包裹体群不仅揭示了烃源岩生、排烃的直观信息,而且可根据包裹体的温度测定结果进一步了解生油阶段的温度、压力和流体性质等地球化学条件。

## 2.2 含烃流体运移通道和输导层中的流体包裹体

盆地中含烃流体的运移通道包括各种裂隙、断层、层面、不整合面和缝合线构造等,是烃类纵向和横向运移的主要途径。孔隙较大和联通性好的输导层往往是烃类流体横向运移的重要层带。在烃类各种运移途径中,不仅可能有残留烃的荧光信息,而且在断层和裂隙中的脉石矿物常捕获有不同世代和类型的流体包裹体。特别是碳酸盐

岩的缝合线构造,常常是地质历史中含烃流体多次运移的重要通道。缝合线附近的脉石矿物往往包含多种类型和世代的盐水包裹体和石油包裹体,它们是地质历史中含烃流体运移过程的重要记录<sup>[14]</sup>。研究含流体包裹体脉石矿物的切割关系和包裹体的分布形式,可了解包裹体的形成期次及盆地中油气的运移、聚集规律。图3f为塔中地区奥陶系碳酸盐岩缝合线构造带中分布的多种荧光性质的石油包裹体,反映了塔中隆起地区曾有多期含烃流体运聚的信息<sup>[7,10]</sup>。

## 2.3 油气储层中的流体包裹体

地层中油气储层的孔隙度较高,是各种地质流体和油气活动与储聚的主要层段。储集岩矿物中各种流体包裹体都比较发育,是石油地质中流体包裹体的研究重点。由于储层的矿物岩石类型不同,流体包裹体的赋存规律与研究方法也略有差别。勘探实践表明,富含石油和天然气储层的岩石类型较多,其中分布最广和储聚量最多的储层是砂岩,其次是碳酸盐岩,以及部分火成岩和变质岩基底。

### 2.3.1 砂岩储层中的油气包裹体和盐水包裹体

砂岩储层中流体包裹体的产出类型和分布形式影响因素较多,除了部分碎屑颗粒存在一些继承性包裹体以外,砂岩胶结矿物、成岩自生矿物、砂粒矿物加大边、矿物裂隙愈合带中都可能捕获流体包裹体。但储层中流体包裹体的类型和分布,受地层水和流体物理化学性质的影响很大。观察实践表明,储层中盐水包裹体的分布主要与成岩作用和地层水的化学性质有关,一般砂岩储层中盐水包裹体比油气包裹体丰富;油气包裹体的形成主要发生在大量油气充注的早期,当储层孔隙中的水完全被烃类流体取代以后,矿物在无水的环境中很难生长并捕获流体包裹体。因此,在一些近代油层中石油包裹体的含量也不一定多;而在另一些储层中有可能含大量石油包裹体。据石油包裹体的人工合成实验资料<sup>[15]</sup>,砂岩中流体包裹体的发育程度受宿主矿物表面油、水润湿作用和储层流体中含油饱和度等的影响较大,矿物表面被水润湿的实验中烃包裹体比较发育,而矿物表面被油润湿的实验中烃包裹体不发育。

成岩作用比较强的地区,砂岩中一些石英等

矿物颗粒的增生加大与自生石英晶粒产出的现象比较明显,在矿物加大边或自生石英以及裂隙愈合带中捕获有盐水包裹体和油气包裹体。某些储层砂岩的长石裂隙愈合带中见有非常丰富的石油包裹体(图3e)。成岩作用较弱或某些富油和沥青质的储层中,一般很难见到矿物加大边和含流体包裹体的自生矿物,往往只在一些矿物微裂隙中封存了非常细小的流体包裹体。这种储层砂岩的矿物荧光沥青和孔隙中的荧光沥青荧光强度较强,但流体包裹体少,均一温度的测定难度大,需用高倍物镜观测。这种现象不仅与岩石的成岩作用较弱有关,而且也与原油大量灌入以后影响了矿物颗粒的结晶加大与流体包裹体的捕获作用有关。因此,不少作者认为储层中石油包裹体主要代表了早期油气充注的信息。

### 2.3.2 碳酸盐储层中的油气包裹体和盐水包裹体

大量勘探成果表明,碳酸盐岩也是很多大油气田的重要储层。碳酸盐矿物在沉积、成岩-后生作用阶段的结晶-溶解与再结晶作用都十分活跃,在地质演化历史中可能捕获有多期流体包裹体,并且早期捕获的流体包裹体又可能因各种后期地质-地球化学作用发生形变、改造和破坏。通常,碳酸盐岩储层中的油气包裹体和盐水包裹体主要分布在重结晶的方解石、白云石晶粒与方解石、白云石、石膏等新生矿物和脉石矿物中。由于碳酸盐矿物的双折射很强且常有荧光干扰,影响了流体包裹体的观察分析;此外,由于碳酸盐矿物硬度低、脆性大、易产生裂隙,包裹体在地质作用过程和制片过程中易发生形变和泄漏,影响了流体包裹体均一温度的测定。我国塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩油气储层中的石油包裹体和盐水包裹体都比较丰富,广泛发育在重结晶碳酸盐和方解石脉中,并在碳酸盐地层的缝合线附近存在多期荧光性不同的石油包裹体和沥青。

四川盆地震旦系、石炭系、二叠系、三叠系碳酸盐岩储层的气藏中,天然气包裹体、含沥青的流体包裹体和非烃包裹体比较丰富,特别是在古生界高演化碳酸盐岩储层和油裂解气藏中发育的包裹体类型与包裹体共生组合比较特殊。据威远气田震旦系碳酸盐岩储层及川东北抛光和鲃滩气田三叠系和二叠系碳酸盐岩储层的观察,溶孔十分发育,在晶洞中充填的方解石和自生石英中的

流体包裹体很多,存在大量富甲烷的气体包裹体和气液比大的盐水包裹体以及含沥青的包裹体,并常与结构比较特殊的球粒状、皮膜状、微粒状构造和中间相结构焦沥青共生。

### 2.3.3 火成岩或基岩储层中的流体包裹体

油气盆地中一些孔隙比较发育的火山岩和基底岩石,也可成为石油和天然气的储集层。储层中流体包裹体的捕获条件与岩石孔隙中的矿物充填作用、火山岩矿物的蚀变作用、交代作用等的后生变化有关。一些盆地基底岩石中发现的石油包裹体,其成因主要是上部烃源岩生成的油气或含烃流体灌入下部的基底岩石,被后生矿物和矿物裂隙愈合带捕获形成烃包裹体。此外,也发现基底岩石中保留有部分基底岩石早期成因的烃包裹体<sup>[16]</sup>。

我国东部地区已发现多种类型的火山岩与辉绿岩储层的油气藏,例如大庆油田白垩系火山岩储层中的大气田及渤海湾地区的辽河油田、胜利油田等第三系火山岩与辉绿岩储层中的油气藏。与火山岩有关的储层中也存在不同成因的油气包裹体。大庆油田白垩系火山岩储层中的CO<sub>2</sub>包裹体主要为与火山成因有关的无机CO<sub>2</sub>包裹体;而胜利油田临南洼陷商河地区辉绿岩油藏储层中发现的大量石油包裹体群,主要赋存于辉绿岩长石解理、裂隙中,多数为十分细小的纯液态烃包裹体,在透光下形态不很明显,但在蓝光激发下可见长石中包含大量星点状发亮黄色和黄绿色荧光的石油包裹体<sup>[4,14]</sup>(图3g,h)。石油包裹体均一温度的测定结果为79~82℃,样品中也未发现存在高温流体包裹体,表明辉绿岩的长石中的油包裹体成因是辉绿岩侵入E<sub>s</sub><sup>3</sup>,地层冷却以后长石在地层水作用下发生多种可逆性蚀变反应过程中,在长石节理、裂隙中捕获了来源于第三系泥质烃源岩的烃类流体,形成石油包裹体。

## 3 流体包裹体的地质应用

油气盆地中流体包裹体分布广、类型多,观测研究结果解决了油气地质领域中的很多实际问题,归纳起来主要包括两大方面:其一,是根据包裹体均一温度测定数据以及捕获温度、捕获压力的计算资料,研究盆地烃源岩和储层的热演化历史,为油气勘探评价提供基础资料;其二,是根据

各类烃包裹体的观测分析资料,剖析油气生成-运移-聚集的成藏信息,直接为油气普查勘探提供科学依据。前者一般以测定盐水包裹体均一温度、冰点温度为重点,后者以研究油气包裹体产出和分布特征为重点。

### 3.1 盐水包裹体在盆地热史研究中的应用

盐水包裹体在盆地沉积-成岩-演化阶段的产出和分布都比较广泛,并且多数盐水包裹体主要是在均一体系中捕获的成岩成矿流体,捕获于石英中的盐水包裹体多数具有等容体系和封闭体系的特征。测定的均一温度、冰点温度数据,是研究盆地热演化史的基础资料,也是盆地模拟中计算古地温和古地温梯度、古压力和古流体势分布的重要参数,在油气地质中应用较广。此外,测定的包裹体均一温度与有机地球化学分析资料相结合,是油气评价中划分很多大油气田烃源岩生油门限温度和深度的依据,也是确定天然气和凝析油生成带地温梯度和深度的依据线。在油气藏演化研究中,储层流体包裹体均一温度与包裹体类型的观测结果与储层焦沥青结构和反射率测定资料相结合,充分论证了四川盆地三叠系、二叠系天然气储层中油裂解气的形成阶段,本区  $H_2S$  热反应成因气的形成温度和地球化学条件<sup>[15~20]</sup>,以及塔东地区古生界油藏演化模式的依据<sup>[21]</sup>。

### 3.2 烃包裹体在油气勘探评价中的应用

盆地中各类烃包裹体和含烃包裹体的发现,提供了该层段在地质历史中曾有烃类生成或油气活动的重要证据。进一步研究样品中烃包裹体的类型和产出分布特征,可以了解油气成烃、成藏演化等很多重要信息,为勘探评价提供科学依据。因此可以认为,在包裹体研究中,烃包裹体类型和分布的精细观察往往比烃包裹体的均一温度测定更加重要。例如,在烃源岩中发现了明显的石油包裹体,表明该烃源岩不仅有实际生烃能力,而且已进入了生烃门限。进一步测定石油包裹体或共生盐水包裹体的均一温度,可以了解源岩生烃阶段的温度、压力和地球化学条件。

储层中分布的各类油气包裹体,包含了油气充注和成藏演化的大量信息。根据烃包裹体类型、荧光、期次和有机组成的观测分析资料,可以

了解油气成藏阶段、温度、压力等地球化学条件。地层中烃包裹体的分布规律,也是剖析古油水界面变迁和鉴别古油藏、原生油藏与次生油藏的依据。此外,储层中油气包裹体、含沥青包裹体与储层沥青的对比研究结果,对于探讨油裂解气藏的成因或干酪根热成因气有重要意义。如果储层中富集的主要是干酪根热成因气,则同期矿物捕获的包裹体应以气态烃包裹体为主;如果储层中富集的主要是油裂解成因气,则同期矿物捕获的包裹体类型十分复杂,不仅有比较典型的高温包裹体和气体包裹体,而且有较多含沥青的气液包裹体,它们常与储层孔隙中的孔壁状、球粒状构造和中间相结构的焦沥青及微粒状-片状镶嵌结构的焦沥青-碳沥青伴生。

在成藏研究中根据石油包裹体均一温度和体积气液比的测定结果等基本资料,可利用“PVTsim”,“PIT”和“PVTpro4.0”等软件,模拟计算地层中石油包裹体的捕获温度与捕获压力<sup>[3,22~24]</sup>,为油气成藏条件研究提供科学依据。图4中的两组石油包裹体的均一温度,一组为  $T_h = 69^\circ C$  (气液比为 5.78%,共生的盐包裹体的均一温度  $T_h = 93^\circ C$ );另一组石油包裹体  $T_h = 112^\circ C$  (气液比为 9.71%,共生的盐包裹体的均一温度  $T_h = 121^\circ C$ ,其冰点温度  $T_i = -3.8^\circ C$ ,对应的 NaCl 盐度为 7%)。应用 Liu 等<sup>[25,26]</sup> 的模拟方法,按设定的两组石油包裹体的初始组成与对应的均一温度、气液比和同期盐水包裹体的均一温度、盐度等数据,用“PVTsim”软件进行模拟计算,结果是:第一组石油包裹体的捕获温度  $T_c = 93^\circ C$ ,捕获压力  $P_c = 29.7 \text{ MPa}$  (图4a);第二组石油包裹体的捕获温度  $T_c = 132.87^\circ C$ ,捕获压力  $P_c = 34.75 \text{ MPa}$  (图4b)。

样品中各类流体包裹体观测研究与地质应用效果以及石油包裹体捕获形式、捕获条件的模拟计算结果的检验,不仅需要大量的油气勘探实践,也常用人工合成石油包裹体与盐水包裹体的实验研究工作进行验证。近年来报道了一些有关人工合成盐水包裹体和烃包裹体的实验研究成果与应用<sup>[27~30]</sup>。图2d—h为我们用水热体系在高压釜中人工合成的含水石油包裹体和不含水的石油包裹体、轻质油石油包裹体的显微透射光、荧光照片与天然储层中含水与不含水的石油包裹体捕获条

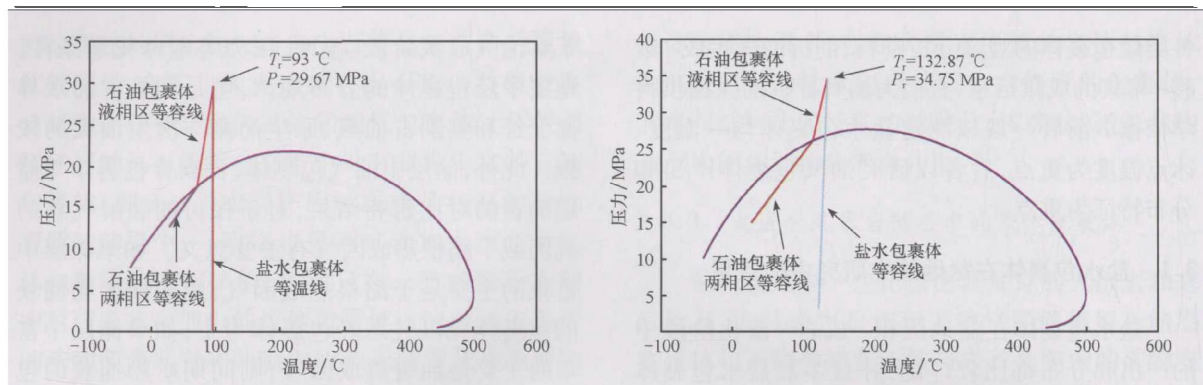


图4 石油包裹体捕获温度、捕获压力的“PVTsim”模拟的  $P-T$  相图

Fig. 4 Pressure-temperature diagram of oil inclusions simulated by PVTsim software

件的对比。

## 4 结语

流体包裹体类型的划分与流体包裹体的观测目标和研究程度有关。通常流体包裹体类型的划分与命名,应反映地质体中流体包裹体的成因、性质和产出条件。观测实践中,根据不同划分原则与研究目标,可能有多种不同的分类方案与包裹体名称。因此,在油气盆地地质研究中建立一套比较简单和适用的分类方案,有利于文献资料的对比与地质应用。但随着流体包裹体研究工作的深入,建立更精细的流体包裹体分类也是必要的。

## 参考文献

- 1 卢焕章,李秉伦,沈昆,等.包裹体地球化学[M].北京:地质出版社,1990.2~42
- 2 卢焕章,范宏瑞,倪培,等.流体包裹体[M].北京:科学出版社,2004.487
- 3 刘斌.烃包裹体热动力学[M].北京:科学出版社,2005.1~36
- 4 刘德汉,卢焕章,肖贤明.油气包裹体及其在石油勘探开发中的应用[M].广州:广东科技出版社,2007.109~211
- 5 欧光习,李林强,孙玉梅.沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践[J].矿物岩石地球化学通报,2006,25(1):1~8
- 6 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
- 7 刘德汉.包裹体研究——盆地流体追踪的有力工具[J].地学前缘,1995,4(4):149~153
- 8 池国祥,周义明,卢焕章.当前流体包裹体研究和应用概况[J].岩石学报,2003,19(2):201~212
- 9 施继锡,李本超,傅家谟,等.有机包裹体及其与油气的关系[J].中国科学(B辑),1987,17(3):318~325
- 10 刘德汉,肖贤明,贾容芬,等.碳酸盐岩生烃运移的激光荧光和有机包裹体研究[J].海相油气地质,2000,5(1):62~68
- 11 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
- 12 李荣西,席胜利,邱领军.用储层油气包裹体岩相学确定油气成藏期次——以鄂尔多斯盆地东油田为例[J].石油与天然气地质,2006,27(2):194~199,217
- 13 刘洪营,刘德汉,王峰,等.莱阳凹陷烃源岩石油包裹体及有机地球化学研究[J].地球化学,2008,37(1):87~96
- 14 王峰,曾庆辉,刘德汉,等.临邑凹陷辉绿岩中油气成藏研究[J].地球化学,2006,35(3):285~294
- 15 刘德汉,肖贤明,熊永强,等.四川东部飞仙关组鲕滩气藏储层含自然硫不混溶包裹体及硫化氢成因研究[J].中国科学(D辑)——地球科学,2006,36(6):520~532
- 16 Dulkiewicz A, Volk H, Ridley J. Geochemistry of oil in fluid inclusions in a Middle Proterozoic igneous intrusion: implications for the source of hydrocarbons in crystalline rocks[J]. Organic Geochemistry, 2004, 35: 937~957
- 17 马永生,蔡勋育,李国雄.四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J].地质学报,2005,79(6):858~865
- 18 马永生,蔡勋育.四川盆地川东北二叠系—三叠系天然气勘探成果与前景展望[J].石油与天然气地质,2006,27(6):741~750
- 19 田辉,王招明,肖中尧,等.原油裂解成气动力学模拟及其意义[J].科学通报,2006,51(15):1 821~1 827
- 20 Tian Hui, Xiao Xianming, Wilkins R W T, et al. New insights into the volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs: implications for the in-situ accumulation of gas cracked from oils[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(2): 181~200
- 21 Wang Yunpeng. Thermal cracking history by laboratory kinetic simulation of Paleozoic oil in eastern Tarim Basin, NW China: implications for the occurrence of residual oil reservoirs[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 1 803~1 815
- 22 Aplin A C, Macleod G, Larter S R, et al. Combined use of confocal scanning microscopy and PVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusion[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 97~110
- 23 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
- 24 Thie'rya R, Pironon J, Walgenwitz F, et al. PIT (Petroleum Inclusion Thermodynamic): a new modeling tool for the characterization of hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70: 701-704
- 25 Liu D H, Xiao X M, Mi J K, et al. Determination of trapping pressure and temperature of petroleum inclusion using PVT simulation inclusion of Lower Ordovician carbonates from the Lunnan low uplift, Tarim Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 29-43
- 26 刘德汉, 宫色, 刘东鹰. 江苏句容-黄桥地区有机包裹体形成期次和捕获温度、压力 PVTsim 模拟计算[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1 435-1 448
- 27 Teinturier S, Pironon J. Experimental growth of quartz in petroleum environment, Part I: procedures and fluid trapping [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 2 495-2 507
- 28 Bourdet J, Pironon J. Strain response and re-equilibration of CH<sub>4</sub>-rich synthetic aqueous fluid inclusion in calcite during pressure drops [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 2 946-2 959
- 29 刘超英, 周瑶琪, 陈勇, 等. 高温高压合成碳酸盐岩流体包裹体实验[J]. *硅酸盐通报*, 2007, 26(1): 168-172
- 30 倪培, 王一刚. 人工合成烃包裹体的实验研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2 033-2 038
- (编辑 李 军)

(上接第 478 页)

- 15 楼章华, 朱蓉, 金爱民, 等. 东营凹陷地下水动力场的形成与演化[J]. *地质科学*, 2003, 38(1): 85-96
- 16 地质矿产部水文地质工程地质研究所. 油田古水文地质与水文地球化学——以冀中坳陷为例[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- 17 刘方槐, 颜婉荪. 油气田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 18 楼章华, 高瑞祺, 蔡希源. 论松辽盆地地下水动力场演化与油气运移、聚集[J]. *沉积学报*, 1997, 15(4): 115-120
- 19 Magara. Compaction and fluid migration—practical petroleum geology [J]. Amsterdam, Elsevier: 1978
- 20 Villegas M E, Bachu S, Ramon J C, et al. Flow of formation waters in the Cretaceous-Miocene succession of the Llanos basin, Colombia [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(11): 1 843-1 862
- 21 Tóth J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins [J]. *Journal of Geophysics Research*, 1963, 68(12): 4 795-4 812
- 22 Tóth J. Gravity induced cross-formational flow of formation fluids, Red Earth Region, Alberta, Canada—analysis, patterns, and evolution [J]. *Water Resources Research*, 1987, 14(5): 805-843
- 23 Tóth J. Cross-formational gravity-induced flow of groundwater: a mechanism of transport and accumulation of petroleum (the generalized hydraulic theory of petroleum migration) [A]. In: Roberts III W H, Cordell R J, eds. Problems of petroleum migration [C]. AAPG Bulletin, 1980, 10(1): 121-167
- 24 李明诚. 石油与天然气运移(第二版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994
- (编辑 高 岩)

(上接第 484 页)

- 6 李明诚. 在油气初次运移研究中压实曲线的应用[J]. *地球科学*, 1986, 11(3): 309-314
- 7 田世澄, 李纯菊. 泌阳凹陷孔隙流体压力及油气运移特征[J]. *地球科学*, 1986, 11(3): 323-327
- 8 陶一川. 油气运移聚集的流体动力学机理问题[J]. *石油与天然气地质*, 1983, 4(3): 255-267
- 9 杜强, 胡伏生, 万力, 等. 鄂尔多斯北部盆地古流体动力场的演化特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(6): 23-27
- 10 王震亮. 改造型盆地流体动力学的发育特点[J]. *石油与天然气地质*, 2000, 21(1): 24-27
- 11 邓林, 汤磊, 康志宏, 等. 盆地三维古水动力数值模拟方法及其应用[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(1): 7-11
- 12 康永尚, 庞雄奇. 油气成藏流体动力系统分析原理及应用[J]. *沉积学报*, 1998, 16(3): 80-84
- 13 田世澄, 陈永进, 张兴国, 等. 论成藏动力系统流体动力学机制[J]. *地学前缘*, 2001, 8(4): 329-335
- 14 康永尚, 王捷. 流体动力系统与油气成藏作用[J]. *石油学报*, 1999, 20(1): 30-33
- 15 王德潜, 刘祖植, 尹立河. 鄂尔多斯盆地水文地质特征及地下水系统分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 23(1): 6-14
- 16 杨绪充. 含油气区地下温压环境[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1991
- 17 刘方槐, 颜婉荪. 油田水文地质学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991
- 18 杨俊杰, 李克勤, 张东生, 等. 中国石油地质志(12卷), 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992
- (编辑 高 岩)