

文章编号: 0253-9985(2007)02-0143-08

油气成藏年代学研究进展

陈红汉

(中国地质大学 资源学院石油系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 总结了国内外主要油气成藏定年技术和方法, 并对其优、缺点做出了评述, 认为油气成藏年龄确定已由过去的地质间接确定方法为主, 发展到今天多种放射性同位素直接测年的新阶段; 其中, 在配备电子倍增器和 UV 激光纯化系统的高灵敏度质谱仪上, 开展流体包裹体与自生钾长石 Ar-Ar 定年相结合的方法, 实现了微区、微量和多期次油气充注精确定年, 对叠合盆地油气成藏动力学建模和次生油气藏勘探均具有重要意义。同时指出, 油气成藏年代学研究不仅需要多学科的交叉、渗透, 而且需要发展更加具有代表性的成岩矿物定年和多种定年结果相互验证, 为正确揭示不同盆地油气成藏年龄提供可靠依据。

关键词: 油气成藏年代学; 流体包裹体; 自生钾长石; Ar-Ar 定年

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Advances in geochronology of hydrocarbon accumulation

Chen Honghan

(Department of Petroleum Geology, Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei Province, 430074)

Abstract Through summarizing the dating techniques and methods commonly employed in geochronology of hydrocarbon accumulation and evaluating their advantages and disadvantages, it is suggested that the indirect dating of hydrocarbon accumulation through geological methods be replaced by direct determination of hydrocarbon charging ages through radioactive isotope approaches. By using highly sensitive mass spectrometer equipped with electron multiplier and UV laser probe system, an integrated method of fluid inclusion with Ar/Ar dating of authigenic K-feldspar overgrowth has been successfully applied in precise dating of multiple-phase hydrocarbon charging of small amount in small areas, bearing significance for the kinetic modeling of hydrocarbon migration and accumulation and the exploration of secondary reservoirs in superimposed basins. It is also worthy of note that the geochronology study of hydrocarbon accumulation needs not only the intersection and interpenetration of multiple disciplines, but also the development of more representative diagenetic mineral dating methods that could be validated by the results of many other dating techniques, thus providing reliable bases for hydrocarbon accumulation dating in different sedimentary basins.

Key words geochronology of hydrocarbon accumulation; fluid inclusion; Ar/Ar dating of authigenic K-feldspar overgrowth

1 概述

地质流体演化是一种多因素耦合的、复杂的动力学过程; 要“动态”地分析这个过程, 就必须研

究流体作用随时间的变化。过去, 学者利用各种方法确定流体流动和流体-岩石相互作用的相对时序, 或运用本构模拟的方法正演其过程, 都存在确定过程随时间的变化速率问题。只有能够测定出其流体流动和流体-岩石相互作用时间, 就

收稿日期: 2007-01-09

作者简介: 陈红汉 (1962-), 男, 教授、博士生导师, 沉积盆地含烃流体地质、成岩矿物流体包裹体系统分析

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40372068) 资助

有可能构筑更加切合实际的、可预测性的动力学演化方程。

油气从烃源岩—圈闭的成藏历史是一个漫长的微观过程。油气成藏的生—储—盖匹配关系就是从地质过程和宏观角度研究油气赋存的时—空约束条件。从烃源岩进入生烃门限“深度”，到含油气系统分析中烃源岩开始大量生烃的“关键时刻”，反映了石油地质学对“时间”概念理解的深化^[1-3]；而明确强调油气生成、运移和聚集过程随时间的演变关系^[4]，更深入研究烃源岩排烃速率、油气运聚效率以及次生成藏和叠合盆地多期成藏机制，则体现了当今油气成藏动力学研究前沿领域中的一个发展趋势——油气成藏年代学^[5]。

然而，迄今除了一些沥青中含有微量的 U-Pb、Rb-Sr 和 Sm-Nd 以及自生钾长石和伊利石等矿物中 K/Ar 和 Ar/Ar 放射性元素可供测年之外，大量与油气直接相关的低温成岩矿物，如石英、方解石、石膏、白云石等自生矿物还不能精确定年，严重制约了油气成藏年代学的发展。但随着配备电子倍增器的高灵敏度质谱仪（如 MM-1200 和 MM-3600）的问世和小型化激光纯化系统的建立^[6,7]，可实施成岩矿物的微区、微量分析，为油气成藏年代学的发展奠定了基础。

由于油气本身尚未发现可供测年的对象，传统确定油气成藏时期主要是根据构造演化的阶段性分析，结合烃源岩生烃史的方法来确定其油气成藏时期。尽管在一定程度上满足了当时的需要，但这些方法都比较粗略、以定性分析为主、缺乏直接测定依据，难以确定叠合盆地多期成藏的时期。

为此，第二届国际地质流体大会将沉积盆地和造山带流体流动和流体—岩石相互作用的定年列为一个重要主题^[8]。除了过去发展的磷灰石裂变径迹（AFTA）、流体包裹体（FI）、Rb-Sr 和 Pb-Pb 放射性同位素以及碳、氧、硫稳定同位素方法之外，还提出了根据化学再磁化作用确定与有机质成熟作用相关的烃源岩成岩过程的绝对年龄、根据烃类充满度成图方法确定油气运移的时间、运用放射性同位素（K-Ar）和稳定同位素（ $\delta^{18}\text{O}$ ）并结合埋藏史分析确定断层排替和流体运动的时间、根据自生钾长石和伊利石 K-Ar 校正年龄确定水—岩相互作用的时间、运用沉积学及成岩作用和地球化学方法结合埋藏事件综合确定流体历史的

一系列新方法。第三届国际地质流体大会集中于古地磁定年（磁铁矿、磁黄铁矿化学剩磁定年）、U-Pb 法定年，以及流体包裹体空间分布与流体历史重建^[9,10]。第五届国际地质流体大会提出了运用流体包裹体与高空间分辨（10–20 μm ）的 UV 激光剥蚀 Ar-Ar 定年结合方法，获得温度—成分—时间（T-X-t）数据来约束流体流动过程^[11]，从而真正实现了对不同期次（含烃）流体活动的定年。

2 油气成藏年代学方法

2.1 油气成藏时期确定方法

赵靖舟和李秀荣（2002）总结的油气成藏时期的确定方法有^[12]生排烃史法、圈闭形成时间法、饱和压力—露点压力法、油藏地球化学法、有机岩石学法、油气水界面追溯法和流体包裹体均一温度—埋藏史投影法。岳伏生等（2003）对这 7 种方法的有效性和不确定性给予了评述^[13]。这些方法有一个共同的特点，即均不是直接测定油气成藏的年龄，而是通过其他地质过程参数间接地确定油气的成藏时期，必然会存在诸多不确定性和误差。

2.2 油气成藏同位素年龄测定方法

2.2.1 微量和稀有金属同位素定年法

利用原油、沥青和干酪根中微量金属 U-Pb、Pb-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd 和 Re-Os 体系的同位素分析方法来获得油气生成、运移的年龄，是成熟的放射性同位素方法在石油地质学中的应用，其关键是样品中放射性同位素的富集与分离。目前只是做到了沥青和干酪根样品中放射性同位素有效分离，原油中的分离还存在困难，从而限制了该方法的推广。

John 等（1990）最早运用 U-Pb 法获得了沥青脉的形成年龄^[14]。该方法定年较其他体系的优越性是铀的两个放射性同位素为 ^{238}U 和 ^{235}U ，分别衰变成两个铅同位素子体 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 。通过这两个衰变系列，可以获得 3 个年龄值（ $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ）。这些年龄值的差异可以指示在同位素平衡以后该体系受到干扰的程度^[15,16]。

Rb-Sr、Sm-Nd 和 Re-Os 稀土元素体系在多数情况下的化学性质是不活泼的，这使得这些同位

素体系可以保持良好的封闭状态,从而可以获得古老的年龄^[17~21]。Zhang 等 (2001) 分别运用 U-Pb 法, Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法获得准噶尔盆地乌尔禾沥青、塔里木盆地志留系沥青年龄^[17~19]。

2.2.2 自生伊利石 K-Ar 定年法

原则上讲,含钾矿物均可以作为 K-Ar 定年的测定对象。因此,沉积岩中适合于测定的对象很多,如云母类、长石类、海绿石、伊利石等。但是,由于埋藏成岩作用的改造,一些含钾矿物形成以后,钾和氩的封闭体系往往被破坏,不适宜用于定年。含油气储层中自生伊利石 K-Ar 定年确定油气成藏年龄基于以下两个假设条件: 1) 自生伊利石沉淀之后钾和氩保持封闭体系,即没有钾和氩的加入,也没有钾和氩的逃逸; 2) 油气进入储层之后,伊利石沉淀便会终止,由此获得的年龄为油气成藏的最早年龄。

国外在 20 世纪 80 年代发展了该技术,并成功地应用于北海油田的成藏年龄确定^[22~24]; 国内从 20 世纪 90 年代开始运用此方法测定油气储层中自生伊利石年龄,获得了一些具有参考价值的年龄数据^[25~31],在单一成藏期次盆地,如松辽盆地大庆油田北部,与上述其他成藏时期确定结果吻合较好^[27];但在发育多期成藏的叠合盆地,如塔里木盆地哈得逊油田,则存在矛盾,运用 K-Ar 法获得的这年龄值为 290~240 Ma (二叠纪),运用包裹体均一温度 (100~120℃)-埋藏史投影法获得原油进入储层的时间为第三纪^[30]。当然,还有一种解释: 自生伊利石年龄记录的应该是最早一期油气到达哈得逊油田的油气,而储层中包裹体反映的是晚期充注的油气,只是由于我们尚不能很好地将自生伊利石与不同充注期次的油气联系起来,所以 K-Ar 法反映不了多期充注年龄。

储层中自生伊利石的生长需要富钾的碱性水介质环境。当油气注入储层后,能否使伊利石的生长终止还存在争论。Karlsen 等 (1993) 认为石油注入储层后,自生伊利石可能同石英加大作用一样并不一定终止^[32],这是因为储层常常并非 100% 地为油气所饱和,只要其中还存在孔隙水介质,各种水-岩相互作用就不会完全停止。

另外,从砂岩分离出小于 2 μm 的伊利石样品,经过高梯度强磁去杂之后也常常是混有母岩带来的伊利石,使得一些样品的测定年龄与地层

本身的年龄相当或更老。后期的绿泥石化作用也有可能造成自生伊利石中的钾、氩丢失。因此,在运用 K-Ar 法定年时要注意这一点。

2.2.3 自生伊利石 Ar-Ar 定年法

与自生伊利石 K-Ar 定年法相比,自生伊利石 Ar-Ar 法定年表现出的优势体现在: 1) 精度提高; 2) 样品用量减少; 3) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法能提供更加丰富的信息,包括矿物的缺陷、伊利石生长的多期性、受热历史等关于矿物结晶和埋藏史方面的信息。该方法的缺陷在于: 1) 由于需要进行核辐射,因而需要解决核照射带来的 Ar 原子反冲丢失; 另外,该方法测试周期长,还存在粉末样品包装和放射性安全、以及如何分离和判别自生伊利石并对其定年等一系列问题^[33]。

2.3 捕获油包裹体的自生钾长石 Ar-Ar 定年法

依据储层成岩矿物和裂纹捕获的烃类包裹体 (油包裹体、含溶解轻烃盐水包裹体) 产状、荧光颜色、均一温度以及与烃类包裹体同期的盐水包裹体均一温度、盐度系统检测,不仅能够划分油气充注期次,而且还能有效地区分这些包裹体捕获的相对序次^[34~36];再将给定今埋深样品的各期次盐水包裹体平均均一温度“投影”到标有等温线的埋藏史图上,对应于时间轴上的年龄即代表油气充注储层的年龄^[2,8,9,35]。这是当前应用最多、也最为简便的一种确定油气成藏年龄的方法。作者曾经采集东营凹陷 187 块流体包裹体样品,运用该方法获得 3 个洼陷的三期油气充注时期: 第一期 34~24 Ma, 第二期 13.8~8.0 Ma, 第三期 8.0~0 Ma^[37] (图 1)。

然而,该方法存在诸多不确定性^[38~40]: ①埋藏史图等温线需要预选获得古地温梯度; ②剥蚀厚度恢复极大地影响到埋藏史精度; ③储层中流体包裹体均一温度记录的是热流体“瞬间”温度,此温度常常高于储层在传导型温度场下的“背景”温度,由此造成“投影”获得的年龄偏年轻。对于那些发生穿层流体流动的地区,由于盐水包裹体均一温度远远高于埋藏史图上标注的最高温度,从而造成不能运用此方法获取油气充注年龄。

为此,Mark 等 (2005) 在前人成熟的钾长石 Ar-Ar 法定年^[41~44]基础之上,提出了流体包裹体分析与自生钾长石 Ar-Ar 定年相结合的方法^[45],

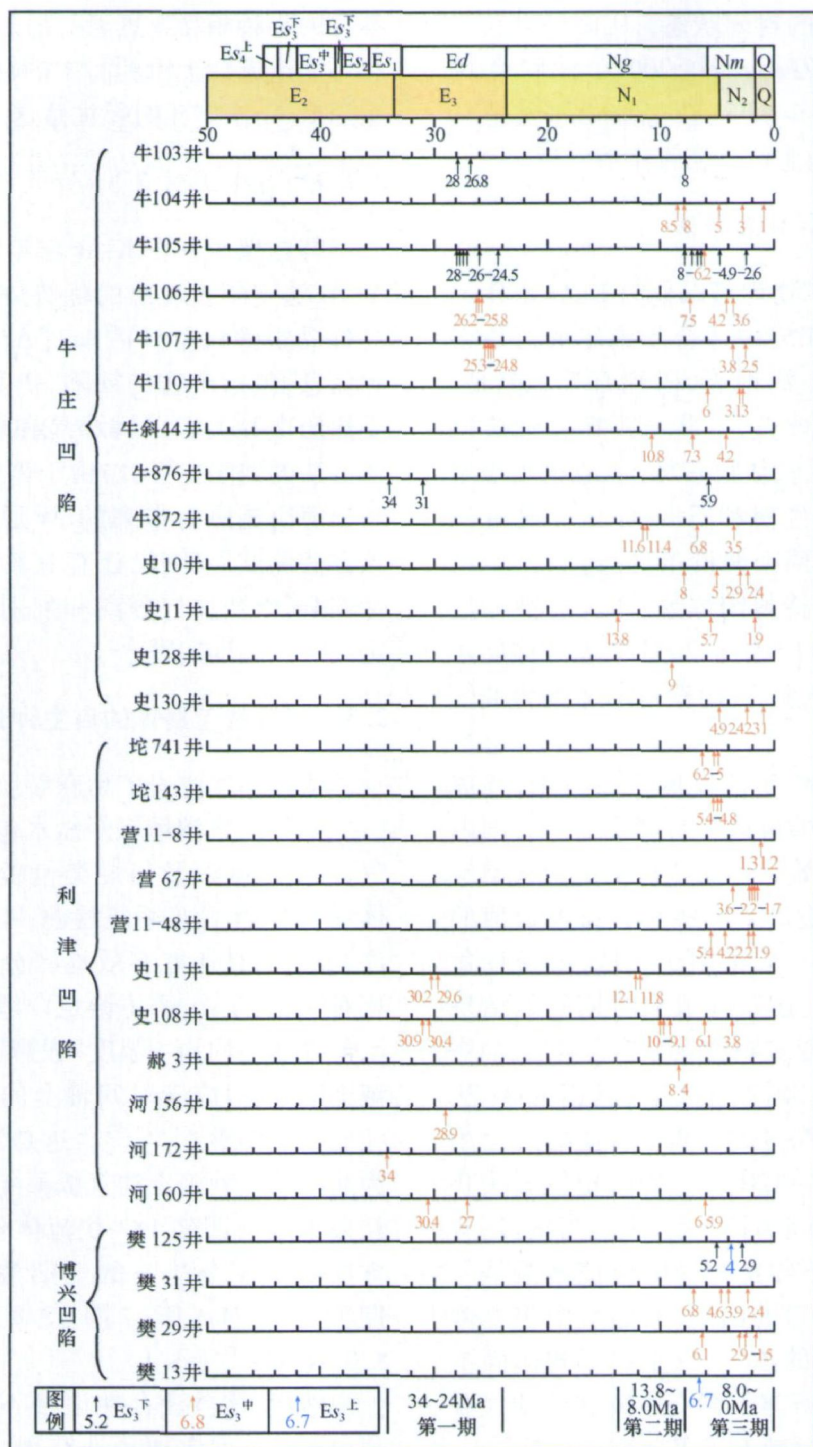


图 1 东营凹陷流体包裹体确定油气充注时期

Fig. 1 Dating results of petroleum charging determined by fluid inclusion method in Dongying depression

由此获得的温度-组分-时间 ($T-X-t$) 数据能够有效约束不同期次、不同组分流体流动的时间^[11]。

该方法分 3 个步骤 (图 2): 一是采集砂岩样品制成 100~200 μm 厚度的双面抛光薄片, 在偏光显微镜和荧光显微镜下对钾长石加大边中发育的油包裹体和盐水包裹体产状进行描述, 在冷-热台下测定各期次油包裹体荧光颜色和均一温度、同

期盐水包裹体均一温度和盐度。二是利用同一块砂岩样品 250~300 μm 厚度的双面抛光薄片, 通过偏光显微镜、透射电镜 (TEM)、扫描电镜 (SEM) 和冷-热阴极发光 (CL) 等手段, 对发育油包裹体和盐水包裹体的钾长石次生加大边产状进行描述, 以获取自生钾长石分布区带图, 并送中子活化室照射。三是选取自生钾长石次生加大边中发育

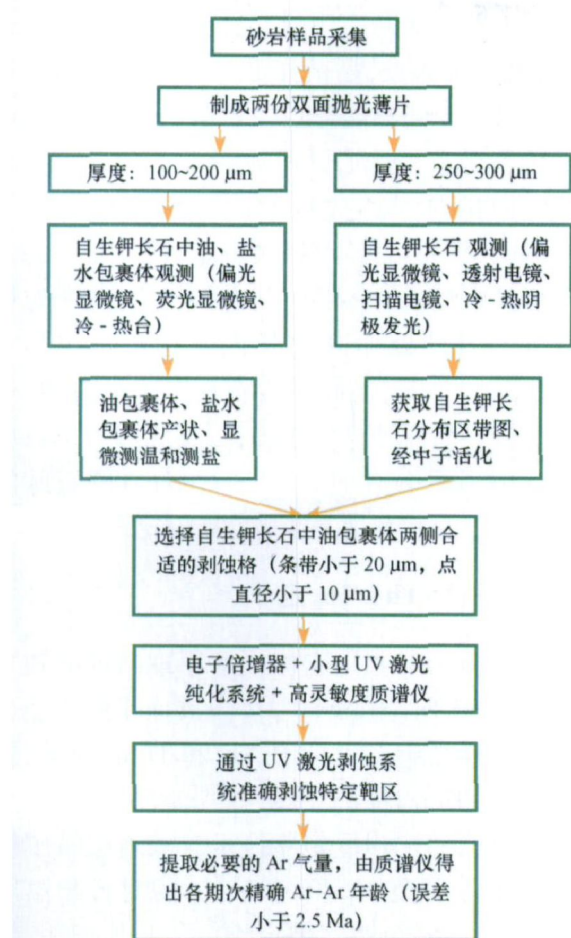


图 2 流体包裹体与自生钾长石 Ar-Ar 法相结合的定年研究流程^[6, 7, 44, 45]

Fig. 2 Dating flow chart of fluid inclusion technique integrated with authigenic K-feldspar Ar-Ar method

油包裹体和盐水包裹体两侧的合适剥蚀格。UP-213 小型 UV 激光纯化系统给出的空间分辨率为: 剥蚀格宽度小于 20 μm, 融蚀点直径小于 10 μm^[11, 46]。对选定的靶区经过 UV 激光融蚀微区提取足够的 Ar 量, 打入配备电子倍增器高灵敏度质谱仪, 从而获得各微区的 Ar-Ar 年龄, 误差 ±2.5 Ma。将各期次油包裹体两侧剥蚀带的 Ar-Ar 年龄算术平均值作为其该油包裹体的捕获年龄, 如此就实现了不同期次油包裹体的精确定年^[11, 45]。

将流体包裹体-自生钾长石 Ar-Ar 定年与烃源岩和圈闭储层精细埋藏史结合起来, 就能够为生烃排史与充注史之间架起一座“桥梁”(图 3), 揭示了北海 207/1a-5 井区生烃史与充注史之间约 33 Ma 的时间“延迟”现象^[45]。北海 207/1a-5 井区的这种关系揭示烃源岩生烃时间为 116~83 Ma 而圈闭储层充注时间为 83~71 Ma。石油从三

叠系烃源岩中排出 (116 Ma), 到进入白垩系储层中 (83 Ma) 运移过程花费了 33 Ma。自 71 Ma 以来, 尽管地层总体呈深埋趋势, 但油包裹体检测和同期盐水包裹体均一温度证实白垩系圈闭储层中油气充注过程已经停止, 地层温度呈下降趋势 (108℃ 下降到 < 50~60℃)^[45]。

由此提出了一个问题: 如何理解一个盆地的油气成藏期与油气充注期? 按传统观念, 油气成藏期是指油气开始生成并运移到圈闭中聚集的整个时间; 而油气充注期专指油气进入圈闭储层聚集成藏这段时间。对于烃源岩附近和被烃源岩包裹的透镜体油气藏, 其油气成藏期与充注期基本上是一致的; 对于运移距离比较远的, 甚至通过断层、不整合长距离运移而聚集的油气藏, 其成藏期开始时间要比充注期早得多, 二者有可能部分重叠, 也可能根本不重叠; 对于次生油气藏, 其充注期取决于先期聚集油气圈闭的破坏作用, 肯定要比成藏期来得晚。

无论是对圈闭含油气性评价还是油气成藏动力学过程描述, 油气成藏期的时间概念比较模糊^[47, 48]。建议采用“烃源岩排烃期”和“圈闭充注期”。油气从烃源岩一圈闭这段时间称作“油气运移期”。考虑到次生油气藏的特殊性, 不妨增加一个“次生油气藏成藏期”概念, 且专指原生油气藏破坏至再聚集阶段。

需要指出的是, 尽管 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法实现了分步升温释氩, 克服了常规 K-Ar 法的许多缺点, 能够对前寒武系至第三纪这种长时间的、多期流体事件定年^[44], 但要获得一条极其平坦的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 曲线并不容易。测试时, 除了需要找到发育捕获油包裹体的自生钾长石之外, 更为重要的是要注意在后期成岩过程中, 钾长石加大边中的 K 是否发生流失^[11]。判别其处于非扰动体系的年龄谱准则可概括为: 1) 具有 3 个以上相连的一致年龄坪, 并具有超过 50% 的 ^{39}Ar 释放量; 2) ^{39}Ar 析出量超过 50% 时, 能获得好的高温坪; 3) 与坪对应的氩同位素可以构成良好的等时线, 其等时线年龄与坪年龄基本一致, 其截距值与大气氩比值相差不大。满足所有这些条件的样品, 一般可以认为它所代表的岩石具有简单地质热历史, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 保持一个非扰动的封闭体系^[16]。另外, 该方法因需要中子活化, 测试周期一般需要一年左右, 成本也很高, 这都在一定程度上影响其推广。

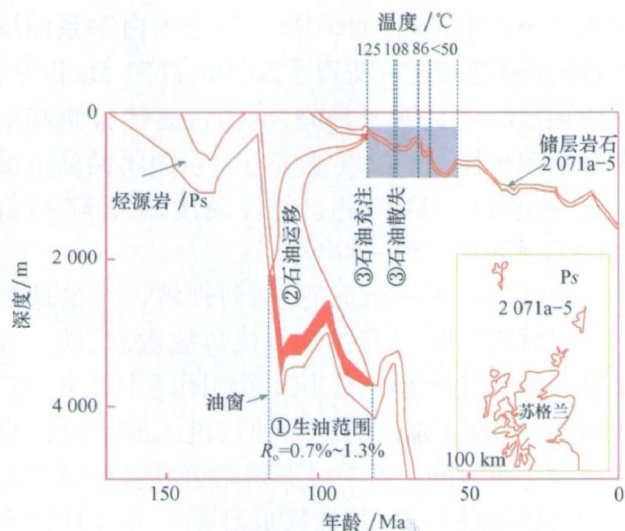


图 3 流体包裹体~自生钾长石 Ar/Ar 定年与烃源岩热史、圈闭储层埋藏史耦合关系

Fig. 3 The coupling relationships among fluid inclusion dating, authigenic K-feldspar Ar/Ar dating, thermal history of source rocks and burial history of bounded reservoirs

3 需探索的定年方法

3.1 热释光与 ESR 定年法

沉积岩盆地中最为常见的、与油气成藏密切相关的成岩矿物包括石英、长石、方解石等,其本身没有放射性,但在埋藏成岩阶段会接受环境中的放射性核素铀、钍、钾辐射作用,使得这些矿物晶体以内部电子转移或晶体结构的局部应变来储存各类辐射作用所带来的能量。同时,这些矿物晶体一旦经历某种热事件,又能以光子的形式释放其能量,当受热程度达到或超过一定的温度时,其储存的辐射能量将全部释放,从而让计时归零。由于核素的半衰期常常远大于所测样品的年龄,由此认为辐射剂量强度在成岩矿物接受辐射时段内恒定不变。由此可以建立标本的累加剂量正比于标本自最近一次受热或光达到一定程度的激发后所经历的年代。这就是热释光定年的基本原理^[49-50]。最为常见的是测定自生石英的热释光年龄^[50-51],但存在一个自生石英样品分离问题,至今没有很好地解决。

与热释光原理相似的是 ESR (Electron Spin Resonance) 定年^[52]。ESR 定年是基于测量样品中不成对电子的数目从而测定样品年代的一种物理

方法。不成对电子是由于样品曾受 α 、 β 和 γ 等射线辐照,电子被激发,且被样品晶格中的缺陷俘获所产生。每个缺陷只能俘获一个电子,已经俘获电子的缺陷称为顺磁中心。不成对电子的磁矩在外磁场中定向排列,在一定频率的微波场中跃迁,使样品中的顺磁中心总数可以被测定,而顺磁中心总数是与样品所经受的辐照时间有关,由此可测定样品的年龄。常选做 ESR 定年测定的矿物包括石英^[53]、方解石^[54]等,但同样存在一个样品分离,以保证测定的样品为纯自生矿物;石英脉和方解石脉均是理想的 ESR 定年样品,但迄今对方解石脉的 ESR 信号特征及其测量条件目前尚没定论。

3.2 磷灰石 (U-Th) /He 定年

磷灰石 (U-Th) /He 定年技术原理是根据磷灰石颗粒中 U 和 Th 衰变产生 He 发展而来的。通过测量磷灰石样品中放射性 He、U 和 Th 的含量,就可以获得 (U-Th) /He 的年龄^[55-58]。

磷灰石 (U-Th) /He 定年技术有效地记录了样品经历较低温度范围 (40~85℃) 的时代与温度信息,适合于不整合油气藏定年。与其他方法,譬如钾长石 Ar/Ar 法和裂变径迹技术结合起来,可得到更为详细和准确的冷却历史。但该方法尚存在一些问题: 1) 磷灰石样品的标准问题; 2) He 的复合扩散机理问题; 3) 各实验室数据的可比性; 4) 定年矿物内小包体对年龄的影响等^[59]。

3.3 Alpha 反冲径迹定年

Alpha 反冲径迹年代学的原理是矿物中 U 和 Th 及其原子核进行 α 衰变释放出 α 粒子时,剩余重核受到反冲而产生辐射损伤。在适当条件下经化学蚀刻,这些辐射损伤成为在光学显微镜下可观测的核径迹。通过建立适当的蚀刻模型和定年模型,计算径迹面密度和体密度,并测量 U 和 Th 含量,便可得到年龄^[60]。该方法的特点是可以确定较年轻的年代 (百万年至数百年),故对来自于第四纪火山岩云母的 α 反冲径迹定年,可以成为火山灰年代学和海域第四纪成藏定年的有力工具。

4 结束语

随着我国油气成藏动力学研究和叠合盆地油气勘探不断深入,多期次油气充注过程和次生油气

藏成因成为当前理论与实践研究的热点领域。而油气成藏年代学将从“时间”约束角度, 为油气成藏动力学建模和圈闭有效性评价提供更加科学的决策依据。然而, 油气成藏年代学研究方兴未艾、任重道远, 不仅需要多学科的交叉、渗透, 而且依赖于集成性的高科技手段和大量的实践。基于放射性同位素地球化学直接测年、激光微区微量纯化系统和高精度的质谱仪的应用, 代表了油气成藏年代学发展方向。发展适用于碳酸盐岩、碎屑岩储层常见成岩矿物, 如石英、方解石等定年技术, 尽管还处于探索阶段, 但具有不可估量的潜力。而多种定年结果相互验证, 定年结果与地质条件的相互印证, 是正确揭示不同盆地油气成藏年龄的可靠途径。

当前, 鉴于放射性同位素测年周期长、成本高、多种尖端仪器流程复杂, 建议建立现有的油气成藏年代学数据库, 并大力发展集成性定年综合实验室, 以此推动沉积盆地油气成藏年代学不断向前发展。

参 考 文 献

- 1 Magoon L B, Dow W G. The petroleum system [A]. In Magoon L B, Dow W G, eds. The petroleum system: from source to trap. AAPG Memoir 60 [C], Tulsa, Oklahoma, USA: Published by the American Association of Petroleum Geologists, 74101, 1994, 3–24.
- 2 Chen Honghan, Zhang Qiming, Shi Jiki. Evidence of fluid inclusion for thermal fluid-bearing hydrocarbon movements in Qiongdongnan basin, South China Sea [J]. Science in China (Series D), 1997, 40(6): 648–655.
- 3 Chen Honghan, Li Sitian, Sun Yongchuan, et al. Two petroleum systems charge YA13–1 gas field in Yinggehai and Qiongdongnan basins, South China Sea [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(5A): 757–772.
- 4 龚再升, 杨甲明. 油气成藏动力学及油气运移模型 [J]. 中国海上油气 (地质), 1999, 13(4): 235–239.
- 5 赵靖舟. 油气成藏年代学研究进展及发展趋势 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 378–382.
- 6 邱华宁, 彭良. ^{40}Ar – ^{39}Ar 年代学与流体包裹体定年 [M]. 江苏合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- 7 邱华宁. 新一代 ArAr 实验室建设与发展趋势——以中国科学院广州地球化学研究所 ArAr 实验室为例 [J]. 地球化学, 2006, 35(2): 133–140.
- 8 陈红汉. 地质流体: 多学科技术和概念的相互渗透——第二届国际沉积盆地和造山带流体演化、运移和相互作用大会简介 [J]. 地球科学进展, 1998, 13(2): 204–206.
- 9 陈红汉. 第三届国际地质流体大会简介 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 288–289.
- 10 Cioppa M T, Symons D T A. Timing of hydrocarbon generation and migration: paleomagnetic and rock magnetic analysis of the Devonian Duvernay Formation, Alberta, Canada [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69–70: 387–390.
- 11 Darren F M, John P, Simon P K, et al. Temperature-composition-time (T-X-t) data from authigenic K-feldspar: An integrated methodology for dating fluid flow events [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89: 259–262.
- 12 赵靖舟, 李秀荣. 成藏年代学研究现状 [J]. 新疆石油地质, 2002, 23(3): 257–261.
- 13 岳伏生, 张景廉, 曹正林, 等. 再论石油生成和运移年龄的确定 [J]. 新疆石油地质, 2003, 24(1): 84–86.
- 14 Pamell J, Swainbank I. Pb-Pb dating of hydrocarbon migration into bitumen-bearing ore deposit, North Wales [J]. Geology, 1990, 18: 1028–1030.
- 15 Mossman D J, Nagy B, Davis D W. Hydrothermal alteration of organic matter in uranium ores, Elliot Lake, Canada: implications for selected organic-rich deposits [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 3251–3259.
- 16 赵玉灵, 杨金中, 沈远超. 同位素地质学定年方法评述 [J]. 地质与勘探, 2002, 38(2): 63–67.
- 17 张景廉, 朱炳泉, 张景龙. 关于石油生成和运移年龄的确定与测定 [J]. 中国海上油气 (地质), 1993, 7(2): 71–74.
- 18 张景廉, 朱炳泉, 张平中. Pb-Sr-Nd 同位素体系在石油地球化学中的应用 [J]. 地球科学进展, 1997, 12(1): 58–61.
- 19 Zhu Bingquan, Zhang Jinglian, Tu Xianglin, et al. Pb, Sr, and Nd isotopic features in organic matter from China and their implications for petroleum generation and migration [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(15): 2555–2570.
- 20 Selby D, Creaser R A. Re-Os geochronology of organic rich sediments: an evaluation of organic matter analysis methods [J]. Chemical Geology, 2003, 200: 225–240.
- 21 Selby D, Creaser R A, Dewing K, et al. Evaluation of bitumen as a ^{187}Re – ^{187}Os geochronometer for hydrocarbon maturation and migration: a test case from the Polaris MVT deposit, Canada [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 235: 1–15.
- 22 Lee M, Aronson J L, Savin S M. K-Ar dating of time of gas emplacement in Rotliegendes sandstone, Netherlands [J]. AAPG Bulletin, 1985, 69: 1381–1385.
- 23 Hamilton P J, Kelley S, Fallick A E. K-Ar dating of illite in hydrocarbon reservoirs [J]. Clay Minerals, 1989, 24: 215–231.
- 24 Hogg A J C, Hamilton P J, Macintyre R M. Mapping diagenetic fluid flow within a reservoir: K-Ar dating in a lwyn area (UK North Sea) [J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10: 279–294.
- 25 王飞宇, 何萍, 张水昌, 等. 利用自生伊利石 K-Ar 定年分析烃类进入储集层的时间 [J]. 地质论评, 1997, 43(5): 540–546.
- 26 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.
- 27 辛仁臣, 田春志, 窦同君. 油藏成藏年代学分析 [J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 48–54.
- 28 赵靖舟, 田军. 塔里木盆地哈德 4 油田成藏年代学研究 [J].

- 岩石矿物学杂志, 2002, 21(1): 62~ 68
- 29 张有瑜, 罗修泉, 宋健. 油气储层中自生伊利石 K-Ar 同位素年代学研究若干问题的初步探讨 [J]. 现代地质, 2002, 16(4): 403~ 407
 - 30 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
 - 31 米敬奎, 张水昌, 涂建琪, 等. 哈得逊油田成藏研究 [J]. 地球化学, 2006, 35(4): 333~ 345
 - 32 Karlsen D A, Nødkvime T, Larter S R, et al. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1993, 57(15): 3 641~ 3 659
 - 33 王龙樟, 戴谟, 彭平安. 自生伊利石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年技术及气藏成藏期的确定 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(1): 78~ 82
 - 34 Goldstein R H. Fluid inclusion in sedimentary and diagenetic systems [J]. *Lithos* 2001, 55: 159~ 193
 - 35 陈红汉, 李纯泉, 张希明, 等. 运用流体包裹体确定塔河油田油气成藏期次及主成藏期 [J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 190
 - 36 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~ 11
 - 37 郝雪峰, 陈红汉, 高秋丽, 等. 东营凹陷牛庄砂岩透镜体油气藏微观充注机理 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(2): 182~ 190
 - 38 Eadington P J, Hamilton P J, Bai G P. Fluid history analysis— a new concept for prospect evaluation [J]. *Australian Petroleum Production & Exploration Association Journal* 1991, 31(1): 282~ 294
 - 39 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
 - 40 李荣西, 席胜利, 邸领军. 用储层油气包裹体岩相学确定油气成藏期次——以鄂尔多斯盆地陇东油田为例 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 194~ 217
 - 41 Lovera O, Richter F, Harrison T. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronometry for slowly cooled samples having a distribution of diffusion domain sizes [J]. *Journal of Geophysical Research* 1989, 94: 17 917~ 17 935
 - 42 McDougall I, Harrison T M. Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method [M]. Published by Oxford University Press, Inc., 1999, 9~ 165
 - 43 Wamock A C, van de Kamp P C. Hump-shaped $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra in K-feldspar and evidence for Cretaceous authigenesis in the fountain formation near Eldorado Springs, Colorado [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 1999, 174: 99~ 111
 - 44 Sherlock S C, Lucks T, Kelley S P, et al. A high resolution record of multiple diagenetic events: ultraviolet laser microprobe Ar/Ar analysis of zoned K-feldspar overgrowths [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2005, 238: 329~ 341
 - 45 Mark D F, Pamell J, Kelley S P, et al. Dating of multistage fluid flow in sandstones [J]. *Science* 2005, 309: 2 048~ 2 051
 - 46 Kelley S P, Amdur N O, Tumer S P. High spatial resolution Ar-Ar investigations using a ultra-violet laser probe extraction technique [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1994, 58(16): 3 519~ 3 525
 - 47 杨克明, 叶军, 吕正祥. 川西坳陷上三叠统成藏年代学特征 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 208~ 213
 - 48 李明诚, 单秀琴, 马成华, 等. 油气成藏期探讨 [J]. 新疆石油地质, 2005, 26(5): 587~ 591
 - 49 Huntley J D. Thermoluminescence as a potential means of dating siliceous ocean sediments [J]. *Canadian Journal of Earth Science* 1976, 13: 593
 - 50 龚革联, 谭凯旋. 石英的热释光特征及其在测年中的应用 [J]. 湖南地质, 1999, 18(2~ 3): 180~ 183
 - 51 姜勇彪, 郭福生, 刘林清, 等. 龙虎山丹霞地貌区河流阶地地貌面的热释光测年研究 [J]. 东华理工学院学报, 2006, 29(3): 225~ 228
 - 52 Yokoyama Y, Bibron R, Leger C, et al. ESR dating of palaeolithic calcite: Fundamental studies [J]. *Nuclear Tracks* 1985, 10: 929~ 936
 - 53 业渝光, 和杰, 刁少波, 等. 沉积物中石英的 ESR 测年研究 [J]. 核技术, 1993, 16(4): 222~ 224
 - 54 贾丽, 鲍继飞, 尹功明, 等. 方解石脉 ESR 定年信号和测量条件的研究 [J]. 地震地质, 2006, 28(4): 668~ 674
 - 55 Farley K A, Wolf R A, Silver L T. The effects of long alpha stopping distances on (U-Th)/He ages [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1996, 60: 4 223~ 4 229
 - 56 Farley K A. Helium diffusion from apatite: general behaviour as illustrated by Durango fluorapatite [J]. *Journal of Geophysical Research* 2000, 105: 2 903~ 2 914
 - 57 Farley K A. (U-Th)/He dating techniques: calibrations and applications [A]. Porcelli P D, Ballentine C J, Wieler R, eds. *Noble Gas Geochemistry* [C]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 2002, 47: 819~ 843
 - 58 Farley K A, Kohn B, Pillars B. (U-Th)/He dating of Pleistocene zircon and apatite: a test case from the Rangitapu tephra, North Island, New Zealand [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2002, 201: 117~ 125
 - 59 保增宽, 袁万明, 王世成, 等. 磷灰石 (U-Th)/He 定年技术及应用简介 [J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(2): 126~ 132
 - 60 高绍凯, 袁万明, 董金泉, 等. 核分析新技术: Alpha 反冲径迹热年代学 [J]. 地质通报, 2005, 24(10~ 11): 1 032~ 1 038

(编辑 高岩)