

# 鄂尔多斯盆地东北部二叠系 油气成藏的时间和期次

陈 刚<sup>1</sup> 李书恒<sup>2</sup> 章辉若<sup>2</sup> 丁 超<sup>1</sup> 杨 甫<sup>1</sup> 雷盼盼<sup>1</sup>

(1. 西北大学 地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中国石油天然气股份有限公司  
长庆油田分公司, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 油气成藏年代学是多旋回叠合盆地油气成藏动力学研究的热点问题。运用钻井岩心样品的自生伊利石同位素定年和流体包裹体间接定年方法, 探讨分析了鄂尔多斯盆地东北部二叠系多期次油气成藏的时间和期次。含油气砂岩自生伊利石年龄以较宽的时间域分布在 178~108 Ma, 测年数据的统计分布特征指示二叠系原生气成藏时间主要集中在 175~155 Ma 和 145~115 Ma 两组主值年龄区间, 相应的峰值年龄为 165 Ma 和 130 Ma。流体包裹体测温数据的统计分析与其宿主砂岩磷灰石裂变径迹热史模拟路径的投影关系表明, 二叠系不同层段共同经历了与 90~78 °C 和 125~118 °C 两组统计峰温相应的 162~153 Ma 和 140~128 Ma 两期原生气成藏事件, 其中的上二叠统则还经历了统计峰温接近 98 °C、峰值年龄接近 30 Ma 的一期次生油气成藏事件。由此认为, 鄂尔多斯盆地东北部二叠系不同层段在中生代早—中期的多旋回沉降增温过程至少经历了 165~153 Ma 和 140~128 Ma 的两期原生气成藏作用, 上二叠统则在晚白垩世以来盆地后期抬升改造阶段的构造热转换过程经历了接近 30 Ma 的一期次生油气成藏作用。

**关键词:** 鄂尔多斯盆地东北部; 二叠系砂岩储层; 自生伊利石定年; 流体包裹体分析; 油气成藏年代学  
**中图分类号:** P597<sup>+</sup>.3; P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)05-1453-13

多期次油气成藏年代学不仅是石油地质学和油气勘探中一个重要的理论和实际问题, 更是多旋回叠合盆地油气运聚成藏机理和动态成藏过程研究的热点问题<sup>[1-18]</sup>。传统上, 主要根据构造热演化史、圈闭形成史与烃源岩生排烃史来推断油气成藏期次, 这些定性约束的地质分析法往往存在较大的误差因素。近十多年来, 人们开始探索油气储层自生伊利石等成岩矿物的同位素测年和基于流体包裹体测温的间接定年方法<sup>[1-9]</sup>, 极大地推进了油气成藏年代学的定量研究。但对于多旋回叠合盆地而言, “多期成盆与多旋回改造、多源生烃与多阶段混合、多期成藏与多调整或逸散”的特点<sup>[9-15]</sup>, 决定了多层系复合的油气成藏系统及其油气充注与成岩矿物生长之间关系的复杂性, 自生伊利石在多大程度上能够提供多期

次油气成藏的年代学约束、如何认识流体包裹体的世代分期及其与宿主岩层埋藏-热演化史的关系等, 在理论方法和实际应用中仍然存在一些不同的认识<sup>[1-9]</sup>。鄂尔多斯叠合盆地东北部是上古生界多期次油气成藏和多种矿产共存富集的典型地区<sup>[15-23]</sup>, 已有勘探成果不仅初步探明了大面积连片分布、多层系复合的中下二叠统大中型(特)低孔渗致密气藏, 近年来还突破中二叠统泥岩盖层在上二叠统石千峰组砂岩储层(孔隙度>10%、渗透率>2×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>)中相继发现了多个中小型低压气藏<sup>[2-26]</sup>; 但迄今为止, 二叠系多层系复合油气系统的形成期次、时间和上二叠统低压气藏是囿于原生气藏调整改造的结果还是纯属后期次生成藏等问题, 一直是该区二叠系油气勘探预测和多期次动态成藏机理研究备

收稿日期: 2012-11-28; 改回日期: 2013-07-20

基金项目: 国家 973 计划(2003CB214607)、国家留学回国人员择优资助与留学基金委西部计划项目(2007127S073)、教育部高校博士点专项科研基金(20116101110006)、陕西省自然科学基金(2012JZ5001)和中国地质调查局油气勘查项目(1212011220761)共同资助。

作者简介: 陈刚, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事含油气盆地学与油气成藏系统研究; E-mail: chengang@nwu.edu.cn。

受关注的争议问题<sup>[18-26]</sup>。据此,本文重点选择该区二叠系已发现工业气流的 Mn5、S8 和 M8 等 3 口钻井,系统采集二叠系不同含油气层段的中细粒砂岩样品,分别进行自生伊利石 K-Ar 测年和流体包裹体间接定年,并结合区域构造热演化和油气地质条件,综合探讨分析鄂尔多斯盆地东北部二叠系尤其上二叠统多期次油气成藏的峰值年龄及其时序关系,为该区多期次油气动态成藏过程及其与多种矿产耦合成矿关系研究提供重要基础和信

## 1 区域构造与油气地质特征

鄂尔多斯盆地是在古生代华北克拉通陆表海—滨浅海盆地基础之上叠合发育的中生代内陆河湖相多旋回沉积盆地,主要经历了盆地西南部多期次的逆冲推覆—前渊拗陷和盆地东部多旋回构造抬升及其沉积范围由东向西的不断退缩;晚白垩世以来,盆地全面进入了多旋回差异抬升剥蚀和周缘断陷的后期改造阶段<sup>[12-18]</sup>。中、新生代的建造和改造作用最终铸成了如图 1 所示的盆地东北部构造单元分区面貌:中东部的陕北斜坡(I)、东缘的晋西挠褶带(II)和北缘的伊蒙隆起(III)。研究区普遍缺失晚白垩世—新近纪早期的沉积地层,厚度不大的新近系上部层段以低角度不整合关系自西向东依次覆盖在下白垩统一古生界的不同层系之上,包括二叠系在内的层系界面总体呈现为向西或南西缓倾的斜坡构造面貌。盆地边缘晋西挠褶带和伊蒙隆起的构造活动性相对较强,发育一系列(中生代)逆断层、挤压背斜和一些(新生代)中小型正断构造<sup>[14-18]</sup>;斜坡带的神木—双山—榆林地区的二叠系相对平缓,仅发育一些断面陡直、性质不同的小型断层和构造裂缝<sup>[18-20]</sup>,以及近南北走向的坡折带或近北东轴向的鼻隆等低幅度构造。

鄂尔多斯盆地东北部是上古生界多期次油气成藏和多层系复合含气的典型地区,也是油气、煤、砂岩型铀矿和煤型镓矿等多种矿产共存富集的金三角地区<sup>[12-23]</sup>。上石炭—下二叠统主要由滨浅海相含煤泥质岩与三角洲砂岩构成,中二叠统下石盒子组以河流—三角洲砂岩沉积为主、上石盒子组下段发育一套具有很强封盖能力和较大厚度的区域泥岩盖层,上二叠统石千峰组主要为一套内陆河流相砂泥岩组合,其下段(Q5)发育厚度较大的中粗粒砂岩。已有勘探成果表明,盆地东北部榆林—神木地区不仅

较大规模地赋存有中下二叠统(内源或近源)下组合油气藏系统,同时还突破上石盒子组泥岩盖层,在双山—神木的 Y17、M8、S8 和 Mn5 等井区相继发现了如图 1 所示的上二叠统(源外)上组合油气藏系统<sup>[22-24]</sup>;它们的油气母岩主要为下二叠统含煤泥质岩系,烃源岩的成熟生烃及其相应原生油气成藏作用主要发生在早中侏罗世沉降埋藏增温晚期、尤其是早白垩世沉降埋藏与构造热事件联合作用下的异常热增温时期<sup>[14-18]</sup>,晚白垩世以来经历了构造抬升降温与原生油气藏调整改造作用<sup>[14-25]</sup>。从中下二叠统到上二叠统油气藏的纵向序列来看,天然气组分中甲烷含量逐渐增加,乙烷、丁烷含量和  $\delta^{13}\text{C}_{1-4}$  则不断减小,气藏压力和丰度规模也显著降低;尤其是上二叠统含油气层段突出表现为明显较低的压力系数(0.39~0.90)、较高的甲烷含量(94%~97%)、较轻的  $\delta^{13}\text{C}_1$  值(-37.1‰~36.2‰)、较低的  $\text{C}_{2-4}$  和  $\text{C}_4$  以上烃含量(0.01%~0.08%),砂岩样品薄片普遍可见沥青质充填的遗迹,总体呈现出油气藏调整改造或次生油气成藏的特点<sup>[22-26]</sup>。

## 2 基本原理与方法

由于油气本身尚未发现可供测年的对象,目前主要采用含油气储层自生伊利石等成岩矿物的 K-Ar 或 Ar-Ar 同位素测年,以及成岩胶结物中流体包裹体测温与其宿主岩层构造热演化史结合的间接定年方法,进行油气藏形成时间和期次的定量年代学分析<sup>[1-9,26-41]</sup>。通常认为,自生伊利石的形成总是与富钾的水介质有关,油气注入储层会破坏自生伊利石生长环境,自生伊利石的形成便会受到抑制或终止<sup>[1-3]</sup>。通过含油气储层粘土矿物的扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、X 衍射(XRD)分析和不同粒级伊利石的分离提纯,可以测试计算小于 1~0.15  $\mu\text{m}$  粒级的自生伊利石 K-Ar 年龄  $t$  (Ma)<sup>[28-30]</sup>:  $t = \ln\left[\frac{{}^{40}\text{Ar}^* / {}^{40}\text{K}}{\lambda / \lambda_c + 1}\right]$ , 其中  ${}^{40}\text{K}$  的总衰变常数  $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  ${}^{40}\text{K}$  衰变成  ${}^{40}\text{Ar}$  的衰变常数  $\lambda_c = 0.581 \times 10^{-10} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  ${}^{40}\text{Ar}^*$  为放射性成因  ${}^{40}\text{Ar}$  的含量,  ${}^{40}\text{K} = 1.167 \times 10^{-4} \text{K}$ 。由此算得的年龄可视为自生伊利石生长的终止年龄或油气充注成藏的最大年龄<sup>[27-30]</sup>。盐水或油气等流体包裹体是油气充注储层的成岩演化过程中被胶结方解石或次生加大石英及其愈合裂隙等捕获的成岩包裹体,这些在油气成藏过程中形成的流体包裹体相互共存于成岩矿物之中,一般不因后期构造活动的叠加改造而消失,



表 1 鄂尔多斯盆地东北部二叠系不同层段含油气砂岩自生伊利石 K-Ar 测年数据

Table 1 Autogenetic illite K-Ar dating results of Permian sandstone samples in northeastern OB

岩心样品	层位	粒度/ $\mu\text{m}$	I/S 含量/%	I/S 间层比	钾含量/%	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{m}}$	$^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$	年龄/Ma
Mn5-1a	P <sub>3</sub>	0.3~0.15	89	25	3.78	191.80658	0.0075677	125.75±1.56
		<0.15	88	25	3.86	206.06907	0.0079201	131.40±1.57
Mn5-2a	P <sub>2</sub>	0.3~0.15	71	25	5.11	199.24989	0.0064710	108.07±1.48
Mn5-3a	P <sub>1</sub>	0.3~0.15	100	5	7.24	285.20937	0.0064643	107.96±2.25
		<0.15	97	5	6.99	259.24208	0.0066518	110.99±0.80
S8-1a	P <sub>3</sub>	0.3~0.15	57	25	3.52	178.40585	0.0087612	144.81±3.20
S8-2a	P <sub>2</sub>	0.3~0.15	48	25	4.13	192.93456	0.0073358	122.03±1.57
		<0.15	50	25	4.17	177.07771	0.0076283	126.73±1.03
S8-3a	P <sub>1</sub>	0.3~0.15	96	5	5.90	360.75472	0.0109051	178.54±1.32
M8-1a	P <sub>3</sub>	0.3~0.15	78	25	3.76	219.93913	0.0099289	163.26±1.37
		<0.15	96	10	3.95	245.37399	0.0097252	160.01±1.51

用的速率和成岩矿物的生长仍然存在不同的认识<sup>[1-4,36-41]</sup>,已有实验研究发现油气注入储层后成岩伊利石生长和石英加大作用并不一定完全终止<sup>[40]</sup>,储层含水饱和度小于40%情况下水-岩作用速率会大大降低<sup>[2]</sup>,且烃类流体对成岩伊利石生长的抑制要比对石英次生加大的抑制作用会更早或更强一些<sup>[1-2]</sup>。显然,成岩矿物的生长抑制或终止在很大程度上取决于油气注入储层的温度、时间和程度的大小,尤其是多层系交互的非均质储层往往不可能同时100%为油气所饱和,只要其中还存在孔隙水介质,那些欠饱和或油气未充注的储层中各种流-岩相互作用就不会完全停止<sup>[1-3,37-40]</sup>。对于多旋回叠合盆地而言,多层系复合的油气成藏过程不仅受制于烃源岩生排烃作用的多阶段性而呈现多期次成藏的特点,而且还受到不同尺度上储层非均质性和非均匀输导层内优势输导通道的影响,呈现出多层系非均质储层油气运移路径和充注程度的显著差异性<sup>[41-43]</sup>,这就决定了多期次油气充注对非均质储层成岩矿物生长的抑制程度必然表现出不同成岩-成藏阶段和不同空间层段的非一致性,以及不同层段自生伊利石和包裹体形成世代的分期性和均一温度的多峰态分布特点。因此,自生伊利石和成岩包裹体年龄数据的综合对比分析,有可能从统计学意义上筛分提取多期次油气成藏的定量年代学信息。

### 3 自生伊利石定年

#### 3.1 样品测年数据

选择鄂尔多斯盆地东北部已发现工业气流的

Mn5、S8 和 M8 井,分别采集了下二叠统(P<sub>1</sub>)山西组、中二叠统(P<sub>2</sub>)下石盒子组和上二叠统(P<sub>3</sub>)石千峰组等不同含气层段的7块砂岩样品,在中石油勘探开发研究院实验中心进行了电镜和X衍射分析和自生伊利石 K-Ar 测年,具体方法流程见文献[28-30]。采用真空抽滤与离心分离相结合的自生伊利石提纯技术,对岩石样品分离提取了1~2 $\mu\text{m}$ 、0.45~1 $\mu\text{m}$ 、0.3~0.45 $\mu\text{m}$ 、0.15~0.3 $\mu\text{m}$ 和<0.15 $\mu\text{m}$ 的粒度组分;通过SEM、TEM和XRD等的自生伊利石鉴定分析和纯度检测,所有样品在(0.15~0.3) $\mu\text{m}$ 和<0.15 $\mu\text{m}$ 两个粒度组分下基本可以剔除碎屑伊利石、成岩绿泥石或其他含钾矿物的影响,样品中的伊利石主要为丝状或丝片状的成岩伊利石或伊/蒙有序间层矿物(I/S),I/S间层矿物含量主要分布在50%~99%间层比普遍小于5%~25%,说明分离提纯的这两个粒度组分的自生伊利石纯度较高,基本满足了自生伊利石测年要求。

通过二叠系不同层段自生伊利石样品的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 比值和K含量测试,以及基于样品XRD纯度检测的 $^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}$ 计算和检验,利用K-Ar稀释法计算获得了每块样品碎屑组分为零时的自生伊利石年龄(表1)。从测年数据可以看出,4个样品0.15~0.3 $\mu\text{m}$ 和<0.15 $\mu\text{m}$ 两个粒度组分的测年数据在误差范围内基本一致,表明这两个粒度组分的伊利石年龄基本接近自生伊利石的成岩年龄,另外3个样品<0.15 $\mu\text{m}$ 粒度组分的自生伊利石含量太低,主要给出了0.15~0.3 $\mu\text{m}$ 粒度组分的最小年龄。所有样品的自生伊利石年龄都远小于其宿主岩层二叠系年

龄(299~251 Ma),且不同层段样品的年龄大小与其埋藏深度不存在明显的正相关关系,说明自生伊利石的生长或抑制与孔隙流体化学性质随埋深变化无关,主要受到了油气的选择性充注对储层孔隙流体性质的影响<sup>[28-30]</sup>,可以代表成岩伊利石宿主砂岩储层油气充注成藏事件的年龄。

### 3.2 油气成藏的自生伊利石年龄分布

通常情况下,同期次油气充注储层的自生伊利石年龄应该基本接近,但有可能沿油气运移方向呈现出年龄数的相对减小;不同期次充注者则往往表现为前者年龄偏大、后者年龄偏小。研究区二叠系不同层段自生伊利石测年数据显示(表1),中下二叠统自生伊利石测年数据以较宽范围分布在中晚侏罗—早白垩世的178~108 Ma,主要集中在126~108 Ma,且呈现自南(S8井)向北(Mn5井)自生伊利石年龄逐渐减小的空间分布特点,其中S8井下二叠统0.15~0.3 μm 粒级组分的测年数据给出了相对偏大的年龄(178.5 Ma)、中二叠统样品两个小粒级组分的年龄减小至126~122 Ma,其北侧Mn5井的中下二叠统样品两个粒级组分的年龄更为年轻,主要集中在110~108 Ma。上二叠统样品的自生伊利石年龄主要分布在160~131 Ma,且具有类似中下二叠统样品自南向北年龄逐渐减小的空间分布特点,M8井及其以北的S8井和Mn5井自生伊利石年龄分别为160 Ma、144.81 Ma和131.4 Ma。显然,自生伊利石样品年龄的空间分布规律总体指示研究区二叠系的油气运聚成藏年龄具有自南向北逐渐减小的特点,且主要集中在早中侏罗世—早白垩世盆地多旋回沉降增温及其相应上古生界烃源岩的主要生—排烃阶段,表明二叠系不同层段都曾经历过早中侏罗—早白垩世的原生油气成藏作用。另从二叠系不同层段原生油气成藏的时序关系来看,总体具有下二叠统内源油气成藏时间(178~110 Ma)相对较早、持续较长,近源的中二叠统和源外的上二叠统的成藏时间(126~108 Ma和160~125 Ma)相对较晚、持续较短,尤其是上二叠统成藏时间持续更短、结束较早。

进一步结合文献[27]报道的粒级<0.15 μm 自生伊利石测年数据分析,下二叠统样品的自生伊利石年龄在研究区南部近邻的Y84为160 Ma,向北自M13井至F5井分别减小为132 Ma和125 Ma;中上二叠统的自生伊利石年龄则由研究区中部SS17井的152 Ma向北至S25井减小为129 Ma,总体显

示出与本次测年结果及其所反映的油气成藏时序变化规律具有较好的一致性。考虑到测年样品选择的随机性和多层系非均质储层油气充注作用的复杂性,以通常认识上烃源岩生成油气至聚集成藏的最短时限(10 Ma作为统计区间步长,将研究区二叠系不同层段的已有样品年龄数据进行了分组归类基础上的统计对比分析(图2)。结果表明,二叠系油气成藏期次主要集中在175~155 Ma和145~115 Ma的两个区间年龄组,相应的峰值年龄分别为中侏罗世的165 Ma和早白垩世的130 Ma,表明盆地东北部二叠系不同层段至少经历过两期原生油气成藏事件:早期(I)基本对应于早中侏罗世沉降增温晚期下二叠统烃源岩油气生成与二叠系原生油气成藏的时间,且呈现出中下二叠统略早于上二叠统的成藏年龄分布特点;晚期(II)则与早白垩世构造热作用阶段二叠系大规模油气生成—运聚成藏时期基本一致,且中下二叠统油气成藏时间较长,但结束时间略晚于上二叠统。由此可以看出,研究区近年来发现的上二叠统低压气藏可能并非烃源岩主生烃期之后简单的后期次生成藏,很大程度上是在中侏罗—早白垩世原生油气成藏基础上后期调整逸散或次生改造的综合结果;或许是受样品分布或伊利石测年方法本身某些局限性的影响,已有样品测年数据缺失上二叠统后期次生油气成藏的相关年龄记录。

## 4 流体包裹体相对定年

### 4.1 包裹体观察与测温

选择Mn5、S8和M8井二叠系不同深度层段的9块含油气砂岩岩心样品,切制成双面抛光包裹体薄片,在Nikon LV100POL荧光偏光显微镜下进行了包裹体的薄片观察分析。偏光显微镜下油气包裹体主要为棕褐色和淡黄色的液态烃包裹体,以及灰色或灰黑色气液烃或气烃包裹体;紫外光(UV)照射下则呈现出随成熟度增高由(橙)黄色—绿色—蓝白色的荧光变化特征,油包裹体多发微弱的黄(绿)色荧光,气液烃包裹体发(绿)蓝白色荧光,气烃包裹体大多不发荧光或仅发微弱白色荧光。与之共生的盐水包裹体无色透明但不发荧光。样品薄片的包裹体类型多样、数量较多,但个体相对偏小,4 μm×6 μm至8 μm×10 μm者相对居多。不同产状类型包裹体的成岩序次与油气包裹体宿主矿物的关系显示,二叠系不同层段样品至少可见2~3期的原生或次生油气

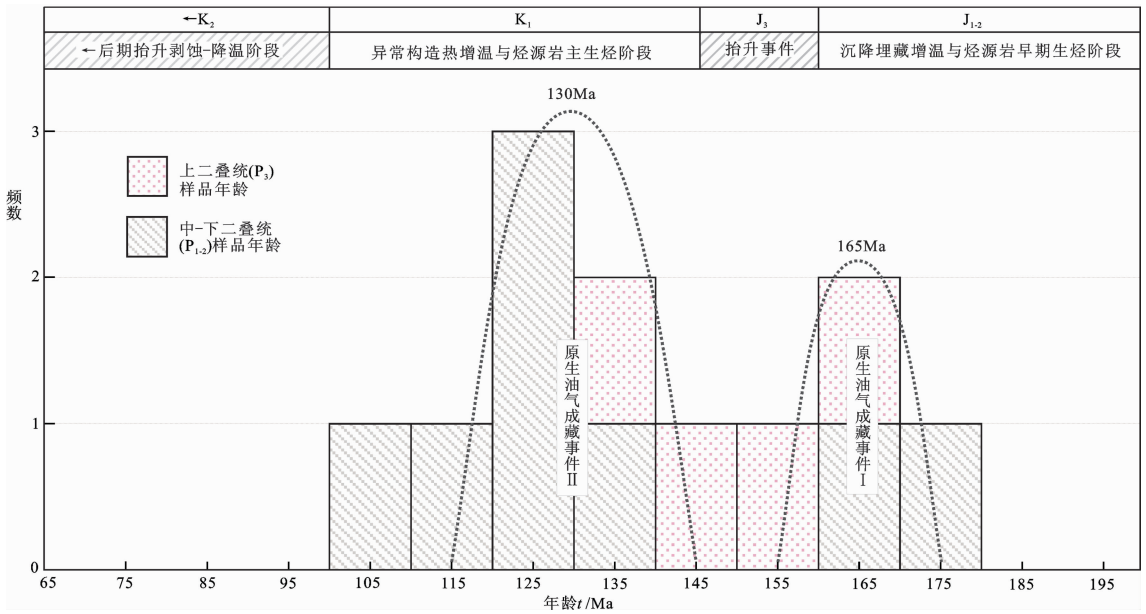


图 2 盆地东北部二叠系不同含油气砂岩层段自生伊利石测年数据的统计分布特征

Fig.2 Histogram of autogenetic illite K-Ar ages of various Permian oil-gas-bearing intervals in northeast Ordos Basin

包裹体(图 3):第 I 期主要为石英加大边和早期方解石胶结物中的黄褐色液态烃包裹体,GOI 丰度较高(3%~7%);第 II 期主要为石英次生加大和晚期方解石胶结物或部分切穿石英加大边愈合裂隙中的气(液)烃包裹体,GOI 接近 3%~5%;第 III 期主要为石英加大边和切穿加大边愈合裂隙中的气液或气态烃包裹体,GOI 接近 2%~5%,多见于上二叠统样品,且在其砂岩粒间孔隙和成岩裂隙中常见黑褐色沥青充填物等油气藏遭受改造降解的遗迹。

包裹体测温在核工业北京地质研究院测试中心 Linkam THMS 600G 冷热台上完成,测定误差为 ±0.1℃,测温时初始升温速率为 10℃/min,当包裹体临近均一状态时升温速率自动调整为 5℃/min,具体方法流程见文献[36]。在包裹体荧光偏光显微镜观察、类型产状和成岩世代分析基础上,对上述 3 口钻井二叠系不同深度层段的 9 块样品 18 件薄片进行了不同期次油气包裹体共生(含烃)盐水包裹体测试分析,测温盐水包裹体的气液比普遍 ≤5%,均一温度以较宽的范围分布在 65~135℃,盐度分布在 0.9%~12.8%。不同成岩序次或世代的流体包裹体特征及其测温数据分布总体显示(表 2),与液态烃共生的 I 期盐水包裹体均一温度相对较低,一般为 64.7~97.2℃;II~III 期为气(液)烃共生的盐水包裹体均一温度明显较高,主要分布在 90.3~134.8℃,其中成岩

矿物愈合裂隙带分布的气(液)烃包裹体在上二叠统样品薄片居多(III 期为主),与之共生盐水包裹体均一温度主要集中在 90~100℃。

#### 4.2 测温数据统计分期

包裹体世代划分与测温数据相结合的统计分期是确定包裹体宿主岩层油气充注期次和时间的重要途径。包裹体产状与其宿主矿物交切关系的成岩序次,可以从微观尺度上提供油气包裹体形成的相对世代关系,但如何将其推广到宏观尺度上的油气成藏期次分析还存在一定的多解性和人为因素<sup>[1-9]</sup>。近年来,人们对砂岩储层非均质性与油气成藏阶段性及其相互关系的研究表明,多期次油气成藏过程形成的不同世代的包裹体均一温度往往具有多总体或多峰态的统计分布特征,单一总体的“峰温”基本上代表了同期油气充注成藏过程所捕获流体包裹体的统计峰温;不同总体的多组“峰温”有可能指示了不同期次油气充注成藏过程相应流体包裹体统计峰温的分期特征<sup>[35]</sup>。通常认为,沉降埋藏型储层中包裹体的低峰态温度反映其形成时间较早,反之则形成较晚;非连续埋藏型储层尤其在后期抬升改造阶段形成的包裹体则可以比抬升前的包裹体具有较低的统计峰温。因此,包裹体统计峰温与其宿主岩层沉积-构造热演化史分析相结合,可以从宏观尺度上提供油气成藏的期次和时间约束<sup>[1-9,33-37]</sup>。

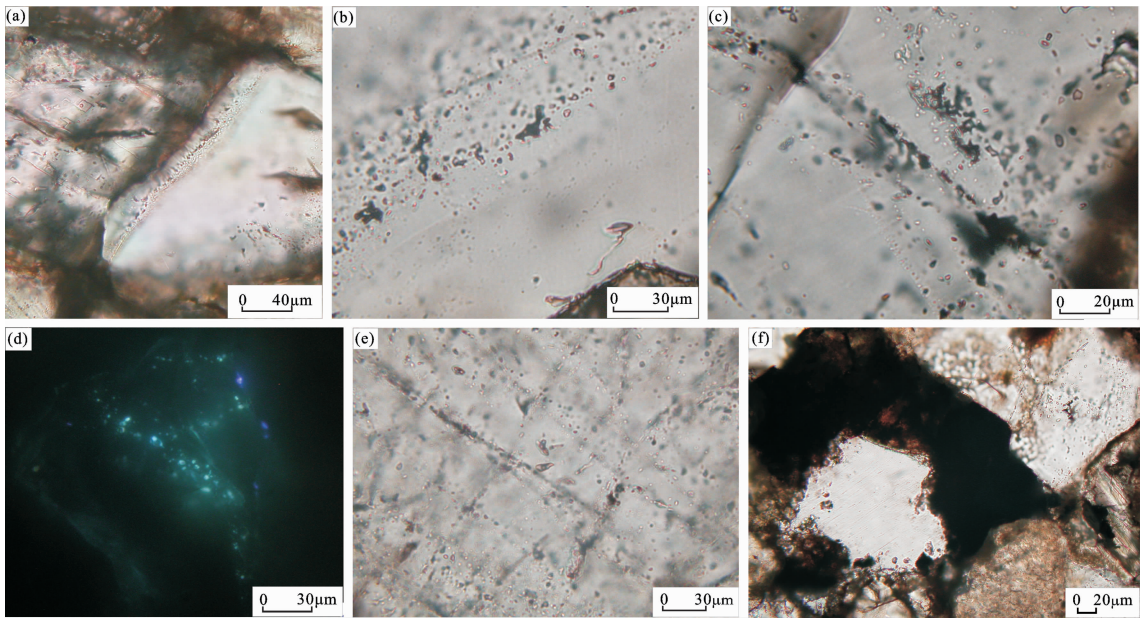


图 3 鄂尔多斯盆地东北部二叠系砂岩储层中的流体包裹体类型及其赋存状态

(a)—S8 井  $P_2$  砂岩石英次生加大和晚期方解石胶结物中的深褐色液态烃包裹体与共生的盐水包裹体; (b)—S8 井  $P_1$  砂岩沿石英加大边分布的深褐色液态烃包裹体; (c) 和 (d)—S8 井和 Mn5 井  $P_3$  砂岩石英次生加大及其切穿加大边愈合裂隙带分布的深褐色液态烃、灰色气液烃包裹体和 UV 激发蓝绿色荧光气(液)烃包裹体; (e)—Mn5 井  $P_3$  砂岩石英矿物共轭裂隙带灰色气液烃包裹体与共生盐水包裹体; (f)—Mn5 井  $P_3$  砂岩粒间孔充填沥青和石英加大边和愈合裂隙的灰色气液烃包裹体

Fig.3 Microscopic features of typical fluid inclusions of Permian sandstone samples in northeastern Ordos Basin

(a)—Oil and aqueous inclusions in quartz overgrowth and calcite cement of Middle Permian sandstone from well S8; (b)—Oil and aqueous inclusions inside the quartz overgrowth edge of Lower Permian sandstone from well S8; (c)—Dark brown oil and gray oil-gas inclusions hosted by quartz overgrowth and cements of healing fractures in Upper Permian sandstone from well S8; (d)—Yellow-green or blue-white fluorescence of oil-gas or gas inclusions hosted by quartz overgrowth and fracture healing cements in Upper Permian sandstone from well Mn5; (e)—Oil-gas and aqueous inclusions hosted by healing cements of conjugated tension fractures through quartz grain in Upper Permian sandstone from well Mn5; (f)—Dark brown asphalts in residual intergranular pores and gray oil-gas inclusions hosted by fracture healing cements in Upper Permian sandstone from well Mn5

通过包裹体测温数据的分组归类统计分析获得了鄂尔多斯盆地东北部二叠系不同层段的包裹体统计峰温分布及其相应的分期组合关系(图 4)。中、下二叠统( $P_{1-2}$ )包裹体测温数据具有相似的统计分布特征,呈现为由两个总体组成、分段连续的统计分布类型,低温总体(I  $P_{1+2}$ )和高温总体(II  $P_{1+2}$ )的均一温度分布在 69.7~101.3 °C 和 103.1~134.8 °C,分别对应于两个主值区间的测温数据 82.5~90.5 °C 和 122.5~127.3 °C 及其相应的 87.0 °C 和 124.8 °C 的统计峰温。上二叠统( $P_3$ )包裹体均一温度的统计分布则明显不同于中下二叠统的两总体分布特点,而呈现为由 3 个总体组成、分段连续的统计分布类型,低温总体(I  $P_3$ )、中温总体(III  $P_3$ )和高温总体(II  $P_3$ )的均一温度分布在 64.7~85.3 °C、90.3~107.2 °C 和 107.3~124.5 °C,分别对应于 3 个主值区间的测温数据 78.0~82.1 °C、97.5~101.5 °C 和 119.4~121.4 °C 及其相应的 79.8 °C,

98.9 °C 和 120.6 °C 的统计峰温。通常情况下,对于同一时空域形成的油气藏,不同埋深层段的流体包裹体通常应该具有下高、上低的温度分布特点,由此来看中下二叠统与上二叠统包裹体统计峰温的组合对比关系,它们的低温总体(I  $P_{1+2}$  与 I  $P_3$ )和高温总体(II  $P_{1+2}$  与 II  $P_3$ )都分别具有与其深度序列相匹配的下高、上低的统计峰温组合;但上二叠统的中温总体(III  $P_3$ )却叠合分布在中下二叠统低温总体的偏高温一侧,呈现与中下二叠统的高、低温总体分布及其统计峰温的深度序列关系均不匹配的一个相对独立的峰温总体。这种对比关系表明,二叠系不同层段共同经历了分别与包裹体低温和高温总体相对应的 79.8~87.0 °C 和 120.6~124.8 °C 两个峰温世代及其相应的两期油气充注成藏事件,上二叠统则除此之外还经历过一次相应于中温总体(III  $P_3$ )之 98.9 °C 峰温世代的油气充注作用。

表 2 鄂尔多斯盆地东北部二叠系不同层段样品的流体包裹体测试结果

Table 2 Testing results of fluid inclusion samples from Permian reservoirs in the northeastern O B

层位	样号	宿主矿物、包裹体赋存状态	盐度/ <i>f</i> %	包裹体均一温度 <i>T<sub>h</sub></i> /°C(个数 <i>n</i> )			共生烃类包裹体特征				
				I	II	III	GOI/%	液烃	气液烃	气烃	沥青
P <sub>3</sub>	Mn5-1b	次生加大石英及穿加大边裂隙	2.6~12.8	64.7-84.6(7)	90.3~124.5 (12) (II~III)	—	4±	黄褐色	—	灰色	黑褐色
	S8-1b	次生加大石英及穿加大边裂隙	0.7~1.6	78.2~101.5(4)	107.2~121.4(7) (II~III)	—	5±	黄褐色	少量	灰色	黑褐色
	M8-1b	次生加大石英及穿加大边裂隙	2.6~4.5	68.2-85.3(6)	107.3~123.2(3) (II~III)	—	2~3	黄褐色	少量	—	棕褐色
P <sub>2</sub>	Mn5-2b	胶结方解石与石英加大边裂隙	0.9~2.1	69.7-97.2(8)	103.1~123.4 (5)	—	3±	黄褐色	少量	灰色	—
	S8-2b	次生加大石英及裂隙胶结物	2.4~12.8	70.6-94.3(14) (I~II)	—	—	5±	黄褐色	—	灰色	—
	M8-2b	胶结方解石与石英加大边裂隙	1.6~2.3	78.3-82.4(3)	117.4~134.8(10)	—	5±	黄褐色	少量	—	棕褐色
P <sub>1</sub>	Mn5-3b	胶结方解石与石英加大边裂隙	0.9~17.5	70.1-96.7(10)	104.7~132.6(19)	—	3±	黄褐色	少量	—	少量
	S8-3b	次生加大石英及方解石胶结物	3.4~16.8	77.4~101.3(15)	103.4~130.2 (6)	—	4±	深褐色	少量	—	—
	M8-3b	次生加大石英及裂隙	2.6~4.2	72.5-82.5(6)	118.1~121.3(2)	—	7±	黄褐色	—	灰色	—

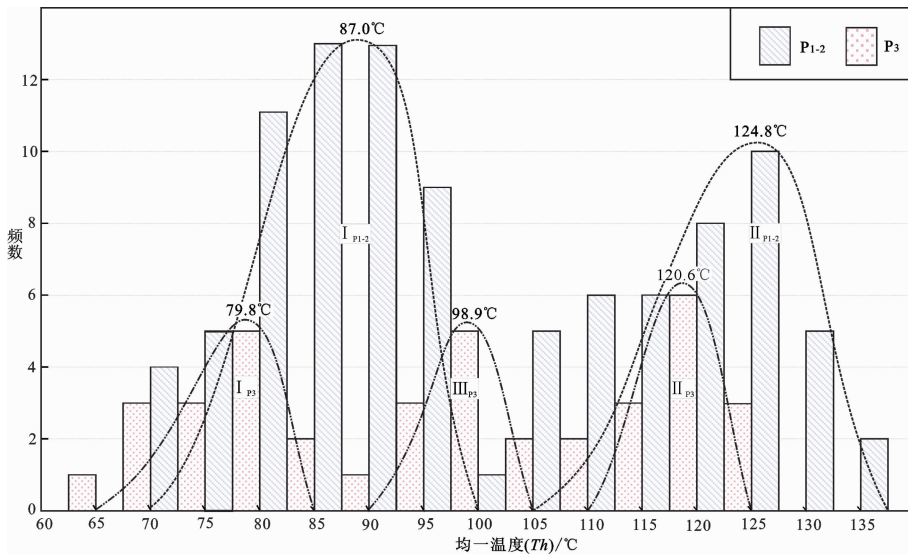


图 4 鄂尔多斯盆地东北部二叠系不同层段样品流体包裹体测温数据的统计分期特征  
Fig.4 Histogram of fluid-inclusion temperatures of the Permian samples in northeastern Ordos basin

显然,上二叠统包裹体的中温总体(III<sub>P3</sub>)在二叠系不同层段共有的高、低温两期油气充注成藏事件之外独立存在,中下二叠统砂岩储层则缺乏与之相应古地温时期的油气包裹体统计峰温记录,暗示上二叠统中温总体相应时期的油气来源不可能跨越中下二叠统而直接来自更深层的下二叠统烃源岩,最大的可能则应该是中上二叠统原生油气藏后期调整或次生运聚的结果。实际上,前述上二叠统包裹体薄片中有较多的沥青充填遗迹和切穿石英颗粒及其加大边愈合裂隙带的第三期流体包裹体更接近中温总体的均一温度记录(90~110 °C),以及前人对该区上二叠统低压次生油气藏成因机理及其相关同位素地球化学证据等,都从不同层面反映了研究区上二

叠统在晚白垩世以来盆地后期构造抬升改造过程中经历过次生油气成藏作用。结合区域构造热演化和二叠系烃源岩的生烃史分析,鄂尔多斯盆地东北部上二叠统不仅在中晚侏罗世—早白垩世沉降增温过程经历过与中下二叠统高、低温总体同步有序的两期原生油气充注事件,同时还在后期抬升改造阶段经历了一次统计峰温接近 98.9 °C 的次生油气充注成藏事件。

### 4.3 油气成藏的包裹体年龄序列

流体包裹体相对定年,除了取决于测温数据及其世代分期的准确性之外,包裹体宿主岩层的热演化史恢复也是非常重要的影响因素<sup>[1-9,33-37]</sup>。鄂尔多斯盆地东北部中—新生代经历了多旋回的沉积-构



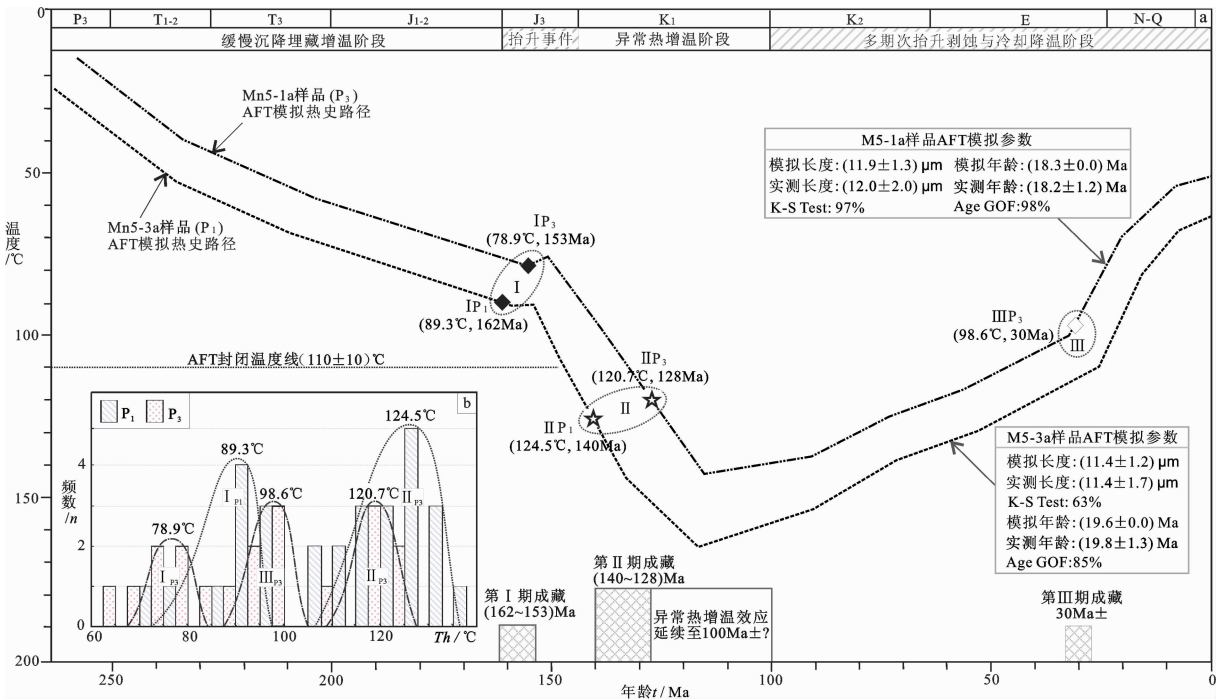


图 5 鄂尔多斯盆地东北部 Mn5 井上、下二叠统 AFT 热史路径(a)与包裹体统计峰温(b)的油气成藏时间制约  
 Fig.5 Time constraints of Permian oil-gas accumulations by the projected ages of fluid inclusion temperatures on AFT thermal paths in northeastern Ordos Basin

造演化与后期改造,晚白垩世以来多期次构造抬升和将近 1 亿年缺失或剥蚀地层原始厚度恢复的难度甚大、不确定性较多,很大程度上制约着二叠系构造热演化史与油气成藏期次和时间的认识精度。近年来,碎屑磷灰石裂变径迹(AFT)分析技术不断发展完善,AFT 热史模拟能够最大限度地减少地层剥蚀厚度参数的影响,成为多旋回抬升剥蚀区构造热演化史恢复的一种有效方法<sup>[43-45]</sup>。为此,笔者选择 Mn5 井 1465~1918 m 井段与包裹体分析样品并行的上、下二叠统砂岩样品各 3 kg,通过重矿物分选获得了每块样品均大于 1000 粒的磷灰石颗粒,在中国科学院高能物理研究所进行了 AFT 测试分析,每块样品近乎一致的 AFT 池年龄和中值年龄均明显大于其宿主岩层的沉积年龄,且较好地通过了  $P(\chi^2)$  概率检验 (76.0%~99.4%),基本代表了宿主岩层高温退火之后的抬升冷却年龄。以样品实测 AFT 年龄、长度分布和相关地质条件为约束,采用 AFT-Solve 软件和 Multi-Kinetic 退火模型<sup>[45]</sup>模拟获得了包裹体宿主岩层的中—新生代构造热演化历史(图 5)。结果显示,上、下二叠统样品共同经历了前白垩纪缓慢沉降增温—早白垩世异常高温过程的 AFT 退火和晚白垩

世以来的差异抬升冷却过程,并于新生代晚期的全面抬升到了 AFT 封闭温度以浅的未退火带深度。

考虑到不同井段样品热演化路径的差异可能对包裹体间接定年精度的影响,特别对 Mn5 井上、下二叠统与 AFT 并行样品的包裹体测温数据进行了统计分期(图 5-b),结果与图 3 二叠系不同层段包裹体测温数据的统计分布特征基本一致。将 Mn5 井上、下二叠统包裹体统计峰温投影到宿主样品的 AFT 模拟热史路径上可以看出,上、下二叠统含油气储层共同经历了第 I 期 (162~153 Ma) 和第 II 期 (140~128 Ma) 油气充注成藏作用,前者的成藏峰温主要集中在 78.9~89.3 °C 的低温总体,对应于上古生界烃源岩早中侏罗世缓慢沉降增温晚期的一次中低温油气生—排烃作用;后者的成藏峰温主要集中在 120.7~124.5 °C 的高温总体,对应于早白垩世异常热增温阶段上古生界高成熟烃源岩的大规模油气生—排烃作用。它们显然分别代表了二叠系不同层段中生代多旋回沉降埋藏—异常增温过程经历的两期原生油气充注成藏事件。如前文 4.2 述,上二叠统接近 98.6 °C 的中温总体(III P<sub>3</sub>)应该属于盆地后期抬升改造阶段捕获包裹体的温度记录,在其宿主岩层(P<sub>3</sub>)热

史路径拾升降温段的投影限定了与之相应的油气充注时间主要发生在古近纪晚期的 30 Ma 左右,对应于宿主岩层晚白垩世以来构造拾升降温曲线由缓慢转向快速拾升的关键时刻(图 5-a),指示了鄂尔多斯盆地东北部后期构造拾升转换过程以上二叠统次生油气调整充注作用为主体的第Ⅲ期油气成藏时间。因此,上、中下二叠统近乎一致地经历了中侏罗世和早白垩世的两期原生油气充注成藏作用,上二叠统的第三期油气成藏很可能是在原生油气藏基础上后期调整或次生运聚的综合结果。

## 5 主要结论与认识

综合上述自生伊利石测年与流体包裹体间接定年的相关研究结果分析,鄂尔多斯盆地东北部二叠系不同含气砂岩层段中—新生代以来至少经历了 2~3 期的油气成藏事件。自生伊利石测年数据指示二叠系尤其是中下二叠统的原生油气成藏年龄以较宽的时间域分布在早中侏罗世—早白垩世的 178~108 Ma,空间分布上呈现出自南(178~122 Ma)向北(160~108 Ma)年龄逐渐减小的变化规律,时间序列上主要集中在 175~155 Ma 和 145~115 Ma 两组主值年龄区间,相应的峰值年龄为 165 Ma 和 130 Ma,层位上表现为中下二叠统油气成藏时间较长(178~108 Ma)、结束时间要晚于上二叠统(160~131 Ma)的年龄分布特点,但没有给出上二叠统后期次生油气成藏的年龄记录。流体包裹体测温数据的统计分期总体上揭示了二叠系不同层段原生油气充注阶段 78.9~89.3 °C 和 120.7~124.5 °C 两组成岩—成藏峰温,以及主要发生在上二叠统油气次生成藏过程接近 98.6~98.9 °C 的一组统计峰温;包裹体统计峰温在其宿主岩层 AFT 模拟热史路径上的投影结果显示,二叠系不同层段的原生油气成藏事件主要发生在 162~153 Ma 和 140~128 Ma,上二叠统次生油气成藏作用则主要集中在 30 Ma 左右。两种方法测年数据及其与构造热演化史的对比关系表明,盆地东北部二叠系不同层段在中生代早中期多旋回热增温阶段均不同程度地经历了 165~153 Ma 和 140~128 Ma 的两期原生油气成藏作用,上二叠统则在晚白垩世以来盆地后期改造过程由缓慢拾升转向快速拾升的构造—热转换期经历了接近 30 Ma 的一期次生油气成藏作用。由此推测,研究区上二叠统次生气藏很可能是在中生代原生油气成藏基础上古近纪晚期调整

改造或次生成藏的综合结果。

鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气成藏的自生伊利石和成岩包裹体定年的实例分析表明,应用含油气储层中成岩矿物和成岩流体包裹体信息,结合油气地质背景和沉积—构造热演化史分析,可以推断多旋回叠合盆地油气成藏的期次和时间,并在一定程度上提供多期次油气动态成藏过程的相关信息。相比之下,成岩流体包裹体间接定年较为系统地提供了盆地东北部二叠系多期次油气成藏的年代学记录;自生伊利石测年主要在较宽时间域上限定了与流体包裹体间接定年结果基本吻合的二叠系原生油气成藏时间,但给出的年龄却相对偏老,且缺少上二叠统(晚)后期次生油气成藏的年龄记录。这种差异性究竟是与采自多层系非均质储层的测试样品数量和代表性有关,还是囿于烃类流体对成岩伊利石生长抑制要比对包裹体宿主矿物石英次生加大的抑制作用更早或更强而造成的时钟偏差,尚需进一步深化研究。实际上,受多旋回盆地烃源岩生—排烃的多阶段性、油气充注储层的非均质性、流—岩相互作用的复杂性和测试样品的局限性等多种随机因素影响,无论是自生伊利石直接测年,还是流体包裹体间接定年,它们多是在一定程度上指示了不同成藏阶段油气注入优势输导层段的时间,很难完整记录不同区段、多层系非均质储层多期次油气充注成藏的全部过程。因此,多种方法优势互补和多井段样品数据与构造热演化史相结合的综合分析,有可能是客观认识多旋回叠合盆地油气藏形成时间和多期次油气动态成藏过程的重要途径。

**致谢:** 西北大学刘池阳教授,伦敦帝国理工 Philip A. Allen 教授,长庆油田公司徐黎明、席胜利、姚泾利、刘新社和张文正研究员,核工业北京地质研究院欧光习研究员,中国地质大学袁万明教授和中石油勘探开发研究院张有瑜高工等,他们在研究思路和样品分析中给予了很多有益的启示和帮助,同时受益于论文评审专家的中肯建议,深表感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 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.  
Chen Honghan. Advances in geochronology of hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28 (2):143-150 (in Chinese with English abstract).
- [2] 王飞宇, 金之钧, 吕修祥, 等. 含油气盆地成藏期分析理论和新方法

- 法[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5):754-762.
- Wang Feiyu, Jin Zhijun, Lu Xiuxiang, et al. Timing of petroleum accumulation; Theory and new methods [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(5):754-762 (in Chinese with English abstract).
- [3] 赵靖舟. 油气包裹体在成藏年代学研究中的应用实例分析 [J]. 地质地球化学, 2002, 30(2):83-89.
- Zhao Jingzhou. Hydrocarbon inclusion analysis: Application in geochronological study of hydrocarbon accumulation [J]. *Geology and Geochemistry*, 2002, 30 (2):83-89 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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.
- Yue Fusheng, Zhang Jinglian, Cao Zhenglin, et al. Re-discussion on "definition and dating of petroleum generation and migration"[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2003, 24(1): 84-86 (in Chinese with English abstract).
- [5] Middleton D, Parnell J, Carey P, et al. Reconstruction of fluid migration history of Northwest Ireland using fluid inclusion studies [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69-70:673-677.
- [6] Kelly J, Parnell J, Chen H H. Application of fluid inclusion to studies of fractured sandstone reservoirs [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2000, 69:705-709.
- [7] 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.
- [8] Mark D F, Parnell J, Kelley S P, et al. Dating of multistage fluid flow in sandstones[J]. *Science*, 2005, 309:2048-2051.
- [9] 李文涛, 陈红汉. 多旋回叠合盆地油气成藏期次与成藏时期确定 [J]. 石油与天然气地质, 2011: 32(3):333-341.
- Li Wentao, Chen Honghan. Hydrocarbon accumulation stages and their timing in multicyclical superimposed basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(3):333-341(in Chinese with English abstract).
- [10] 金之均. 中国典型叠合盆地及其油气成藏研究新进展[J]. 石油与天然气地质, 2005:26(5):553-562.
- Jin Zhijun. New advancement in research of China's typical superimposed basins and reservoiring[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005: 26(5):553-562(in Chinese with English abstract).
- [11] 姜振学, 庞雄奇, 黄志龙. 叠合盆地油气运聚期次研究方法及应用[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4):22-25.
- Jiang Zhenxue, Pang Xiongqi, Huang Zhilong. A method for studying the oil and gas migration stages in superimposed basin and its application [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(4):22-25 (in Chinese with English abstract).
- [12] 赵文智, 张光亚, 王红军, 等. 中国叠合含油气盆地石油地质基本特征与研究方法[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(2):1-8.
- Zhao Wenzhi, Zhang Guangya, Wang Hongjun, et al. Basic features of petroleum geology in the superimposed petroliferous basins of China and their research methodologies [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30 (2):1-8 (in Chinese with English abstract).
- [13] 何登发, 李德生, 童晓光. 中国多旋回叠合盆地立体勘探论[J]. 石油学报, 2010, 31(5):698-709.
- He Dengfa, Li Desheng, Tong Xiaoguang. Stereoscopic exploration model for multi-cycle superimposed basins in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31 (5): 698-709 (in Chinese with English abstract).
- [14] 赵重远, 靳久强. 含油气盆地地质学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011:176-201.
- Zhao Zhongyuan, Jin Jiuqiang. *Geology of Petroliferous Basins*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011:176-201 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘池洋. 盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究进展[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Liu Chiyang. *Advances in the Accumulation and Formation for Multi-energy Mineral Deposits Coexisting in the Same Basin*[M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈刚, 李向平, 周立发, 等. 鄂尔多斯盆地构造与多种矿产的耦合成矿特征[J]. 地质前缘, 2005, 12(4):535-541.
- Chen Gang, Li Xiangping, Zhou Lifa, et al. Ordos Basin tectonics relative to the coupling coexistence of multiple energy resources[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12 (4):535-541 (in Chinese with English abstract).
- [17] Ren Zhanli, Zhang Sheng, Gao Shengli, et al. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos Basin [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50(Supp. II):27-38.
- [18] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- Yang Junjie. *Tectonic Evolution and Oil-gas Reservoir Distribution in Ordos Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002 (in Chinese with English abstract).
- [19] 汪泽成, 赵文智, 门相勇, 等. 基底断裂隐性活动对鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏的作用 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1):9-13.
- Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Men Xiangyong, et al. Control of basement fault minor-activity on gas pool formation of upper Paleozoic, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 9-13 (in Chinese with English abstract).
- [20] Li Rongxi, Di Lingjun, Xi Shengli. Natural gas leakage of mizhi gas reservoir in Ordos basin, recorded by natural gas fluid inclusion [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2007, 50(Supp. II):124-132.
- [21] 官色, 张文正, 彭平安, 等. 应用包裹体信息探讨鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏后的气藏改造作用 [J]. 中国科学(D): 地球科学, 2007, 37(Supp. II):141-148.
- Gong Se, Peng Ping'an, Shuai Yanhua, et al. Primary migration and secondary alteration of the Upper Paleozoic gas reservoir in Ordos basin, China—Application of fluid inclusion gases[J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2008, 51(Supp. I ):165-173.

- [22] 李明瑞, 窦伟坦, 蔺宏斌, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界致密岩性气藏成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1):56-61.  
Li Mingrui, Dou Weitan, Lin Hongbin, et al. Model for tight lithologic gas accumulation in upper Palaeozoic, east of Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 56-61 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杨华, 姬红, 李振宏, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界石千峰组低压气藏特征[J]. 地球科学, 2004, 29(4):413-419.  
Yang Hua, Ji Hong, Li Zhenhong, et al. Characteristics of under-pressured gas pool in upper Paleozoic shiqianfeng formation of eastern Ordos Basin [J]. Earth Science, 2004, 29 (4):413-419 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王震亮, 张立宽, 孙明亮, 等. 鄂尔多斯盆地神木—榆林地区上石盒子组—石千峰组天然气成藏机理 [J]. 石油学报, 2004, 25(3):37-43.  
Wang Zhenliang, Zhang Likuan, Sun Mingliang, et al. Natural gas accumulation mechanism in upper Shihezi and Shiqianfeng formations of Shenmu-Yulin district in northeastern Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25 (3):37-43 (in Chinese with English abstract).
- [25] 李振宏, 王欣. 鄂尔多斯盆地东部石千峰组天然气成藏机理初探[J]. 天然气地球科学. 2005. 16(3):314-318.  
Li Zhenhong, Wang Xin. The elementary analysis of reservoir mechanism in the shiqianfeng formation of the eastern Ordos basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16 (3):314-318 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李明瑞, 张清, 孙六一, 等. 根据流体包裹体确定神木地区上古生界气藏成藏期[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(1):47-49.  
Li Mingrui, Zhang Qing, Sun Liuyi, et al. Using fluid inclusion to determine gas accumulation stage of Neopalaeozoic in Shenmu area, Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(1): 47-49 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张艳萍. 鄂尔多斯盆地东部地区上古生界天然气成藏年代研究 [D]. 西安:西安石油大学, 2008:69-74.  
Zhang Yanping. Study on Reservoiring Period of the Upper Paleozoic Gas Reservoir of the Eastern Ordos Basin [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2008:69-74 (in Chinese with English abstract).
- [28] 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 Jiabin. The isotopic dating of authigenic illite and timing of hydrocarbon fluid emplacement in sandstone reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(2):40-43 (in Chinese with English abstract).
- [29] Hamilton P J, Kelley S, Fallick A E. K-Ar dating of illite in hydrocarbon reservoirs[J]. Clay Minerals, 1989, 24:215-231.
- [30] 张有瑜, 罗修泉, 宋健, 等. 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.  
Zhang Youyu, Luo Xiuquan, Song Jian, et al. Discussions on K-Ar isotopic geochronological studies of authigenic illites in hydrocarbon reservoirs [J]. Geoscience, 2002, 16 (4):403-407 (in Chinese with English abstract).
- [31] 邱华宁, 吴河勇, 冯子辉, 等. 油气成藏  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年难题与可行性分析[J]. 地球化学, 2009, 38(4):405-411.  
Qiu Huaning, Wu Heyong, Feng Zihui, et al. The puzzlement and feasibility in determining emplacement ages of oil-gas reservoirs by  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  techniques [J]. Geochimica, 2009, 38 (4):405-411 (in Chinese with English abstract).
- [32] Goldstein R H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems[J]. Lithos, 2001, 55:159-193.
- [33] Xiao Xianming, Liu Zufu, Liu Dehan, et al. Determination of formation time of gas pool using fluid inclusions in reservoir [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(12):957-960.
- [34] 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[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1):20-28.  
Pan Liyin, Ni Pei, Ou Guangxi, et al. Application of organic inclusion study in petroleum geology-conception, classification, formation mechanism and significance [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1):19-28 (in Chinese with English abstract).
- [35] 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.  
Li Mingcheng, Shan Xiuqin, Ma Chenghua, et al. An approach to hydrocarbon accumulation period[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(5):587-591(in Chinese with English abstract).
- [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.  
Ou Guangxi, Li Linqiang, Sun Yumei. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary basins[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25 (1):1-11 (in Chinese with English abstract).
- [37] 柳少波, 顾家裕. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 8(4): 326-331.  
Liu Shaobo, Gu Jiayu. Application of fluid inclusions to petroleum geological study and discussion[J]. Oil & Gas Geology, 1997:32(3): 326-331(in Chinese with English abstract).
- [38] McLimans R K. The application of fluid inclusions to migration of oil and diagenesis in petroleum reservoirs [J]. Applied Geochemistry, 1987, (2):585-603.
- [39] Worden R H. Can oil emplacement prevent quartz cementation in sandstones? [J]. Petroleum Geoscience, 1997, 4(2):129-137.
- [40] Karlsen D A, Nedkvitne T, Larter S R, et al. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: Application to elucidation of petroleum reservoir filling history [J]. Geochimica et Comochimica Acta, 1993, 57(15):3641-3659.
- [41] 李明诚. 石油与天然气运移 [M]. 北京:石油工业出版社, 2004: 154-207.  
Li Mingcheng. Oil and Gas Migration [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004:154-207 (in Chinese with English abstract).

- [42] Luo Xiaorong, Yu Jian, Zhang Liuping, et al. Numerical modeling of Secondary migration and its applications to Chang-6 Member of Yanchang formation (upper Triassic), Longdong Area, Ordos basin, China[J]. Science in China (Ser.D): Earth Science, 2007, 37 (Supp. II): 91-102.
- [43] Luo Xiaorong. Simulation and characterization of pathway heterogeneity of secondary hydrocarbon migration [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(6):881-898.
- [43] 张志诚, 王雪松. 裂变径迹定年资料应用中的问题及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 898-905.
- Zhang Zhicheng, Wang Xusong. The Issues of application for the fission track dating and its geological significance [J]. Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium), 2004, 40(6): 898-905 (in Chinese with English abstract).
- [44] Donelick R A, O'Sullivan P B, Ketcham R A. Apatite Fission-Track Analysis [J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2005, 58: 49-94.
- [45] Ketcham R A, Donelick R A, Donelick M B. AFT Solve: A program for multi-kinetic modeling of apatite fission-track data[J]. Geological Materials Research, 2000, 2(1):1-32.

## Timing and stages of the Permian oil-gas accumulations in northeastern Ordos Basin

CHEN Gang<sup>1</sup>, LI Shu-heng<sup>2</sup>, ZHANG Hui-ruo<sup>2</sup>, DING Chao<sup>1</sup>, YANG Fu<sup>1</sup>, LEI Pan-pan<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics and Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;  
2. Changqing Oilfield Company, PetroChina Co., Ltd., CNPC, Xi'an 710021, Shaanxi, China)

**Abstract:** Geochronology of oil-gas accumulation (OGA) is a key research frontier for petroleum reservoir-forming dynamics in the multi-cycle superimposed basin. The OGA timing and stages of the Permian reservoirs in northeastern Ordos Basin (OB) are constrained in this paper by K-Ar dating of authigenic illite (AI) and indirect dating of fluid inclusions (FI) from oil-gas-bearing sandstone core samples of the Lower-Upper Permian period. AI dating results of the Permian samples show a wide time span of 178~108 Ma and a spatial decreasing trend from 178~122 Ma in the south to 160~108 Ma in the north. The distribution of the AI ages generally reveals 2-stage primary OGA of the Permian reservoirs, which were mainly developed in the time spans of 175~155 Ma and 145~115 Ma respectively with 2-peak ages of 165 Ma and 130 Ma. Additionally, the FI temperature peaks of the samples and their projected ages on AFT thermal path of the FI-host rocks not only statistically present two groups with a low and a high peak temperatures in ranges of 90~78 °C and 125~118 °C, respectively corresponding to 2-stage primary OGA processes of 162~153 Ma and 140~128 Ma in the Permian reservoirs; nevertheless, there is also a medium temperature group with the peak of 98 °C in agreement with a secondary OGA process of ca. 30 Ma in the Upper Permian reservoirs. An integrated analysis of the AI and FI ages with the regional tectonic thermal evolution reveals that the Permian reservoirs in the northeast OB mainly experienced 2-stage primary OGA processes of 165~153 Ma and 140~128 Ma during the Mid-Early Mesozoic multi-cycle burial heating processes, and then the Upper Permian reservoirs further experienced 1-stage secondary OGA of ca. 30 Ma in accordance with a critical tectonic conversion from the slow to rapid uplift-cooling process during the Late Cretaceous-Neocene period.

**Key words:** northeastern Ordos Basin (OB); Permian sandstone reservoirs; authigenic illite (AI) dating; fluid inclusion (FI) analysis; geochronology of oil-gas accumulation (OGA)

**About the first author:** CHEN Gang, male, born in 1965; professor and supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of geology of petroliferous basins and the evaluation of petroleum system; E-mail: chengang@nwu.edu.cn.