

油气成藏期研究方法和进展

李建华¹, 范柏江¹, 耿辉²

1. 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 北京 102249
2. 中国石油天然气集团公司东方地球物理勘探有限公司研究院, 河北涿州 072750

摘要 油气成藏期研究是油气藏乃至含油气系统研究的关键问题之一,也是含油气盆地油气藏形成与分布规律研究首先研究和解决的重要问题。传统的成藏期分析方法是通过盆地的构造发育史、圈闭形成史、烃源岩生排烃史的研究,根据油源岩的主生油期、圈闭形成期、油藏饱和压力分析油气藏形成期,属于间接确定油气成藏期的方法。近年来,石油地质、地球化学等学科的发展以及技术方法的改进,为油气成藏期研究提供了更多的技术手段,主要包括流体历史分析方法、油藏地球化学方法、油储磁性矿物古地磁定年、油田卤水碘同位素定年、成藏门限分析等。本文阐述了成藏期研究的方法及其优缺点,并讨论了成藏期研究的发展方向。

关键词 成藏期;流体包裹体;成岩矿物;油藏地球化学;成藏门限

中图分类号 TE112

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)22-0106-06

Analysis Methods and Progresses of Dating of Hydrocarbon Accumulation

LI Jianhua¹, FAN Bojiang¹, GENG Hui²

1. Basin & Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Research Institute; Bureau of Geophysical Prospecting Company Limited, China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072750, Hebei Province, China

Abstract The dating of hydrocarbon accumulation is a key issue in the research of hydrocarbon reservoirs, or even of petroleum systems and it is very important for the hydrocarbon reservoir formation and distribution in petroliferous basins. Based on the structural history, trap evolution, and hydrocarbon generation and expulsion, the traditional analysis methods including the analysis of hydrocarbon generation dating of source rocks, trap formation dating and reservoir saturation pressure are applied to determine the dating of hydrocarbon accumulation. They all are indirect methods. Recently, with the development of petroleum geology and geochemistry and the progresses of technology, new methods were proposed and applied for the dating of hydrocarbon accumulation, including the analysis of fluid inclusion, reservoir geochemistry and hydrocarbon accumulation threshold. They can qualitatively or quantitatively date hydrocarbon accumulation with results more reliable than those obtained by using the traditional methods. This paper reviews the basic principles of various new and traditional methods for hydrocarbon accumulation dating. The development trend of the studies of hydrocarbon accumulation dating is also briefly discussed.

Keywords timing of hydrocarbon accumulation; fluid inclusions; diagenetic minerals; reservoir geochemistry; accumulation threshold

0 引言

油气成藏期研究是油气藏乃至含油气系统研究的关键问题之一,是含油气盆地油气藏形成与分布规律研究首先研究和解决的重要问题。传统的成藏期分析方法是通过盆地的构造发育史、圈闭形成史、烃源岩生排烃史的研究,根据烃源

岩的主生油期、圈闭形成期、油藏饱和压力来分析油气藏形成期,属于间接确定油气成藏期的方法^[1-4]。中国许多含油气盆地的油气地质条件复杂,特别是西部复杂叠合盆地具有多套烃源层、多个烃源区、多期油气生成、多个油气系统控油、多期油气成藏同时又遭受多期改造破坏的特点^[5],仅从上述

收稿日期: 2010-07-2; 修回日期: 2010-11-07

作者简介: 李建华, 博士研究生, 研究方向为油气成藏机制与资源评价, 电子信箱: ljh9521018@sina.com

间接推断的方法难以准确认识油气藏形成期次和演化史。因此,需要采用更直接、更精确的方法研究油气成藏期。20世纪80—90年代,油气成藏期研究在国内外取得重要的进展和突破,一些新的分析技术和研究方法相继出现,例如储层成岩作用分析、流体包裹体分析、储层固体沥青分析、成岩矿物定年等。这些方法、技术始终贯穿流体历史分析的思想,即以烃源岩所形成的烃类流体为研究主线,以烃源岩、储集层、圈闭、运移路径等静态条件为研究对象,直接或间接寻找记录了油气从生成至最终成藏的证据,将有机岩石学、成岩矿物地质年代学、有机地球化学等实验研究与构造发展史、埋藏史、热演化史、沉积成岩史等地质历史分析相结合,研究烃类流体的运聚历史和过程,定性或定量判定油气成藏时间^[6]。近几年来,油储磁性矿物定年、油田卤水碘同位素定年、油藏地球化学和成藏门限分析等新方法被应用到成藏期次研究中,并取得了一定的效果。但是,油气成藏时期研究的各类方法本身还存在一定的缺陷和不足,影响了各种研究方法的应用效果。因此,油气成藏期次的研究需要加强以下几个方面研究:进一步加强基础研究,不断完善各种技术手段的理论基础;加强直接化石记录的利用;加强宏观研究与微观研究的紧密结合;加强定量分析技术的研究,不断提高成藏期研究的精确度;加强新方法的研究;加强各种技术手段的综合研究。

1 传统研究方法

1.1 根据圈闭发育史确定成藏期

油气藏的形成是烃类流体在圈闭中聚集的结果,油气成藏期只能与圈闭的形成时期相当或晚于该时期,确定了圈闭的形成时期就确定了形成油气藏的时间下限,即油气藏形成的最早时间。根据地层层序关系、古构造等方面的研究,绘制圈闭发育演化的平面和剖面图是该方法的分析基础^[1]。

该方法简便易行,但只能给出大致的成藏时间范围或成藏的最早时间,无法确定具体的成藏年代。就中国复杂的叠合含油气盆地而言,盆地的不同演化阶段预示着圈闭的不同发育阶段,而油气注入的滞后性决定了圈闭的形成期只能为油气注入的最早时间,对油气成藏期精确厘定存在困难。

1.2 根据源岩主生排烃期确定成藏期

油气藏的最终形成是油气生成、运移、聚集的结果,源岩中油气的生成并排出时期是油气藏形成的时间下限。在地温梯度高的快速沉降盆地,如前陆盆地,烃源岩达到主要生、排烃期的时间早;相反,在地温梯度低的缓慢沉降盆地,烃源岩达到主要生、排烃期的时间较晚。因此,准确获得烃源岩层位和烃源灶的展布、古地温变化、埋藏史和生排烃史等是该方法的关键。

该方法在确定油气成藏期时遇到较大困难,主要有3个原因:① Tissot等^[2]对世界大型含油气盆地的生油情况进行分析后认为,快速生油大约需要5~10Ma的时间,而慢速生油可能需100Ma或更长的时间,因此该方法对成藏期的确定有明

显的滞后性;②由于含油气盆地中绝大多数探井位于构造的高部位或隆起带,可能的生油拗陷则缺少探井系统钻揭;③中国的叠合盆地中存在多套烃源岩,且烃源岩具有分期分区成熟的特点。因此,许多情况下烃源岩的主生油期与现今保存油藏的有效成藏期并非一致。

1.3 根据油藏饱和压力确定成藏期

在饱和压力情况下,油气藏地层压力与饱和压力相等。油气藏形成之后,若饱和压力没有发生变化,则可根据饱和压力推断油气藏形成时的埋深,然后根据埋藏史进一步确定成藏地质时间。地壳上所有的油藏都含有天然气且大量油藏被气体饱和或接近饱和,因此该方法也被应用于油气成藏期的研究^[1]。

该方法是直接研究油气成藏期的方法,其应用必须具备2个前提条件:①油气藏内都充有气体,且都是在饱和压力条件下形成;②油气藏为一个完全封闭的体系,内部理想气体的压力、体积和温度条件无变化。显然,理论基础的局限性限制了该方法的广泛应用,其仅适用于构造稳定、充注期次单一的单旋回盆地,且油气藏无压力异常。但是,中国叠合盆地的油气藏在形成后,均不同程度地经历了构造抬升运动,造成油气藏内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发生改变;多次的油气注入也使早期油气藏的饱和压力或露点压力发生变化。这些因素使该方法带有很大的不确定性。因此,中国的复杂叠合盆地难以应用该方法。

1.4 油气水界面追溯法

一般情况下,规则油气藏的油水界面或气水界面为一水平的界面(不规则岩性油气藏与水动力油气藏除外),这类油气藏在最初形成时油气水界面一般也呈水平状态,因后期构造变动等影响,油气水界面可能发生迁移,至构造稳定期又重新演变为水平界面。因此,可通过对已知油气藏油气水界面演变史的分析,追溯古油气藏的油气水界面,即在地质历史上最早形成水平界面的时间就为该油气藏的成藏时间。具体方法为:在编制构造发育史剖面的基础上,计算现今油气水界面在各对应构造演化时期的古埋深,将其标于相应时期的古构造剖面图上;将同一油藏各井的古油气水界面埋深进行连线,则水平界面(水平直线)最早出现的时间即代表了油气藏的开始形成时间^[3-4]。

该方法的优点是简便、直观,且成本远低于其他的油藏地球化学方法、流体包裹体方法和同位素年龄测定法,尤其是将油气水界面的变迁与圈闭发育史相结合,避免了单纯依据某些地球化学指标而脱离地质背景和圈闭发育历史进行成藏年代分析的弊端。

2 新研究方法

2.1 流体历史分析方法

2.1.1 储层成岩作用分析

烃类流体注入储集层后,储层内的孔隙流体与矿物之间

的反应会受到抑制或完全中止。如烃类流体注入储集层后,储集层中石英的次生加大作用受到抑制,方解石和白云石的形成基本中止,而伊利石会完全停止生长^[7-8]。从油藏中油气层至水层的系列样品分析,根据成岩矿物,特别是胶结物和自生矿物形成特征的差异可估计油气充填储集层的时间。

王飞宇等^[9]认为油气成藏过程是否有烃类流体包裹体记录,关键受储集层中含油饱和度、地层水的流动或介质条件的影响。对于储集层中石油的注入如何影响成岩作用(特别是胶结作用)的速率,目前仍缺乏明确的认识。因此,该方法一般多用于成藏期的定性研究。

2.1.2 储层固体沥青分析

固体沥青是油气的伴生产物中最早用来寻找油气藏的标志。原油的脱沥青作用包括气体脱沥青、重力分异、生物降解、油藏内部或疏导层内的热演化、原油混合、热对流作用6种成因类型^[10-12]。储层固体沥青可视作一类特殊的“成岩矿物”,作为油藏中石油蚀变的产物,记录了油藏被改造、破坏的信息。其反射率反应了烃类流体转变为固体沥青后所经历的热历史。所以,从储层固体沥青反射率、沥青反射率化学反应动力学结合储层埋藏史和热演化史定量分析,可确定油藏破坏的时间。另外,储层固体沥青中含有一定数量的铀矿物,利用同位素地质年代学方法可确定固体沥青形成的绝对地质年龄^[13]。

该方法能够确定油气藏形成的时间上限,对于晚期成藏、单期改造的油气藏适用;对于受到多期改造破坏的油气藏(如中国叠合盆地的油气藏)适用性较差或者基本不适用。

2.1.3 流体包裹体定年

流体包裹体是指成岩自生矿物在结晶生长过程中被包裹在矿物晶格的缺陷或窝穴中的成矿流体。流体包裹体形成后,由于无外界物质进入和自身流体外溢,是一个“封闭”的环境,记录了烃类流体和孔隙水的性质、组分、物化条件和地球动力学条件。流体包裹体定年分析可分为两个层次:①相对定年,主要是运用储层流体包裹体均一化温度结合埋藏史与热历史等资料确定油气运移时间和成藏期^[14],这是目前成藏期分析的常见方法;②绝对定年,即通过 Rb/Sr 法和 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 法流体包裹体定年分析获得其绝对地质年龄^[15-16],目前常用的绝对定年分析对象是石英、方解石及其他胶结物。

国内的流体包裹体相对定年研究较为普遍^[17-19],而流体包裹体绝对定年则普遍用于矿床学的研究,在油气成藏期方面的运用极少。主要原因是:地下储层中流体包裹体过于细小,一般小于 10 μ m(多数小于 5 μ m)而难以被发现;普遍存在的多期流体包裹体共存使得年龄的确定困难,这也制约了流体包裹体相对定年的进一步发展;流体包裹体绝对定年制样方法过于复杂。流体包裹体相对定年分析的可靠性取决于流体包裹体均一化温度可靠性、埋藏-热演化史准确性两个方面。如何根据流体包裹体均一化温度确定其捕获温度仍然是一个尚未明确认识的重要问题,不同期次、均相捕获与非均相捕获流体包裹体对于确定油气成藏期至关重要。

2.1.4 成岩矿物定年

20 世纪 80 年代后期,利用储集层中自生矿物同位素年代学分析烃类进入储集层的时间是在国际上逐步发展起来的^[20-21]。其基本原理是,当烃类流体注入储集层后,储集层中自生矿物的形成作用便会中止。伊利石和伊/蒙混层是分析黏土样品的主要组成矿物,储集层中自生伊利石仅在富钾的水介质环境下形成。因此,砂岩储集层中自生伊利石是烃类注入储集层之前形成的,油气进入储集层后伊利石的形成过程便会停止。伊利石同位素年龄给出了油气藏形成期的最大地质年龄。一般情况下,烃类充填储集层的时间应略晚于自生伊利石的同位素年龄。根据平面和剖面上自生伊利石的同位素年龄分布,可以判断其成藏的速度以及烃类流体的运移方向。另一方面,油气注入储层导致钾长石的钠长石化作用停止,钾长石测年技术在近年来也逐渐发展起来^[22-24]。

成岩矿物定年技术应用于成藏期分析时也遇到一些困难:①自生伊利石的分离比较困难,如早期形成的伊利石粒径较大、晚期形成的粒径小,而颗粒的大小影响伊利石的分离纯度;②自生伊利石的生长过程并非在整个成岩过程都均匀连续,储层中流体的特征是控制伊利石生长的重要因素;③储层伊利石同位素年龄仅限定了早期成藏事件的最早地质年龄,而实际成藏期要晚于这一地质年龄;④当自生伊利石形成于多个成岩时期时,利用该方法确定成藏期也存在困难。

2.2 油藏地球化学方法

由于生烃过程的差异、重力分异与差异聚集、扩散与氧化等作用的影响^[25],地层中即使同一种相态的烃类,其物理性质和化学性质也存在很大差异。油藏地球化学技术的新发展为油气成藏期的厘定提供了新的方法和技术手段。油藏地球化学方法是基于油藏地球化学特征和油藏非均质性的成因认识,通过研究油藏非均质性与成藏期次或充注期次、充注方向及生烃灶的联系,认为油气藏内烃类流体的非均质性是成藏史或充注史的重要反映。它是确定油气藏的成藏期次或注入期次的一种最直接、有效的方法。油藏地球化学方法确定成藏期主要表现在 3 个方面^[26-28]:①油气族群的划分和精细的油气源对比,可以建立不同油气与烃源灶的对应关系,从而结合生烃史推测油气的充注时期;②根据分子地球化学成熟度参数,包括油气总体特征的物性参数,碳同位素特征,常规烷烃类参数,芳烃类的萘系列、菲系列、联苯系列、二苯并噻吩系列参数,轻烃组分成熟度指标和 C7 温度计等,准确获得储层中油气的热成熟度,通过烃类流体与源岩成熟度演化的对比分析,可以更精确地确定油气的成藏时间;③从油气藏地球化学特征的非均质性推断储集层中烃类流体的充注历史、判断烃类的注入方向和注入时间,并结合油水界面的位置及其变迁历史,阐明油气藏的演化史。这 3 方面的地化研究结合起来,对于综合识别油气成藏的精确年代具有重要意义。

2.3 油储磁性矿物古地磁学定年

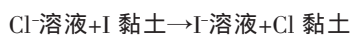
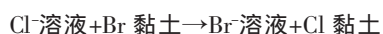
古地磁学通过测定岩石中保存的剩余磁性追溯过去历

史的地磁场。其理论依据为:多数矿床含有磁铁矿、磁黄铁矿等矿物,可以保存矿化时的磁性记录,其磁化强度和方向可以随温度和化学条件的变化而变化。而在油气成藏过程中,渗透的烃类物质与硫酸盐还原菌的作用、烃类的生物降解作用、原油的微生物氧化和硫酸盐还原等作用会导致磁铁矿等矿物的形成,油藏的抬升氧化则可引起次生赤铁矿形成,此时磁铁矿和磁黄铁矿沉淀作用基本中止。因此,通过对储层自生磁性矿物的古地磁学分析,结合地磁极性年代表,可界定烃类流体的运聚时间^[29-31]。磁性地层学的研究目前已成为地层学重要的组成部分,特别是5Ma以来磁性年代表的建立,推动了近晚期地层学和地质年代学的发展。储集层自生磁性矿物的古地磁学分析,对近晚期成藏时间的精确厘定起巨大推动作用。

应用古地磁学方法厘定石油运聚期的前提条件是必须了解储层中磁性矿物(磁铁矿、磁黄铁矿、赤铁矿等)成因与烃类流体运聚的相关关系。而在某些情况下,储集层中磁性矿物的形成并非是由烃类流体(如热水流体)充注引起,因此区分其成因机制对于油气成藏期的厘定至关重要。

2.4 油田卤水碘同位素定年

在一般地质条件下,沉积物中残留下来的溴化物、碘化物含量与沉积物中有机质的含量成正比。因为含油气盆地沉积物中含有大量能吸附溴、碘的有机质,有机质所吸附的大量溴、碘,在有机质裂解生成石油的同时也被释放出来而进入油气和石油伴生水中,这势必造成生油岩中的溴、碘浓度比其他岩石高^[32]。在地下流体中,溶液中的Cl⁻能交换出黏土矿物中的Br⁻和I⁻,从而使得地下流体中富集Br⁻和I⁻。其反应方程式为



在各种生物化学作用和黏土矿物的离子交换反应形成的溶液中,富集的Br⁻和I⁻最终会与油气一起因成岩压实作用排放到盆地地下水中,并逐渐在具有高渗透性的储集层中汇集。在成藏期的厘定运用方面,常见的是利用卤水碘同位素进行分析^[33-34]。由于碘同位素的半衰期大致为15.7Ma,可将¹²⁹I/¹²⁷I比值用于80Ma地质时间范围的相关定年分析,尽管这种定年分析的精确度还不够高,但它提示了烃类流体的运聚方式,对油气成藏期的研究仍具有一定价值。碘同位素的定年技术成熟、成本低廉是其一大优势。而且油田卤水定年技术的进一步发展,将获得地下流体的驻留时间和烃类从卤化源岩排烃的时间。因此,卤水碘同位素定年还存在更大的发展空间。

2.5 利用成藏门限确定油气成藏期

油气自形成后就处于连续的散失和聚集的动平衡之中,油气自烃源岩生成到油气聚集于圈闭形成油气藏的过程中,要发生大量的损耗。从物质平衡的角度来看,油气藏形成的首要条件是生成的油气大于损耗的油气。成藏门限是指油气成藏体系内形成具有工业价值油气藏的过程中所必须损耗

的最小烃量^[35-36],即油气开始聚集成藏的临界地质条件,满足这一条件,油气开始聚集成藏。

利用成藏门限研究可以确定油气成藏时间。随着源岩埋深加大,生烃量逐渐增加,成藏体系内各种损耗烃量也逐渐增加。当生烃量满足了各种损耗需要后,即进入成藏门限,成藏体系内开始有油气聚集。因此,可以将进入成藏门限的时刻作为成藏体系内油气成藏的最早时间。

油气成藏门限的研究实质是生成烃量、损耗烃量及其变化历史的研究。首先,在剖析区域地质条件的前提下,对成藏体系进行划分。盆地演化过程中,形成并不断演化的油气聚集带,及其与一套或多套供油气源的有机组合称之为油气成藏体系^[37]。其次,在对源岩、盖层、储层和围岩进行剖析的基础上,确定温度、压力等条件,研究其形成演化史,测定吸附、水溶、油溶和扩散等造成的油气损耗量或相关参数,找出各类损耗烃量的主控因素以确定定量关系模式。然后,依据物质平衡原理和回剥模拟计算方法,模拟计算源岩生烃总量和耗散烃总量。最后,进行油气成藏门限的判识与临界地质条件的恢复。

“油气成藏门限”以油气聚集的构造或圈闭的形成、演化为主线,以烃源岩形成、分布与演化规律为基础,强调损耗烃量的模拟,最终恢复油气成藏的临界地质条件。该方法在中国叠合盆地的研究中取得显著效果。

3 展望

尽管成藏期研究取得了重大的进展,但其仍然是油气成藏研究的薄弱环节。原因在于:①油气成藏时期研究的方法均基于不同的理论基础,而这些理论本身可能还存在着一定的缺陷、不足及争议。本文所述各种技术、方法均有其缺点,势必会影响各种研究方法的利用前景。②含油气盆地的地质演化历史过程十分复杂,尤其是中国复杂叠合含油气盆地具有多期次构造变革、多套生储盖组合、多旋回油气成藏、多期次调整与改造的油气地质特点,目前的各种技术、方法不能完全解决油气成藏期研究所遇到的各种问题。

综观油气成藏期研究的各种技术方法,可以看出其未来发展方向主要体现在以下几个方面:

- 1) 进一步加强基础研究,不断完善各种技术方法的理论基础。
- 2) 充分利用油气成藏过程直接化石记录。
- 3) 宏观研究与微观研究日趋紧密结合。可以通过圈闭发育史和主生、排烃期从宏观角度大致判断油气成藏期的范围,而流体历史分析、油藏地球化学则从微观角度对油气成藏期进行厘定,加强宏观与微观的研究是今后确定油气成藏期的必然趋势。
- 4) 由定性分析向定量研究发展、不断提高成藏期研究的精确度。成藏期定量研究技术有了很大发展,包括储层固体沥青分析、流体包裹体定年、成岩矿物定年、油藏地球化学、油储磁性矿物古地磁学和油田卤水碘同位素定年。而样品的

质量是这些定量技术应用的关键,必须采用更好的技术手段确保能够提取到与烃类流体运聚有密切关系的样品,否则这些技术所得结果的精度将受到严重影响。

5) 加强各种技术手段的综合研究。由于技术方法本身的缺陷,每种成藏期研究方法都有其适应条件和使用范围,只有加强不同技术方法的综合研究才能适应复杂的油气地质条件,特别是对中国的复杂叠合盆地成藏期研究。“油气成藏门限”方法就是不同技术方法综合应用的例子。

6) 开发新的油气成藏期研究方法。庞雄奇提出“功能要素组合控油气分布模式”,为预测油气藏分布有利区的一种新方法。该模式认为控制油气藏形成和分布的各个功能要素(烃源岩、有利沉积相、区域盖层、古隆起、低界面势能和裂缝)在地史时期的联合作用控制着不同类型油气成藏的时间^[5,38-39]。该模式为油气成藏期的研究提供了新的思路和方法。

参考文献 (References)

- [1] 张厚福,方朝亮,张枝焕,等.石油地质学[M].北京:石油工业出版社,1999.
Zhang Houfu, Fang Zhaoliang, Zhang Zhihuan, et al. Petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [2] Tissot B, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- [3] 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):373-377.
Zhao Jinzhou. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 373-377.
- [4] 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,2001,28(4):55-58.
Zhao Jingzhou. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(4): 55-58.
- [5] 庞雄奇,罗晓容,姜振学,等.中国西部复杂叠合盆地油气成藏研究进展与问题[J].地球科学进展,2007,22(9):879-887.
Pang Xiongqi, Luo Xiaorong, Jiang Zhenxue, et al. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 879-887.
- [6] 金之钧,张一伟,王捷,等.油气成藏机理与分布规律[M].北京:石油工业出版社,2003:22-48.
Jin Zhijun, Zhang Yiwei, Wang Jie, et al. Hydrocarbon accumulation mechanisms and oil/gas distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003, 22-48.
- [7] Hogg A J C, Hamilton P J, Macintyre R M. Mapping diagenetic fluid flow within a reservoir: K-Ar dating in the Alwynarea (UK NorthSea)[J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10: 279-294.
- [8] Wang F Y, Zhang S C, Liang D G. A history of multiple period petroleum accumulation in Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. Bulletin of the American Association Petroleum Geology, 2000, 84(9): 1511-1512.
- [9] 王飞宇,庞雄奇,曾花森,等.古油层识别技术及其在石油勘探中的应用[J].新疆石油地质,2005,26(5):565-569.
Wang Feiyu, Pang Xiongqi, Zeng Huasen, et al. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(5): 565-569.
- [10] 肖贤明,刘德汉,傅家漠,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):2123-2127.
Xiao Xianming, Liu Dehan, Fu Jiamo, et al. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(19): 2123-2127.
- [11] 孙玉赵,赵孟军,杨帆.由沥青产状及地球化学特征分析碳酸盐岩油藏的成藏期次[J].新疆石油地质,1999,20(5):394-396.
Sun Yushan, Zhao Mengjun, Yang Fan. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(5): 394-396.
- [12] Parnell J. Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins [M]. London: Geological Society Special Publication, 1994.
- [13] Parnell J, Swainbank I. Pb-Pb dating of hydrocarbon migration to a bitumen-bearing ore deposit, North Wales [J]. Geology, 1990, 48(10): 1028-1030.
- [14] Hazeline R S, Samson I M, Cornford C. Dating diagenesis in a petroleum basin, a new fluid inclusion method[J]. Nature, 1984, 307: 284-287.
- [15] 李华芹,刘家齐.热液矿床流体包裹体年代学研究及其地质应用[M].北京:地质出版社,1993.
Li Huaqin, Liu Jiaqi. Fluid inclusion chronological study of hydrothermal and its application[M]. Beijing: Geological Publication House, 1993.
- [16] Brannon J C, Cole S C, Podosek F A. Th-Pb and U-Pb dating of ore stage calcite and Paleozoic fluid flow[J]. Nature, 1996, 217: 491-493.
- [17] 陶士振,刘德良,杨晓勇,等.塔里木盆地叶城凹陷成岩包裹体及其油气意义[J].石油学报,1998,19(3):38-45.
Tao Shizhen, Liu Deliang, Yang Xiaoyong, et al. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(3): 38-45.
- [18] 潘长春,周中毅,解启来.油气和含油气包裹体及其在油气地质地球化学研究中的意义[J].沉积学报,1996,14(4):15-23.
Pan Changchun, Zhou Zhongyi, Xie Qilai. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(4): 15-23.
- [19] 纪学雁,舒萍,曲延明,等.流体包裹体在庆深气田火山岩气藏研究中的应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(4):739-743.
Ji Xueyan, Shu Ping, Qu Yanming, et al. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(4): 739-743.
- [20] Hamilton P J, Kelly S, Fallick A E. Isotopic constraints on diagenetic processes 1. Radiometric dating of illite in hydrocarbon reservoirs [J]. Clay Miner, 1989, 24: 215-231.
- [21] 王飞宇,郝书生,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. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2): 40-43.
- [22] Liewig N, Clauer N, Sommer F. Rb-Sr and K-Ar dating of clay diagenesis in Jurassic and stone oil-reservoir, North Sea [J]. Bulletin of the American Association Petroleum Geology, 1987, 71: 1461-1474.
- [23] 白国平.伊利石 K-Ar 测年在确定油气成藏期中的应用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2000,24(4):100-103.
Bai Guoping. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2000, 24(4): 100-103.
- [24] 间建萍,刘池洋,郭桂红.松辽盆地扶杨油层油气成藏期次和时限确定[J].兰州大学学报:自然科学版,2008,44(5):26-29.
Jian Jianping, Liu Chiyang, Guo Guihong. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences Edition, 2008, 44(5): 26-29.
- [25] England W A, Mackenzie A S. Geochemistry of petroleum reservoirs [J]. Geol Rundsch, 1989, 78: 214-237.
- [26] 陈建渝,刘从印,张树林,等.原油中生物标志物的组成是成藏史的反映[J].地球科学:中国地质大学学报,1997,22(6):97-102.
Chen Jianyu, Liu Congyin, Zhang Shulin, et al. Earth Science: Journal China University of Geoscience, 1997, 22(6): 97-102.
- [27] 王铁冠,王春江,何发歧,等.塔河油田奥陶系油藏两期成藏原油充注比率测算方法[J].石油实验地质,2004,26(1):74-79.
Wang Tieguan, Wang Chunjiang, He Faqi, et al. Petroleum Geology &

- Experiment*, 2004, 26(1): 74-79.
- [28] 包建平, 王铁冠, 周玉琦. 甲基菲比值与有机质热演化的关系 [J]. 江汉石油学院学报, 1992, 14(4): 8-13.
Bao Jianping, Wang Tieguan, Zhou Yuqi. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1992, 14(4): 8-13.
- [29] 孟小红, 周海民. 烃类的化学吸附作用对岩石剩磁稳定性的影响[J]. 长春地质学院学报, 1997, 27(1): 67-72.
Meng Xiaohong, Zhou Haimin. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1997, 27(1): 67-72.
- [30] 李朋武, 崔军文, 高锐, 等. 柴达木地块新生代古地磁新数据及其构造意义[J]. 地球学报, 2001, 22(6): 563-568.
Li Pengwu, Cui Junwen, Gao Rui, et al. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(6): 563-568.
- [31] Perroud H, Chauvin A, Rebelle M. Hydrocarbon seepage dating through chemical remagnetization [C]//Turner P, Turner A. Paleomagnetic Application in Hydrocarbon Exploration. London: Special Publication, 1995, 98: 33-41.
- [32] Moran J E, Fehn U, Hanor J S. Determination of source ages and migration patterns of brine from the U. S. Gulf Coast basin using ^{129}I [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(24): 5055-5069.
- [33] 邵树勋, 张乾, 潘家永. 丹寨汞金矿床卤素元素与古油藏关系探讨[J]. 地质地球化学, 1999, 27(4): 23-28.
Shao Shuxun, Zhang Qian, Pan Jiayong. *Geology-Geochemistry*, 1999, 27(4): 23-28.
- [34] 孙忠军. 安达—绥化地区碘与油气关系 [J]. 物探与化探, 1993, 19(1): 78-80.
Sun Zhongjun. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1993, 19(1): 78-80.
- [35] 庞雄奇, 李丕龙, 金之钧, 等. 油气成藏门限研究及其在济阳坳陷中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 204-209.
Pang Xiongqi, Li Pulong, Jin Zhijun, et al. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 204-209.
- [36] 庞雄奇, 罗晓容, 姜振学, 等. 中国典型叠合盆地油气聚散机理及定量模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Pang Xiongqi, Luo Xiaorong, Jiang Zhenxue, et al. Hydrocarbon accumulation and dissipation mechanisms and its quantitative modeling in China's superimposed basins[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [37] 金之钧, 张一伟, 王捷, 等. 油气成藏机理与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003, 22-48.
Jin Zhijun, Zhang Yiwei, Wang Jie, et al. Hydrocarbon accumulation mechanisms and oil/gas distribution [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003, 22-48.
- [38] 庞雄奇, 高建波, 吕修祥, 等. 塔里木盆地“多元复合—过程”叠加成藏模式及其应用[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 159-166.
Pang Xiongqi, Gao Jianbo, Lv Xiuxiang, et al. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 159-166.
- [39] Wang H J, Pang X Q, Wang Z M, et al. Multiple-element matching reservoir formation and quantitative prediction of favorable areas in superimposed basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(5): 1035-1054.

(责任编辑 刘志远)



中国科学技术协会

青年科学家论坛

促进学科交叉和融合
 启迪新的学术思想
 创立新的学术观点
 培育新的学科生长

主办单位: 中国科协学会学术部
 联系单位: 中国科协学会服务中心
 联系电话: 010-62125017
 电子信箱: xshdzz@cast.org.cn