



中国石油勘探开发研究院出版物

构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术系列丛书·卷一

主编 赵孟军 刘可禹 柳少波

油气成藏年代学 分析技术与应用

鲁雪松 刘可禹 赵孟军 张有瑜 雷永良 等◎著
范俊佳 于志超 卓勤功 桂丽黎 李秀丽

Analytical Techniques of
Geochronology and their Applications in
Hydrocarbon Accumulation Research



科学出版社



中国石油勘探开发

构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术系列丛书·卷一

主编 赵孟军 刘可禹 柳少波

油气成藏年代学 分析技术与应用

鲁雪松 刘可禹 赵孟军 张有瑜 雷永良 等◎著
范俊佳 于志超 卓勤功 桂丽黎 李秀丽

Analytical Techniques of
Geochronology and their Applications in
Hydrocarbon Accumulation Research

科学出版社

内 容 简 介

油气成藏年代学研究是石油地质成藏综合研究的重要内容之一。本书详细介绍了油气成藏年代学分析各项技术的方法原理、技术进展、优缺点及其应用情况,重点论述了磷灰石裂变径迹分析技术、自生伊利石 K-Ar 同位素测年技术、流体包裹体分析技术、储层定量荧光分析技术四种石油地质领域常用的成藏定年技术的原理、分析方法和操作流程、技术现状及应用范围,最后介绍了多种定年方法在库车前陆盆地克拉苏构造带油气成藏研究中的综合应用实例,为油气成藏过程研究提供了很好的技术参考和指导。

本书内容读者对象为油气地质、油气成藏和油气勘探研究人员,也可供石油高等院校石油地质专业的老师和学生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气成藏年代学分析技术与应用 = Analytical Techniques of Geochronology and their Applications in Hydrocarbon Accumulation Research/鲁雪松等著. —北京:科学出版社,2017

(构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术系列丛书·卷一/赵孟军,刘可禹,柳少波主编)

ISBN 978-7-03-050771-6

I. ①油… II. ①鲁… III. ①油气藏形成-地质年代学-研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 276248 号

责任编辑:吴凡洁 冯晓利 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:无极书装



北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:302 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

进入 21 世纪以来,我国油气勘探进入一个新的阶段,以湖盆三角洲为主体的岩性油气藏、复杂构造为主体的前陆冲断带油气藏、复杂演化历史的古老碳酸盐岩油气藏、高温高压为特征的深层油气藏、低丰度连续分布的非常规油气藏已成为勘探的重要对象,使用传统的手段和实验技术方法解决这些勘探难题面临较大的挑战。自 2006 年以来,中国石油天然气集团公司(以下简称中国石油)科技管理部主导,先后在中国石油下设研究机构和油田公司建立起了一批部门重点实验室和试验基地,盆地构造与油气成藏重点实验室就是其中的一个。盆地构造与油气成藏重点实验室依托中国石油勘探开发研究院,大致经历了三个阶段:2006 年至 2010 年的主要建设时期、2010 年正式挂牌到 2012 年的试运行时期和 2013 年来的发展时期。盆地构造与油气成藏重点实验室建设之前,我院构造、油气成藏研究相关的实验设备和实验技术基本为空白。重点实验室围绕含油气盆地形成与构造变形机制、油气成藏机理与应用和盆地构造活动与油气聚集等三大方向,重点开展了油气成藏年代学实验分析、构造变形与油气成藏物理模拟和数值模拟技术系列的能力建设,引进国外先进实验设备 35 台/套,自主设计研发物理模拟等实验装置 11 台/套。

通过 10 年来的实验室建设与发展,形成了物理模拟、数值模拟、成藏年代学、成藏参数测定等四大技术系列的 31 项单项技术,取得了 5 个方面的实验技术方法重点成果:创新形成了以流体包裹体、储层沥青、自生伊利石测年等为核心的多技术综合应用的油气藏定年技术,有效解决了多期成藏难题;自主设计制造了全自动定量分析构造变形物理模拟系统,建立了相似性分析参数模板,形成了应变分析和三维重构技术;利用构造几何学和运动学分析,构建三维断层、地层结构,定量恢复三维模型构造应变分布,形成了构造分析与建模技术;自主研发了油气成藏物理模拟系统,为油气运移动力学、运聚过程、变形与油气运移、成藏参数测定等研究提供技术支持;利用引进的软件平台,开发了适合我国地质条件的盆地模拟技术、断层分析评价技术和非常规油气概率统计资源评价方法。

“构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术”系列丛书是对实验室形成的技术方法的全面总结,丛书由五本专著构成,分别是:《油气成藏年代学分析技术与应用》(卷一)、《非常规油气地质实验技术与应用》(卷二)、《油气成藏数值模拟技术与应用》(卷三)、《油气成藏物理模拟技术与应用》(卷四)、《构造变形物理模拟与构造建模技术与应用》(卷五)。丛书中介绍的实验技术与方法来自三个方面:一是实验室建设过程中研究人员与实验人员共同开发的技术成果,其中也包括与国内外相关机构和实验室的合作成果;二是来自对前人建立的实验技术与方法的完善;三是基于丛书主线和各专著需求,总结国内外已有的实验技术与方法。

“构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术”系列丛书是该重点实验室建设与发展成果的总结,是组织、参与实验室建设的广大科研人员和实验人员集体智慧的结晶。在这里,我们衷心感谢重点实验室建设时期的领导和组织者、第一任重点实验室主任宋岩教授,正是前期实验室建设的大量工作,奠定了重点实验室技术发展和系列丛书出版的基础;衷心感谢以贾承造院士、胡见义院士为首的重点实验室学术委员会,他们在重点实验室建设、理论与技术发展方向上发挥了指导和引领作用;感谢重点实验室依托单位中国石油勘探开发研究院相关部门的支持与付出;同时感谢中国石油油气地球化学和油气储层重点实验室的支持和帮助。

希望通过丛书的出版,让更多的研究人员和实验人员关注构造与油气成藏实验技术,推动实验技术的发展;同时,我们也希望通过这些技术方法在相关研究中的应用,带动构造与油气成藏学科的发展,为国家的油气勘探和科学研究做出一份贡献。

赵孟军 刘可禹 柳少波

2015年7月1日

油气勘探地质评价的目标是准确认识油气藏的形成和分布规律,油气成藏期和成藏历史是其中的一个核心问题 and 研究难点,而这属于油气成藏年代学的研究范畴。油气成藏年代学研究有助于判断油气藏形成的动力学过程和流体环境,重建油气成藏过程和调整改造历史,总结油气成藏特征与分布规律,对于勘探目标的优选和评价及提高油气藏勘探成功率均具有重要意义。

我国叠合盆地深层的成岩、成藏过程复杂,具有多套烃源岩、多期构造运动和多期油气运聚成藏和调整改造的特征,对于这类复杂油气藏的成藏过程研究难度大。前人主要根据综合地质分析大致推断这类复杂油气藏的成藏过程,具有较大的不确定性。随着分析仪器和测试技术的不断进步与发展,油气成藏年代学分析技术逐渐走向精细化、定量化和多样化。中国石油天然气集团公司盆地构造与油气成藏重点实验室先后引进了多套先进仪器和设备,全面构建了系统化、完整化、精细化的油气成藏年代学技术系列,由包裹体分析技术、储层沥青分析技术、自生伊利石同位素测年分析技术和磷灰石裂变径迹分析技术四大技术系列构成。将多技术手段有效融合和集成实现了成藏年代分析的综合化、定量、系统化、精细化,通过对储层中记录有油气成藏历史信息的古流体(储层沥青、包裹体)的成分、成熟度、丰度、温压等重要地质信息的测试和分析,并利用磷灰石裂变径迹分析技术准确恢复盆地热演化历史,综合自生伊利石 K-Ar、Ar-Ar 同位素定年结果,能够恢复和重建复杂油气藏的多期成藏过程和流体史。通过系统的成藏年代学分析可以实现的主要功能和作用包括以下七个方面:①成藏期次划分,通过油气包裹体期次、成岩序次划分,确定油气成藏期次;②精细油气源对比,通过古流体成分分析,能搞清每一期充注油气的来源;③成藏时间确定,通过包裹体均一温度、埋藏史热史分析确定成藏相对时间,自生伊利石 K-Ar 测年确定成藏绝对时间;④古温压恢复,通过包裹体 PVT 模拟,恢复包裹体捕获时的古温度、古压力;⑤流体史恢复,通过对饱和甲烷盐水包裹体盐度、压力的系统测试,恢复流体演化史;⑥运移路径追踪,通过在运移方向上的多个地区的包裹体丰度统计、成分对比,结合地化及构造特征,可追踪油气运移路径;⑦古油-水界面确定,通过油藏剖面中系统取样做定量荧光分析,识别古油-水界面,恢复油气藏演化历史。通过以上七个方面的研究,能够很好地解决叠合盆地复杂多源多期成藏难题。实验室建立的油气成藏年代学技术系列已在我国多个含油气盆地的复杂油气藏成藏过程及成藏机理研究中发挥重要作用。

在多年的技术研发和实例应用的基础上,作者组织编写了这本详细介绍油气成藏年代学分析技术与应用的书籍,希望能为油气成藏过程研究提供很好的技术指导。本书详细介绍了油气成藏年代学分析各项技术的方法原理、技术构成、技术进展及应用实例情

况,重点就目前广泛应用的磷灰石裂变径迹分析技术、自生伊利石 K-Ar 同位素测年技术、流体包裹体分析技术和储层定量荧光分析技术的方法原理、分析步骤和内容、技术现状及应用情况等进行了详细的介绍,同时对一些新兴的成藏定年技术如原油-储层沥青 Re-Os 同位素测年技术、成岩矿物 U-Th-Pb 同位素测年技术、自生石英 ESR 测年技术及天然气碳同位素动力学模拟技术等作了简单介绍和评论,最后结合库车前陆盆地克拉苏构造带的成藏研究介绍了各项定年技术在油气成藏研究中的综合应用实例。

本书具有以下三个突出特点:①对目前国内外常用的和新兴的各种成藏定年技术的方法原理、技术进展、技术优势和适用性都作了系统介绍;②重点对磷灰石裂变径迹分析技术、自生伊利石 K-Ar 同位素测年技术、流体包裹体分析技术和储层定量荧光分析技术的方法原理、详细分析步骤、测试方法和应用情况作了详细的介绍;③侧重于实验技术的应用,介绍了各项定年技术在油气成藏研究中的综合应用实例。因此,本书可作为油气成藏年代学研究和教学的工具书和参考书,兼具学术性和实用性。

本书共六章,前言由鲁雪松、刘可禹编写;第一章由鲁雪松、赵孟军编写;第二章由张有瑜、罗修泉编写;第三章由雷永良、鲁雪松编写;第四章由刘可禹、鲁雪松、桂丽黎、李秀丽编写;第五章由鲁雪松、范俊佳、桂丽黎、于志超编写;第六章由鲁雪松、于志超、卓勤功编写。本书最后由鲁雪松统稿。

由于时间和水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位专家学者不吝指正。

编著者

2015 年 11 月 30 日

丛书序

前言

第一章 油气成藏年代学分析技术概况及其进展	1
第一节 油气成藏年代学分析方法类型	1
一、传统的石油地质分析方法	1
二、从岩石学与矿床学引进的定年分析技术	3
第二节 油气成藏年代学技术的主要进展	4
一、与油气成藏相关的同位素测年技术取得新发展	5
二、油气包裹体成分分析技术向精细化、定量化发展	7
三、一些新的定年技术正在探索和发展中	8
第三节 油气成藏年代学分析技术的发展趋势	11
一、各种油气成藏年代学分析方法的优缺点	11
二、多种定年方法的综合应用是成藏定年的主要方向	13
参考文献	14
第二章 裂变径迹分析技术	19
第一节 裂变径迹技术的基本原理	19
一、裂变径迹的形成机制	19
二、裂变径迹定年的基本原理和计算	20
三、裂变径迹的退火	22
四、裂变径迹的长度	23
第二节 裂变径迹实验技术及流程	24
一、裂变径迹分析样品取样要求	24
二、裂变径迹分析流程	25
三、裂变径迹统计年龄的混合问题	27
第三节 裂变径迹数据解释及分析	29
一、裂变径迹长度分布模式	29
二、高程-裂变径迹年龄模式	30
三、平均径迹长度-年龄模式	31
四、径迹年龄谱模式	32

五、裂变径迹退火的热模拟分析	33
第四节 裂变径迹热年代学的地质分析	35
一、沉积盆地热史分析	35
二、基岩抬升-剥露热史分析	38
三、区域构造分析	40
四、沉积物源分析	42
参考文献	45
第三章 储层自生伊利石 K-Ar 同位素年代测定技术	48
第一节 自生伊利石分离提纯	48
一、国内外技术发展现状	48
二、技术流程	50
三、纯度检测	51
第二节 K-Ar 法年龄测定	53
一、基本原理	54
二、实验方法和技术	55
第三节 应用实例——塔里木盆地典型砂岩油气成藏年代探讨	57
一、志留系沥青砂岩	58
二、石炭系东河砂岩段-含砾砂岩段(C ₃ 油组)	67
第四节 一些重要问题的说明与讨论	71
一、前提条件	72
二、样品选择	72
三、制冷-加热循环解离技术	74
四、伊利石年龄数据分析技术	75
五、自生伊利石 Ar-Ar 法测年技术及其与 K-Ar 法的对比	76
参考文献	77
第四章 流体包裹体分析技术	81
第一节 流体包裹体分析基础	81
一、流体包裹体形成与分类	81
二、流体包裹体研究内容	86
三、流体包裹体研究现状	88
第二节 流体包裹体岩相学观察	88
一、包裹体薄片偏光显微镜观察	89
二、包裹体薄片显微荧光观察	90
三、包裹体薄片阴极发光观察	92
第三节 流体包裹体温度、盐度测试	94
一、流体包裹体均一温度测定	94
二、盐水包裹体冰点温度测定与盐度换算	96

第四节 流体包裹体成分分析	97
一、单个包裹体成分分析	98
二、群体包裹体成分分析	107
第五节 流体包裹体 PVT 模拟与捕获温度、压力确定	110
一、流体包裹体均一温度与捕获温度、压力	110
二、流体包裹体 PVT 模拟与捕获温度、压力恢复	114
第六节 流体包裹体在油气成藏研究中的应用	119
一、盆地古温度恢复	120
二、盆地古压力恢复	120
三、油气成藏期次和时间确定	123
四、油气来源对比及成藏后期变化确定	123
五、古油藏或油气运移路径的判识	124
第七节 流体包裹体在成藏研究中存在问题讨论	125
一、在包裹体期次划分方面存在的问题	125
二、在包裹体均一温度测试方面存在的问题	126
三、利用包裹体均一温度确定成藏时间时存在的问题	129
四、包裹体期次与油气成藏期次的非等同性	129
参考文献	130
第五章 储层定量荧光分析技术	135
第一节 荧光光谱基本原理及应用现状	135
一、原油荧光光谱的基本原理与特征	135
二、原油荧光光谱技术应用现状	136
第二节 储层定量荧光技术构成及分析流程	140
一、技术研发背景及其优势	140
二、参数定义与地质意义	140
三、样品采集及处理流程	145
第三节 储层定量荧光技术应用实例	149
一、古油-水界面识别及油气藏演化历史重建	149
二、储层含油性检测及致密油层识别	153
三、原油组成及成熟度表征	154
参考文献	157
第六章 成藏年代学技术在克拉苏构造带油气成藏研究中的综合应用	160
第一节 库车前陆盆地克拉苏构造带地质特征	160
一、克拉苏构造带基本概况	160
二、油气藏基本特征	161
第二节 基于裂变径迹与 R_o 资料对热史、生烃史的分析	162
一、库车前陆盆地形成演化历史	162

二、镜质体反射率资料对热史的启示	163
三、磷灰石裂变径迹数据对热史的启示	163
四、烃源岩热演化生烃史	166
第三节 典型油气藏成岩-成藏序列与成藏过程分析与对比	170
一、克拉 2 气田储层成岩-成藏序列与成藏过程	170
二、克深 2 地区储层成岩-成藏序列与成藏过程	184
三、大北地区储层成岩-成藏序列与成藏过程	192
参考文献	203

第一章 油气成藏年代学分析技术概况及其进展

油气勘探地质评价的目标是准确认识油气藏的形成和分布规律,油气成藏期和成藏历史是其中的一个核心问题 and 研究难点,而这即属于油气成藏年代学的研究范畴。油气成藏年代学是油气成藏地质学中的一门前沿交叉学科,其主要任务是通过各种相对定年或绝对定年方法厘定油气运聚成藏的时间,揭示油气成藏过程(赵靖舟和李秀荣,2002;陈红汉,2007;魏冬和王宏语,2011)。该项研究有助于判断油气藏形成的动力学过程和流体环境,重建油气成藏过程和调整改造历史,总结油气成藏特征与分布规律,对于勘探目标的优选和评价及提高油气藏勘探成功率均具有重要意义。

第一节 油气成藏年代学分析方法类型

20 世纪 80 年代以来,随着全球油气勘探难度的加大,油气成藏年代学研究也日益引起石油地质界的重视。早些年,中外学者根据油气藏生、储、盖、圈、运、保等参数的有效耦合,结合盆地构造演化史与生排烃史来大致推断油气藏的形成时间,逐步形成了圈闭形成时间法、烃源岩主排烃期法、饱和压力法、油气水界面追溯法、成藏地球化学等传统的石油地质分析方法(王飞宇等,2002;赵靖舟和李秀荣,2002;马安来等,2005)。近年来,随着一些矿床学上的新方法、新理论的引入,油气成藏年代学得到了快速发展。特别是随着流体包裹体分析与储层成岩矿物测年技术的引入(马安来等,2005;陈红汉,2007;魏冬和王宏语,2011;陈玲等,2012),油气成藏年代学研究实现了由传统的定性研究向半定量或定量研究的重要转变,进而为油气成藏年代学学科的确立奠定了重要基础。

一、传统的石油地质分析方法

油气藏的形成是烃类流体从源岩到圈闭的运聚过程,成藏研究的两个焦点是烃类流体和圈闭。因此,传统的石油地质分析方法分析成藏期也主要是从圈闭和烃类流体两个方面着手。

(一) 从圈闭的形成史分析成藏期

包括圈闭形成时间法和油-气-水界面追溯法。圈闭形成时间法是基于圈闭发育史对油气成藏时间外推的一种间接研究方法,因此只能得到油气成藏的最早时间,而无法确定具体的成藏年代。油-气-水界面追溯法是对圈闭形成时间法的更进一步诠释。该方法的基本原理是,一般规则油气藏的油-水界面或气-水界面为一水平的界面(不规则的岩性油气藏和水动力油气藏除外),这类油气藏在最初形成时其油-气-水界面一般也呈水平状态,以后因构造变形等影响,油-气-水界面可能发生变更,直至构造稳定期,其油-气-水界面又重新演变为水平的界面。因此,可以通过对油气藏油-气-水界面演变史的分析,追溯

现今油气藏的油-气-水界面最早形成水平界面的时间,即为该油气藏的形成时间(赵靖舟,2001)。其后的油-气-水界面变迁则记录了油气藏形成以后的调整、改造乃至破坏的历史。

(二) 从烃类流体着手分析成藏期

从烃类流体分析成藏期根据方法原理的不同又可进一步分为两种。

1. 根据烃类流体的组成和成熟度结合烃源岩生排烃史分析成藏时间

一般认为,烃源岩主生排烃期即为油气大规模运聚成藏的时期,因此可利用盆地模拟技术确定烃源岩主生排烃期,大致确定成藏时间。烃源岩主生排烃期法的应用需要准确了解烃源岩的层位、展布、盆地热演化史及埋藏史等信息,而生油拗陷区探井的缺乏使得这些地质资料往往难以获取。此外,叠合含油气盆地中多套烃源岩的多期生排烃及次生油气藏的大量存在,使烃源岩的主生排烃期、排烃期与现今保存油气藏的有效成藏期并非一致。

成藏地球化学技术的发展为烃源岩主生排烃期法确定成藏期提供了一个重要的补充和改进(England and Mackenzie,1989;王飞宇等,2002)。一方面,原油族群划分和精细的油源对比,可以建立起油藏油与烃源灶的对应关系;另一方面,根据分子地球化学成熟度参数(包括常规饱和烃类参数、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 C_7 温度计,以及气体同位素和成分特征,可以确定油气藏中黑油、轻烃、气体的热成熟度,通过将烃类流体组成与热成熟度与烃源岩成熟度演化、生排烃史对比分析,可以较为准确地限定油气成藏时间。

20 世纪以来,天然气碳同位素动力学的发展,为确定天然气成藏方式和成藏时间提供了一种有效手段(Cramer et al.,1998,2001;Tang et al.,2000;李贤庆等,2004)。天然气碳同位素特征不仅受母源、成熟度的影响,还与运聚条件、沉积盆地增温速率有关。碳同位素分馏动力学模型在不同含油气盆地会存在差异,不仅取决于气源条件,还与运移聚集史、沉积构造史有关,瞬时聚集气与累积聚集气在碳同位素特征存在明显差别。生烃动力学及碳同位素动力学方法将天然气生成、运移和聚集与盆地埋藏史、受热史结合起来,再现天然气生成与运聚成藏过程,在评价天然气的成熟度、气源、运移聚集史和油气比等方面有较大的应用价值(Cramer et al.,1998;Tang et al.,2000;李贤庆等,2004)。李贤庆等(2004)利用甲烷碳同位素动力学方法探讨了库车前陆盆地克拉 2 气田的成藏过程和天然气成因,认为克拉 2 气田天然气主要来源于早中侏罗世煤系烃源岩,属阶段捕获气,为 5Ma 以来的天然气聚集。李贤庆等(2005a)根据压力下黄金管封闭体系模拟实验结果,用软件模拟获取了塔里木盆地库车拗陷三叠系—侏罗系源岩的生烃动力学参数与碳同位素动力学参数,结合地质背景探讨了依南 2 气藏天然气的成因和运聚模式,对库车拗陷天然气成因评价、资源评价及其他地区天然气成藏具有指导和借鉴意义。李绪深等(2005)利用碳同位素动力学模拟方法,初步圈定了崖南拗陷崖 13-1 气田天然气主要来自崖南凹陷斜坡带含煤地层,目前处于主生气阶段,成藏期较晚,成熟度为 1.5%~2.3%,气藏保存条件较好,为天然气的勘探与开发提供了依据和指导。李贤庆等(2005b)通过碳同位素动力学模拟表明,塔西南阿克 1 气藏天然气为烃源岩过成熟阶段的产物,属于混源

气,为该地区天然气定量评价提供了新思路。米敬奎等(2005)利用生烃动力学和碳同位素动力学模拟研究表明,鄂尔多斯盆地上古生界苏里格气田天然气主要是它源阶段累积气,来源于气田南部高成熟区域。总之,碳同位素动力学模拟在油气成藏与油气勘探方面具有广泛的应用价值,随着理论认识的逐渐完善,在油气成藏与勘探开发中将发挥重要作用。

2. 从油气藏流体的相态直接入手分析油气成藏时间

利用油气藏饱和压力/露点压力法可大致确定油气成藏时间。该方法基于油藏形成时为饱和天然气状态的基本假设,其饱和压力与地层压力相当。如果在油气藏形成之后,沉积、构造等作用相对比较稳定,那么,油气藏的饱和压力基本不变。因此,由油气藏的饱和压力可推断油气藏形成时的埋藏深度,进而换算出对应的地质时代,即可确定油气藏形成的大致时间。油气藏饱和压力法主要适用于构造相对稳定、充注期次单一且无压力异常的单旋回盆地。对于叠合含油气盆地,其确定的成藏时间往往带有很大的不确定性。这是因为:一方面,叠合盆地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散失,凝析气藏发生反凝析作用,从而使油气藏最初形成时的饱和压力以及相态特征发生改变(赵靖舟等,2002);另一方面,多期次的油气注入也会使早期油气藏的饱和压力发生变化。这些都会影响饱和压力法成藏年代确定的准确性。另外,对于由饱和压力-露点压力法所确定的成藏期究竟属于最早成藏时间抑或是最晚成藏时间,认识也不一致(赵靖舟和李秀荣,2002)。

二、从岩石学与矿床学引进的定年分析技术

储层成岩矿物及其中流体包裹体、储层沥青直接记录了沉积盆地油气成藏条件和过程,作为烃类成藏的化石记录,它们可用于重构油气藏形成和演化史。根据分析对象和方法原理不同,该方法又可分为两种:一种是对成藏的流体化石记录(流体包裹体、原油/沥青、地层水)进行分析,主要包括流体包裹体分析技术、原油/沥青同位素定年技术、油田水碘同位素测年技术等,目前较为成熟且广泛使用的是流体包裹体分析技术;一种是对油气藏储层中或与油气成藏相关的自生成岩矿物的同位素定年技术,目前较为常用的是储层自生伊利石 K-Ar、Ar-Ar 测年技术等。下面重点介绍目前在油气成藏领域中应用最为广泛、技术最为成熟的两项定年技术。

(一) 流体包裹体分析技术

流体包裹体含有丰富的成藏成矿信息,对成矿流体的运移具有重要的示踪作用(倪师军等,1999)。运用包裹体方法确定成矿的地质年龄,在热液金属矿床定年方面早已得到广泛应用,但用于油气成藏的成藏年代学与成藏史研究则始于 20 世纪 80 年代(Haszeldine et al., 1984; Horsfield and McLimans, 1984; 施继锡等, 1987)。90 年代以来,流体包裹体方法在油气成藏年代学研究中得到了广泛应用,已成为当今油气成藏年代学研究中最重要的一种方法(柳少波和顾家裕, 1997; 郑有业等, 1998; 高志先和陈景发, 2000; 赵靖舟, 2002)。在成藏年代学与成藏史研究方面,流体包裹体的作用主要体现在以下三个方面:一是烃类包裹体的形成世代关系,代表了油气运移充注的期次;二是烃类包裹体的均一温

度,记录了油气运移充注时储层的古地温,通过热史和储层埋藏史的恢复即可确定包裹体形成时间;三是烃类包裹体的成分,可以反映油气注入时的地球化学特征和相态特点。因此,流体包裹体分析技术在解决叠合盆地多源、多期复杂成藏问题时具有其他方法无法比拟的优势。

流体包裹体理论与方法从矿床学引进石油地质学之后,得到了迅速发展和更广泛的应用,但在包裹体基础理论和实验测试方面都存在一些尚未解决的问题,特别是在复杂叠合盆地成藏年代学研究方面,仍有不少问题还有待进一步的研究探讨。这些问题将在第五章中进行详细探讨。

(二) 储层自生伊利石 K-Ar、Ar-Ar 同位素测年技术

储集层中伊利石是在富钾水介质环境中形成的,当油气进入砂岩储集层后,由于介质条件的改变,储集层中自生伊利石的形成便会停止,因此可用储集层中自生伊利石的最新年龄来确定油气藏形成的时间,代表了油气最早进入储集层的时间(王飞宇等,1998;张有瑜和罗修泉,2004;Zhang et al;2005)。但是,这种方法在应用中存在一定的难度,主要原因是影响因素较多。首先,除陆源碎屑钾长石、碎屑伊利石外,绿泥石、高岭石等均可能会对自生伊利石的 K-Ar 体系产生较为明显的影响,并导致明显不合理的或不具有明确地质意义的年龄(张有瑜和罗修泉,2004);其次是油气注入只是引起砂岩储集层自生伊利石生长作用终止的原因之一;另外,油气充注后自生伊利石不一定停止生长(Karlsen et al., 1993)。此外,这种方法的应用和样品本身的关系也比较大,例如,砂岩岩性、伊蒙间层比等,中、细砂岩的应用效果相对较好,粉砂岩、泥质粉砂岩则难度较大;伊蒙有序间层的应用效果相对较好,伊蒙无序间层则应用效果较差。此外,对于单一成藏期次的盆地,这种方法可以取得较好的成果,而对于多期次成藏的盆地,自生伊利石 K-Ar 年龄只能反映油气最早进入的时间。

自生伊利石 Ar-Ar 测年法与 K-Ar 测年法测年原理相同,但技术开展较 K-Ar 测年法稍晚。与 K-Ar 法相比,Ar-Ar 法的优势主要体现在三个方面(王龙樟等,2004;云建兵等,2009):①Ar-Ar 法是通过在一份中子活化样品上测定 ^{40}Ar 与 ^{39}Ar 的比值获得样品的年龄,从而避免了 K-Ar 法中在两份样品中分别测量钾和氩的含量所带来的不均匀性误差;②Ar-Ar 法提供了包括矿物缺陷、伊利石生长的多期性、受热史关于矿物结晶和埋藏等更加丰富的信息;③样品用量减少。自生伊利石 Ar-Ar 法在实际研究中同样受伊利石纯净度的制约。此外,粒度微小的伊利石在核反应堆快中子轰击下, ^{39}Ar 将因核反冲作用而产生易位或部分丢失,造成样品表观年龄变老。实际测试周期需要一年左右,且成本较高,也限制了这项技术的发展。

第二节 油气成藏年代学技术的主要进展

近 20 年来,随着分析仪器和技术的发展,油气成藏年代学分析技术也取得了重要的进展,常规的分析技术不断深化、完善,走向精细化、定量化,也涌现出了一批新的定年技术。主要表现在以下三个方面。

一、与油气成藏相关的同位素测年技术取得新发展

(一) 原油/沥青 U-Pb、Sr-Nd 同位素定年技术

利用原油、沥青、干酪根中微量金属 U-Pb、Pb-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd 体系的同位素分析方法获得油气生成、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尝试应用,其关键是样品中放射性同位素的富集与分离。目前,只能做到沥青和干酪根样品中放射性同位素的有效分离,原油中的分离还存在困难,从而限制了该方法的推广。

Parnell 和 Swainbank(1990)最早运用 U-Pb 法获得了沥青脉的形成年龄。该方法定年较其他体系的优越性是 U 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,可以获得三个年龄值($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)。这些年龄值的差异可以指示在同位素平衡以后该体系受干扰的程度(赵玉灵等,2002)。

Rb-Sr、Sm-Nd 稀土元素体系在多数情况下的化学性质是不活泼的,使这些同位素体系可以保持良好的封闭状态。Zhu 等(2001)分别运用 U-Pb 法、Rb-Sr 法和 Sm-Nd 法获得了准噶尔盆地乌尔禾沥青、塔里木盆地志留系沥青年龄。

然而这种方法能否应用于有机样品尚存在争议,因为该方法是基于“无机生油”论而提出的,其理论基础尚不完善。另外,还存在一些诸如同位素体系均一化与油气运移和充注关系不明的问题,因而其数据也具有多解性。

(二) 原油/沥青 Re-Os 同位素定年技术

应用 Re-Os 同位素方法测定油气藏生成、运移、成藏年龄是国际上油气成藏定年方法研究的前沿,该方法不仅可以精确厘定油气藏油气运移和充注的时限,还可以有效示踪烃源岩。在还原环境下,Re 和 Os 不易被溶解,易于被有机物捕获而富集。作为生成油气的烃源岩中的有机沉积物是缺氧还原环境下形成的典型沉积岩,易于富集 Re 和 Os。在有机体系中 Re 和 Os 可能主要以有机络合物、化学吸附等形式存在,其中有机络合物可以使 Re 和 Os 长期稳定地保存在沥青、干酪根和原油中,同位素体系不易被后期改造作用破坏而保持良好的封闭体系(段瑞春等, 2010),因此用 Re-Os 同位素方法对沥青、干酪根、原油进行绝对定年成为可能。Creaser 等(2002)研究表明,在油气生成和运移过程中,烃源岩中的 Re 和 Os 会随着含烃流体一起发生迁移,Os 同位素比值发生均一化重新达到平衡,而 Re/Os 值发生一定程度分异,但该过程对 Re-Os 同位素体系封闭性的影响有限,因而可以构成同位素等时线,其年龄记录了油气生成的时间,而且这一年龄不受油气成熟度高低的影响,初始同位素比值还可以有效示踪烃的来源(Creaser et al., 2002)。Selby 等(2003,2005)应用 Re-Os 同位素年代学方法,选择油砂、重油中的烃类有机物作为研究对象,认为 Alberta 盆地的油气生成和运移发生在早白垩世,而不同于前人认为的晚白垩世。

然而,目前运用 Re、Os 同位素确定油气成藏年龄还存在一些问题,其原因在于 Re、Os 在自然界中的丰度很低,样品中与油气成藏有关的同位素的有效分离和提纯比较困

难,而且在进行质谱分析时,Re、Os 电离电位较高,给测试工作带来了很大的困难。另一方面,目前对有机质 Re-Os 等时线数据的解释还存在一定的问题。要获得可靠的 Re-Os 等时线年龄,必须满足三个条件:①封闭性,即 Re-Os 同位素体系必须一直保持封闭;②同源性,即 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 的初始值(Os_i)必须近似;③足够的样品, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比率具有一定的范围。但是对于沥青等有机物样品是否满足三个条件还有待进一步研究。对于具有多期油气充注的沉积盆地,Re-Os 同位素测试定年给出的等时线年龄究竟代表了什么尚缺乏认识。沥青 Re-Os 同位素等时线年龄揭示的是油气大量生成运移的时间,不同的烃源岩样品可能具有不同 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值,这对 Re-Os 体系具有一定的影响,会造成得到的等时线年龄数据比较分散,这需要结合实际油气地质特征解释(沈传波等, 2012)。

此外,对 Re-Os 同位素体系而言,确定油气成藏时限需要考虑地质过程中 Re-Os 同位素体系的重置问题。由于 Re、Os 与其他金属元素一起通过烃源岩的排烃作用从烃源岩中排出,排出后的 Re、Os 与生成的烃类物质一起在储层中经过较长距离的运移,其后由于后期构造运动的调整与破坏,最终原油中的轻质组分散失,沥青质和重质组分残留,从而形成现今看到的沥青,即沥青形成时体系的 Re、Os 同位素可能被重置(Selby et al., 2005)。因此,该方法能确定油气藏形成的时间上限,适用于晚期成藏、单期改造的油气藏,对于受到多期改造破坏的油气藏适用性较差或基本不适用。

(三) 基于原位微区分析的同位素定年技术

常规的流体包裹体定年是根据包裹体的均一温度结合埋藏史热史进行相对定年,往往具有多解性和不准确性。随着激光剥蚀技术的发展,实现了对矿物微区分析的可能,因此,针对油气包裹体及其赋存矿物的同位素定年技术也应运而生。相比前者,采用真空击碎技术的高精度同位素定年,只需一个样品即可实现对流体包裹体形成年龄的准确测定,有明显的技术优势。Mark 等(2005)在前人成熟的钾长石 Ar-Ar 法定年基础之上,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,揭示了北海 207/1a-5 井区生烃史与充注史之间约 33Ma 的时间“延迟”现象。该方法采用 UP-213 小型 UV 激光纯化系统,实现空间分辨率为:剥蚀格宽度小于 $20\mu\text{m}$,融蚀点直径小于 $10\mu\text{m}$ 。对发育油包裹体的自生钾长石选定靶区,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 同位素年龄,误差为 $\pm 2.5\text{Ma}$,将各期次油包裹体两侧剥蚀带的 Ar-Ar 年龄的算术平均值作为该油包裹体的捕获年龄,从而实现了不同期次油包裹体的精确定年。Shepherd 和 Darbyshire(1981)首先建立了测定流体包裹体 Rb-Sr 同位素年龄的方法,分析了英格兰坎布里亚郡(Cumbria)的 Carrock Fell 钨矿中流体包裹体的 Rb-Sr 同位素等时线年龄,得出成矿流体成矿年龄为 $392\text{Ma}\pm 5\text{Ma}$,与通过石英脉中云母测得的 K-Ar 年龄($387\text{Ma}\pm 6\text{Ma}$)基本一致,这种对比有效地验证了流体包裹体 Rb-Sr 等时年龄的可靠性。李华芹和刘家齐(1992)用 Rb-Sr 和 Sm-Nd 方法测定了我国华南钨矿床流体包裹体的年龄。

未来还希望发展起来的一种方法则是利用 LA-ICP-MS 原位分析技术对捕获流体包裹体的自生成岩矿物进行同位素定年来获得包裹体形成时的绝对地质年龄(李晓春等, 2010)。目前,LA-ICP-MS 原位分析技术已成功应用于锆石、独居石等矿物中 U-Pb、Lu-