

文章编号:0253-9985(2005)03-0271-06

油气成藏期研究新进展

马安来^{1,2}, 张水昌³, 张大江³, 金之钧¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油大学, 北京 102249;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:传统的成藏期分析是从生、储、盖、运、聚、保等参数的配置, 根据圈闭形成史、烃源岩生烃史及露点压力法作出的。但基于中国多数含油气盆地隶属叠合盆地的特性, 具有多烃源层、多期油气生成、多期成藏, 多期破坏的特点, 20世纪90年代后期, 引进并运用了流体历史分析方法。借助油藏地球化学、流体包裹体、伊利石 K-Ar 测年、储层沥青和油气水界面追溯法等确定成藏期的新方法, 实现了由传统的定性(定期)研究到定量或半定量研究的转变, 可以较准确确定油气藏形成时间。同时, 鉴于叠合盆地油气藏形成具有较大的复杂性, 在成藏期研究工作中仍需要重视基础地质工作, 传统方法(圈闭形成期、生烃史)是进行新技术应用的基础。地球化学技术方法与地质背景相结合, 传统方法与新方法相结合, 定性方法与定量方法相结合, 是今后油气成藏期研究的发展方向。

关键词:成藏期; 流体包裹体; 储层沥青; 伊利石 K-Ar 测年; 油气水界面追溯法; 油藏地球化学

中图分类号: TE112.1

文献标识码: A

New advancement in study of reservoiring period

Ma Anlai^{1,2}, Zhang Shuichang³, Zhang Dajiang³, Jin Zhijun¹

(1. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing;

2. China University of Petroleum, Beijing;

3. Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing)

Abstract: The reservoiring period has traditionally been analyzed from the matching of source rock, reservoir rock, cap rock, migration, accumulation and preservation parameters, on the basis of trap formation history, hydrocarbon generating history of source rocks and dew point pressure method. Considering that most of the petroliferous basins in China are superimposed basins, which are characterized by multiple source rocks, multi-stage hydrocarbon generation, accumulation and destruction, fluid history analysis method was introduced in late 1990s. Utilization of several new methods, such as reservoir geochemistry, fluid inclusion, illite K-Ar dating, reservoir bitumen and tracing of oil-gas-water contacts, has converted the traditional qualitative (period determining) study to quantitative or semi-quantitative study, thus the formation time of pools can be relatively accurately calculated. In view of the complexity of the formation of reservoirs in superimposed basins, attentions should still be paid to basic geologic studies. Traditional methods, such as trap formation period and hydrocarbon generating history, are the basis of application of new technologies. Future trends of reservoiring period studies are combining geochemistry method with geologic setting study, traditional method with new methods, and qualitative method with quantitative method.

Key words: reservoiring period; fluid inclusion; reservoir bitumen; illite K-Ar dating; tracing of oil-gas-water contacts; reservoir geochemistry

成藏期实际上是烃类流体运聚成藏的时限, 对于一个含油气系统, 其关键时刻是烃源岩的生

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目(99-111-01-03)

第一作者简介: 马安来, 男, 34岁, 副教授, 博士后, 石油地球化学

收稿日期: 2004-05-21

烃期和成藏期。我国目前多是根据构造发育史、圈闭形成史与烃源岩的生排烃史大致确定油气成藏的时间^[1-4]。但由于我国许多含油气盆地,特别是叠合盆地往往具有多烃源层、多期油气生成、多期成藏,多期破坏的特点,因而运用传统的成藏期研究方法难以准确认识油气藏的形成演化史。20世纪90年代后期发展起来的流体历史分析方法,借助油藏地球化学、储层有机岩石学及粘土矿物演化史,进行储层流体历史分析,实现了由传统的定性(定期)研究到定量或半定量研究的转变,可以较准确确定油气藏形成时间。

1 成藏期传统分析方法

油气藏传统的分析方法主要是从圈闭形成时间和油藏饱和压力两方面分析成藏期,主要有以下3种方法。

1.1 圈闭形成时间

油气藏的形成是油气在圈闭中聚集的结果,只有形成了圈闭,油气才能聚集。因此,可以根据圈闭的形成时间确定油气藏的最早时间^[1]。李志军等^[2]根据圈闭形成时间认为台南鲁克沁稠油的成藏期为印支期末—燕山早期,油气运聚成藏后遭受进一步稠化、调整、运移及破坏。然而对于叠合盆地而言,盆地的不同演化阶段均有圈闭形成,圈闭形成期只能给出在此之后油气聚集成藏的期限。

1.2 烃源岩生烃史

油气藏的形成是油气生成、运移、聚集的结果。没有油气的生成,并从生油层中排到储集层中,就不可能有油气藏的形成。生油岩中油气生成并排出的主要时期,是油气藏形成时间的下限^[1]。王屿涛等^[3]根据构造演化史、生烃演化史将准噶尔盆地南缘油气成藏史分为3个阶段:印支运动末期形成古源型油藏,燕山运动末期形成中源型油藏,喜山期形成煤型天然气藏。随着成烃动力学理论的完善和盆地模拟软件的广泛运用,从生烃史确定成藏期已成为20世纪90年代常规的分析方法。

含油气盆地生烃史分析从地层分层、古地温、化学动力学模型等方面进行。生烃史确定成藏期的准确性主要取决于埋藏史和热史的恢复。目前,主要利用镜质体反射率(R_o)、镜质体反射率梯度、粘土矿物、有机地化、磷灰石裂变径迹、牙形石

色变指数(CAI)、自生矿物组合、流体包裹体测温、氧同位素($\delta^{18}O$)和 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 比值反演古地温^[5,6]。对于复合叠合盆地而言,根据生烃史确定成藏期需要准确了解烃源岩的层位和烃源灶的展布、古地温史、埋藏史。在进行生烃史精细分析时,还须重视以下3个方面:1)有机质成熟度模拟计算数据与实际测量数据的对比;2)镜质体反射率、流体包裹体均一温度和磷灰石裂变径迹对盆地热历史的限定;3)油气藏成熟度与对应烃源岩成熟度的比较。

1.3 露点压力法

原油或凝析气自烃源岩中生成排出后,就饱含天然气或轻质油,以后运移到合适的圈闭聚集成藏,此时,原油或凝析气的溶解作用在当时的地层温压条件下达到饱和状态,其饱和压力反映了形成时的温度和压力条件,因而可以根据现今油藏的饱和压力或凝析气藏的露点压力确定其形成时的埋藏深度^[7,8]。

对于叠合盆地而言,油气藏形成之后,后期盆地总体下降,沉积厚度较大,尽管原始饱和压力(露点压力)不再改变,但地层压力却因埋藏加深而增高。这种情况下,两个压力之间出现的差值,称为原始饱和压差。油气藏形成时的埋藏深度越小,后期的下沉幅度越大,则原始饱压差越大。利用声波测井计算出相应油藏地层压力(P)与地层埋深(D)的关系式为

$$P = \Delta P \times D$$

对于高温高压条件下,未进行储层流体测试的油气藏,可以利用 Standing 公式^[8]计算油藏的饱和压力

$$P_b = 24.446[(R_s/\gamma_g)^{0.83} \times 10^{(0.001687t-1.7686/\rho_o)}]$$

式中 P_b 为饱和压力, MPa; R_s 为溶解气油比, m^3/m^3 ; γ_g 为天然气相对密度; ρ_o 为地表脱气原油密度, g/m^3 ; t 为地层温度, $^{\circ}C$ 。

根据公式求出地层压力梯度,利用高温高压条件下,已进行储层流体测试的各油气藏的原始饱和压力,近似计算出最终成藏的埋深(即原始成藏深度),以及最终成藏再度下沉的深度(即成藏表面的目前深度)。

对于叠合盆地而言,由饱和压力-露点压力法确定的成藏时间带有很大的不确定性。叠合盆地的油气藏在形成以后一般都不同程度地经历过构

造抬升,造成油藏中的溶解气体因构造抬升而散失,凝析气藏也往往因构造抬升而发生反凝析作用,从而使油气藏最初形成时的饱和压力或露点压力以及相态特征发生改变。多期次的油气注入也会使早期油气藏的饱和压力或露点压力发生变化。此外,由饱和压力-露点压力法所确定的成藏期属于最早成藏时间还是最晚成藏时间,看法不尽相同。

2 油藏地球化学方法

油气藏内烃类流体在纵向上和横向上的非均质性是一个普遍现象。早期的研究认为重力分异、生物降解或水洗作用是造成烃类流体非均质性的的重要因素。近年来,研究发现油藏中的烃类流体非均质性存在多种成因^[9]。England等^[10]提出3种油藏的混合作用机理:热对流混合作用、重力驱动混合作用和扩散混合作用。England等^[11]还认为,在单个石油柱内,垂向上的扩散作用在地质历史时间是快速进行的,导致在1 Ma的时间内使100 m的油柱建立重力分异的平衡。在横向上除非整个油藏的储集层具有很高的渗透率,一般穿越大油田石油柱的扩散作用是缓慢进行的,成分的非均质性可以保持数10 Ma。

油藏地球化学分析主要是通过原油地球化学分析,确定原油、天然气成熟度[如原油轻烃成熟度、甲基菲指数(MPI)、 $18\alpha(\text{H})-22, 29, 30$ -三降藿烷/ $17\alpha(\text{H})-22, 29, 30$ -三降藿烷(Ts/Tm)、 $\text{C}_{29} 20\text{S}/(20\text{S} + 20\text{R})$ 等、天然气碳同位素换算出的等效镜质体反射率],进行原油族(组)群划分,建立油气藏与烃源岩之间的关系,通过油气藏成熟度及成分在横向上的变化[如气油比、 $\text{C}_{29} 20\text{S}/(20\text{S} + 20\text{R})$ 、MPI]建立油气藏的充注方向。借助流体包裹体和同位素测年,进而确定油气藏的成藏期。

3 流体包裹体测定

流体包裹体是在矿物生长过程中,被矿物晶格的缺陷或窝穴所包裹的部分流体。由于包裹体在形成之后没有外来物质的加入,因而能够反映成藏时的条件。包裹体捕获温度反映其成岩时的温度,因而可根据沉积岩中自生矿物中盐水包裹体的均一化温度,经过压力校正,计算宿主矿物形成的古温度,而如今均一化温度多不进行压力校正。

3.1 均一化温度

流体包裹体方法主要是利用包裹体在成岩矿物中的产状、分布位置及其交切关系、颜色、均一温度分布等,确定流体包裹体的形成期次。流体包裹体形成期次是反映油气运移充注历史的最好记录,准确进行包裹体的分期是确定油气藏形成期的关键。Burrus等^[12,13]通过对石油包裹体的产状及其交切关系,结合埋藏史分析,确定了阿曼和阿拉伯联合酋长国白垩系灰岩储层中的石油运聚期次和时间。Eadington等^[14]用包裹体资料研究澳大利亚Eromanga盆地流体运移时,强调埋藏史和热历史恢复的重要性,从深度、温度、时间三个标尺描述热史与烃类运移的关系。张金亮等^[15]根据瞬时热流法,依据实际测量的反射率(R_o)与计算的反射率(R_v)的平方差值,利用化学动力学方程进行拟合的方法,进行热流史的恢复。在此基础上利用泥岩压实和剥蚀厚度恢复,编制了巴参1井精细分层的时间-温度埋藏史曲线。确定第一期成藏时间为100 Ma,相当于早白垩世晚期;第二期为14 Ma,相当于中新世中期,第二期对油气藏形成起重要作用。

目前,国内许多单位流体包裹体均一化温度数据,由于测试时没有区分期次、是否均相捕获,造成大部分测试数据可靠性差,或者均一化温度离散,影响了该方法在油气藏分析中的应用。运用包裹体均一温度进行成藏年代分析时,还应当注意后期温度、压力变化对包裹体均一温度的影响,特别是应排除已发生均一温度再平衡的包裹体,否则所确定的成藏年代便可能偏新。

成藏分析时,均一化温度的测试对象是与烃类流体包裹体共生的盐水包裹体,而非烃类包裹体本身。就均一化温度而言,烃类包裹体的均一化温度比共生的盐水包裹体温度低20℃,甚至40℃以上。对于烃类包裹体的均一化温度,一些研究者认为它可能代表了油气藏开始注入时的古地温。

3.2 同位素绝对定年

Shepherd等^[16]率先进行了流体包裹体中Rb-Sr等时线年龄分析。他们分析了英格兰Cumbria的Carrock Fell钨矿床流体包裹体中Rb-Sr同位素等时年龄,得出成矿流体成矿年龄为 $392 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$,与通过石英脉云母中测得的K-Ar年龄 $387 \text{ Ma} \pm 5 \text{ Ma}$ 基本一致。这种一致性有效地验证

了流体包裹体 Rb-Sr 等时年龄的可靠性。但在油气藏成藏期中,绝对定年的工作开展很少。周雯雯等^[17]报道了珠三坳陷油气包裹体 Rb-Sr 等时线年龄的测定结果,认为珠三坳陷第二期有机包裹体的形成年龄为 6 Ma。

3.3 成分分析(MCI)

油气在成藏过程中,油源和成熟度均会发生变化。储集岩中的油气组分事实上是不同阶段注入油气的混合物。传统的油源对比是建立在现今油气成分和烃源岩中残留烃之间的对比,恢复油气不同充注阶段的分子地球化学特征对于恢复油气的油源及油气成藏过程是极其重要的。Karlsen 等^[18]对北海油田 Ula 油田侏罗系 Ula 油组包裹体成分分析可以视为这方面的典范。澳大利亚 CSIRO 石油资源部的地球化学学者^[19~21]利用在线(on-line)和离线(off-line)分析技术,获得了包裹体中烃类分子地球化学信息,在线分析技术主要分析气体和轻质组分,而离线分析技术主要分析生物标志物,并将两者结合进行对比分析,用于重建油藏的充注历史。George 等^[19]、Lisk 等^[20]对澳大利亚 Camarvon 盆地 South Pepper 油田的研究表明:油藏中的原油来源于侏罗系的 Dingo 组粘土岩,原油含有较高含量的 C₂₅-降藿烷,而包裹体中的原油 C₂₅-降藿烷含量很低,它代表了初次充注原油的面貌。进一步研究表明,在包裹体形成后,早期充注的原油在始新世经历了严重的生物降解,其后,构造中又被来源于侏罗系的 Dingo 组粘土岩的原油再次充注,并与油藏中遭受生物降解作用的早期原油混合,形成现今的地球化学特征。

MCI 分析必须建立在严格的分析检测条件下,必须有严格的质量保证/质量控制体系,成功的分析必须有:过程的空白实验;有效分离矿物颗粒和胶结物;移去所有地层流体,特别是富含有机成分的流体和固体;整个制样过程必须高度洁净。周凤英等^[22]通过对塔里木盆地轮南 2 井流体包裹体成分研究,结合轮南地区构造演化史,埋藏史和生烃史分析,明确了塔里木盆地轮南 2 井三叠系油藏主要为一次油气大规模注入形成,油气注入时间主要在 14~16 Ma,油源来自于中、上奥陶统烃源岩。侏罗系油藏则具有两次的油气注入,第一次的油气注入主要发生在 14~16 Ma,油源来自于中、上奥陶统烃源岩;第二期油气注入主要发生在晚喜山期(晚第三纪早期)之后的最近的 5 Ma

间,主要沿重新开启的断层向上运移、注入,进行油气再次分配和调整,可能还混有少量的陆相油的注入。

潘长春等^[23]对 Karlsen 等人^[18]的方法进行了改进,对塔里木盆地库车坳陷储集岩包裹体进行了研究,认为库车坳陷含油气储集岩具有两期油、气充注的过程,早期注入的油、气来自下古生界(寒武—奥陶系)海相烃源岩,而晚期注入的油气来自中生界陆相烃源岩,以陆相油气组分为主。

4 自生矿物定年

利用自生矿物同位素年代学确定烃类进入储层的时间是国际上 20 世纪 80 年代后期逐步发展起来的新技术。其方法与矿床学中利用自生和蚀变矿物同位素年代学确定矿化年代相似。其原理是砂岩储层中自生伊利石是烃类充填储层前最晚形成的。储层中自生伊利石仅在流动的水介质环境形成,油气进入储层后伊利石形成过程就会停止^[24]。一般来说油气藏形成时间略滞后于伊利石同位素年龄或基本同步。

利用自生矿物伊利石同位素分析数据确定成岩事件时代,限定成藏时间在北海油田和西北欧地区已成为常规的方法^[25,26]。国内王飞宇等^[27]对塔中 4 油田 K/Ar 同位素作了测定,认为塔中 4 油田 CI 油藏的形成时间为白垩纪末前后。

伊利石 K/Ar 定年的准确性在于样品的代表性。张有瑜等^[28]认为充分发育的伊利石成岩作用及伊利石成岩作用与油气注入事件具有成因联系,是应用该项技术的基础。此外,对于测试数据必须结合样品特征及地质条件进行分析。

5 储层沥青分析

沥青作为石油与天然气的伴生产物最早用来作为寻找油气藏的标志,自 20 世纪 70 年代,沥青反射率被用作烃源岩成熟度的指标,近年来有些研究表明沥青可作为油气生成与运移的标志^[29],沥青所包含的地质信息日益受到重视。储层沥青是一类特殊的成岩矿物,它是油藏中石油蚀变的产物,记录了油藏被改造、破坏的信息。固体沥青反射率反映了烃类流体转变为固体沥青后所经历的热历史。从储层固体沥青反射率,结合储层埋藏史和热演化分析,可以确定油气藏的形成时间。

肖贤明等^[30]基于有机成熟理论,应用改进的 Karweil 方法^[31],以塔里木盆地塔中地区某些钻孔为实例,提出了应用沥青反射率推算油气生成与运移地质时代的原理与方法,塔中地区古生代地层中的3组沥青形成的地质时代分别为中、晚奥陶世、晚白垩世—早第三纪和晚第三纪。

6 油气水界面追溯法

规则油气藏(不规则的岩性油气藏和水动力油气藏除外)的现今油水界面或气水界面一般为水平面。这类油气藏最初形成时的油气水界面一般也呈水平状态,后因构造变动等因素的影响,油气水界面可能发生变更,直至新的构造稳定期,其油气水界面又重新演变成水平面。因而可以通过现今已知油气藏水截面演变史的分析,追溯出其油气水界面(即水平面)在地质历史时期上最早形成的时期,即可确定出其成藏期。该方法首先是编制大比例尺圈闭发育史剖面图(或平面图),然后采用回剥法,计算油气藏的现今油气水界面在各地质历史时期的古埋深,标于相应时期的剖面(或平面)上,古埋深点最早可连成水平直线或水平界面的时期就是成藏期^[32,33]。此方法的优点是简便、直观,尤其是将油气水界面的变迁与圈闭发育史相结合,避免了脱离地质背景和圈闭形成条件而单纯依据某些地球化学指标分析成藏期的片面性。邓良全等^[32]运用油气水界面追溯法对塔中4油田的成藏期进行了研究,认为TZ4油田主要形成于晚海西期。赵靖舟^[33,34]根据油气水界面追溯法分析的结果,认为塔里木盆地目前发现的古生界海相油藏主要形成于晚海西期,中生界油藏则多是古生界油藏在喜马拉雅运动期发生调整形成的次生油藏。

“九五”以来,油气藏成藏期研究新方法在我国若干盆地得到了一定的应用,逐渐形成了一系列的技术方法。由于叠合盆地油气藏形成具有较大的复杂性,在成藏期研究工作中需要重视基础地质工作,传统方法(圈闭形成期、生烃史)是进行新技术应用的基础,是不容忽视的。地球化学技术方法与地质背景相结合,传统方法与新方法相结合,定性与定量方法相结合,是今后油气成藏期研究的发展方向。

参 考 文 献

1 张厚福,张万选.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,

1990. 187~199

Zhang Houfu, Zhang Wanxuan. Petroleum Geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing Press, 1990. 187~199

2 李志军,李斌,陈辉. 台南凹陷构造演化与成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 53~56

Li Zhijun, Lin Bin, Chen Hui. Tectonic evolution and pool-forming regularity in Tainan Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(1): 53~56

3 王屿涛,谷斌,王立宏. 准噶尔南缘油气成藏聚集史[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(4): 291~294

Wang Yutao, Gu Bin, Wang Lihong. Pool-forming history of oil and gas in south margin of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(4): 291~294

4 王庭斌. 中国气田的成藏特征分析[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 103~110

Wang Tingbin. Reservoir characteristic analysis of gasfields in China [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 103~110

5 陈刚,赵重远,李丕龙,等. R_o 反演的盆地热史恢复方法与相关问题[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 343~347

Chen Gang, Zhao Zhongyuan, Li Pilong, et al. R_o inversion of thermal history reconstruction in sedimentary basin and its related problems[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 343~347

6 周中毅,潘长春. 沉积盆地占地温测定方法及其应用[M]. 广州:广东科技出版社,1992

Zhou Zhongyi, Pan Changchun. Paleotemperature analysis methods and their application in sedimentary basins[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing Press, 1992

7 郭仁炳. 塔里木盆地北部两类油气藏成藏问题初探[A]. 见:康玉柱,陆青,编. 塔里木盆地油气勘查文集[C]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,1994. 73~80

Guo Renbing. Preliminary study on the pool-forming problems of two types reservoir in northern Tarim Basin [A]. In: Kang Yuzhu, Lu Qing, eds. Papers of the petroleum exploration in the Tarim Basin [C]. Urumqi: Xinjiang People Publishing Press, 1994. 73~80

8 Standing M B. Volumetric and phase behavior of oilfield hydrocarbon systems[M]. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1952

9 Cubitt J M, England W A. 油藏地球化学[M]. 王铁冠,张枝焕,译. 北京:石油工业出版社,1997

Cubitt J M, England W A. Oil reservoir geochemistry[M]. Translated by: Wang Tieguan, Zhang Zhihuan. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997

10 England W A. The organic geochemistry of petroleum reservoirs[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16: 415~425

11 England W A, Mackenzie A S. Geochemistry of petroleum reservoir [J]. Geologische Rundschau, 1989, 78: 291~303

12 Burrus R C. Hydrocarbon fluid inclusion in studies of sedimentary diagenesis[A]. In: Hollister R S, Crawford M L, eds. Fluid inclusion: application to petrology[C]. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, 1981, 6: 138~156

13 Burrus R C, Cercone K R, Harris P M. Timing of hydrocarbon migration: evidence from fluid inclusions in calcite cements, tectonics

- and burial history[J]. SEPM Special Publication, 1985, 26: 277-289
- 14 Eadington P J, Hamilton P J, Bai G P. Fluid history analysis—a new concept for prospect evaluation[J]. The APPEA Journal, 1991, 31(1): 282-294
 - 15 张金亮. 利用流体包裹体研究油藏注入史[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1998, 13(4): 5-8
Zhang Jinliang. Application of fluid inclusions to study of oil reservoir filling history[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1998, 13(4): 5-8
 - 16 Shepherd T J, Darbyshire D P F. Fluid inclusion Rb-Sr isochrons for dating mineral deposit[J]. Nature, 1981, 290(5 807): 578-579
 - 17 周雯雯, 张伏兰. 珠三坳陷有机包裹体应用研究[J]. 岩石学报, 2000, 16(4): 677-686
Zhou Wenwen, Zhang Huolan. Study on application of organic inclusions in Zhu III depression[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(4): 677-686
 - 18 Karlsen D, Nedkvitne T, Larte S R, et al. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(14): 3 641-3 659
 - 19 Lisk M, George S C, Summons R E, et al. Mapping hydrocarbon charge histories: detailed characterization of the South Pepper oil field, Carnarvon Basin[J]. The APPEA Journal, 1996, 36(1): 455-463
 - 20 George S C, Greenwood P F, Logan G A, et al. Comparison of Palaeo oil charges with currently reservoired hydrocarbons using molecular and isotopic analysis of oil-bearing fluid inclusions: Jabinu oil field Timor Sea[J]. The APPEA Journal, 1997, 37(Part I): 490-502
 - 21 George S C, Frieger F W, Eadington P J, et al. Geochemical comparison of oil-bearing fluid inclusions and produced oil from the Toro sandstone, Papua New Guinea[J]. Organic Geochemistry, 1997, 26(3-4): 155-173
 - 22 周凤英, 张水昌. 塔里木盆地轮南地区轮南2井油藏的注入史研究——来自流体包裹体的证据[J]. 岩石学报, 2000, 16(4): 670-676
Zhou Fengying, Zhang Shuichang. Study on discharge history of well LN2 in Lunnan area, Tarim Basin: the evidence from fluid inclusion[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(4): 670-676
 - 23 潘长春, 傅家谟, 盛国英. 塔里木库车坳陷含油、气储集岩连续抽提和油、气包裹体成分分析[J]. 科学通报, 2000, 45(增刊): 2 750-2 757
Pan Changchun, Fu Jiamo, Sheng Guoying. Sequence extraction of oil & gas bearing reservoir rocks and the component analysis of oil & gas inclusion in Kuqa depression, Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(S0): 2 750-2 757
 - 24 Saigal G, Bjorlykke K, Larter S. The effect of oil emplacement on diagenetic process—example from the Fulmar reservoir sandstone, central North Sea[J]. AAPG Bull, 1993, 77(1): 68-80
 - 25 Hogg A J C, Hamilton P J, Maccintyre R M. Mapping diagenetic fluid flow within a reservoir: K-Ar dating in the Alwyn area (UK North Sea)[J]. Marine Petroleum Geology, 1993, 10(2): 279-294
 - 26 Glasmann J R, Clarke R A, Larter S, et al. Diagenesis in the Bergen High area, North Sea: relationship to hydrocarbon maturation and fluid flow, Brent sandstone[J]. AAPG Bull, 1989, 73: 1 341-1 360
 - 27 王飞宇, 郝石生, 雷加锦. 砂岩储层中自生伊利石定年分析油气藏形成期[J]. 石油学报, 1998, 19(2): 40-43
Wang Feiyu, Hao Shisheng, Lei Jiajin. The Isotopic dating of authigenic illite and timing of hydrocarbon fluid emplacement in sandstone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 40-43
 - 28 张有瑜, 罗修泉. 油气储层自生伊利石 K-Ar 同位素年代学研究现状与展望[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 231-236
Zhang Youyu, Luo Xiuquan. K-Ar isotopic chronological study of authigenic illite in reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 231-236
 - 29 Jacob H. Disperse solid bitumen as an indicator for migration and maturity in prospecting for oil and gas[J]. Erdol und Kohle, 1985, 38: 364-366
 - 30 肖贤明, 刘德汉, 傅家谟, 等. 应用沥青反射率推算油气生成与运移的地质时间[J]. 科学通报, 2000, 45(19): 2 123-2 127
Xiao Xianming, Liu Dehan, Fu Jiamo, et al. Dating hydrocarbon generation and migration by means of bitumen reflectance[J]. Chinese Science Bull, 2000, 45(19): 2 123-2 127
 - 31 Karweil J. Die metamorphose der kohlen vom standpunkt der physikalischen chemie[J]. Z Dentsch Geol Ges, 1955, 107: 132-139
 - 32 邓良全, 刘胜, 杨海军. 塔中隆起石炭系油气成藏期研究[J]. 新疆石油地质, 2000, 21(1): 23-27
Deng Liangquan, Liu Sheng, Yang Haijun. Study on periods of hydrocarbon formation reservoirs of Carboniferous in Tazhong Uplift[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(1): 23-26
 - 33 赵靖舟. 油气水界面追溯法与塔里木盆地海相油气成藏期分析[J]. 石油勘探与开发, 2000, 28(4): 53-56
Zhao Jingzhou. Timing marine petroleum accumulation in the Tarim Basin by oil/gas-water contact retrospecting[J]. Petroleum Exploration & Development, 2000, 28(4): 53-56
 - 34 赵靖舟. 油气水界面追溯法——研究烃类流体运聚成藏史的一种重要方法[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 373-378
Zhao Jingzhou. Oil/gas-water contact retrospecting—an important method for studying the hydrocarbon fluid migration and accumulation[J]. Earth Science Frontier, 2001, 8(4): 373-378

(编辑: 李树森)