

文章编号: 1000-0550(2001)04-0605-06

渤中坳陷油气包裹体与油气成藏^①

李荣西¹ 金奎励² 周雯雯³ 杨建业⁴

1 (中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室 贵阳 550002)

2 (中国矿业大学北京校区 北京 100083)

3 (中国海洋石油勘探开发研究中心 河北 高碑店 074010)

4 (西安科技学院 西安 710054)

摘要 含油气盆地中油气包裹体对油气运移、聚集成藏具有示踪作用。应用油气包裹体统计分析表明渤中坳陷油气运移聚集的主要层位为浅部第三系。其中下第三系砂岩中普遍含有两类油气包裹体,即原生气包裹体和次生气包裹体,它们分别记录了研究区两次油气运移、聚集成藏过程。次生气包裹体个体大、分布广、含量明显高于原生气包裹体,其主要充填分布在次生溶蚀孔隙和裂隙中。均一温度测量、包裹体成分和生物标志化合物分析结果综合表明,次生气包裹体记录的第二次油气运移是本区最主要的一次油气聚集成藏过程,其油气来源于下第三系湖相泥质烃源岩。结合地质演化特征分析认为,渤中坳陷目前油气勘探的重点应是浅部下第三系地层,而不是深部其它地层。早第三纪晚期构造运动、沉积间断和次生溶蚀孔隙特征研究,以及与之相关储层预测是本区油气勘探获得突破的关键所在。

关键词 油气包裹体 油气运移 成藏 渤中坳陷

第一作者简介 李荣西 男 1966年出生 博士后 石油地质与勘探

中图分类号 TE122.3⁺1 **文献标识码** A

1 区域地质特征简介

渤中坳陷是渤海湾盆地海域面积最大的一个坳陷,它是在古生代地台基础上,经过中生代一早第三纪断陷构造演化阶段之后,在晚第三纪到第四纪形成的一个大型沉积坳陷。由于断裂差异性升降强烈,渤中坳陷内部呈凸凹相间的构造格局,其中渤中凹陷是面积最大、沉降幅度最大的凹陷,其四周为多个凸起所环绕(图1)。古生代时本区是华北地台的一部分,寒武系到早—中奥陶世发育了一套巨厚的海相碳酸盐岩。中奥陶世末,由于受加里东构造运动影响,本区抬升隆起,遭受长期风化、剥蚀,直到中石炭世才开始沉降,形成了一套海陆交互相含煤沉积。中生代时本区断裂构造发育,形成了断陷盆地,同时岩浆活动强烈,断陷内主要以碎屑岩沉积为主,并广泛发育有中酸性火山岩。早第三纪时本区主要是翼状断陷形成阶段,其基本上奠定了现今盆地的基本构造格局,晚第三纪到第四纪本区进入强烈坳陷阶段,形成了巨厚的碎屑沉积岩系(图2)。

渤中坳陷被普遍认为是渤海湾盆地油气勘探潜力最大的坳陷之一。但长期以来人们对其油气勘探的重点层位认识不一,某一时期以深部勘探为主(如八十年



图1 渤中坳陷地质构造简图

Fig.1 Sketch map showing the geological structure of the Bozhong Depression

代的潜山油气藏),而另一时期以浅部勘探为主(如近年来上第三系油气藏)。从已发现的油气藏看,其含油气层在时代上从前寒武纪老地层到上第三系明化镇组,共20多个含油气层,在岩性上几乎包括了沉积岩、岩浆岩和变质岩三大岩石类型,显示本区油气运移、成藏特征的复杂性和多样性。沉积岩中的油气包裹体记

① 中国博士后科学基金资助

收稿日期: 2000-05-10 收修修改稿日期: 2001-02-13

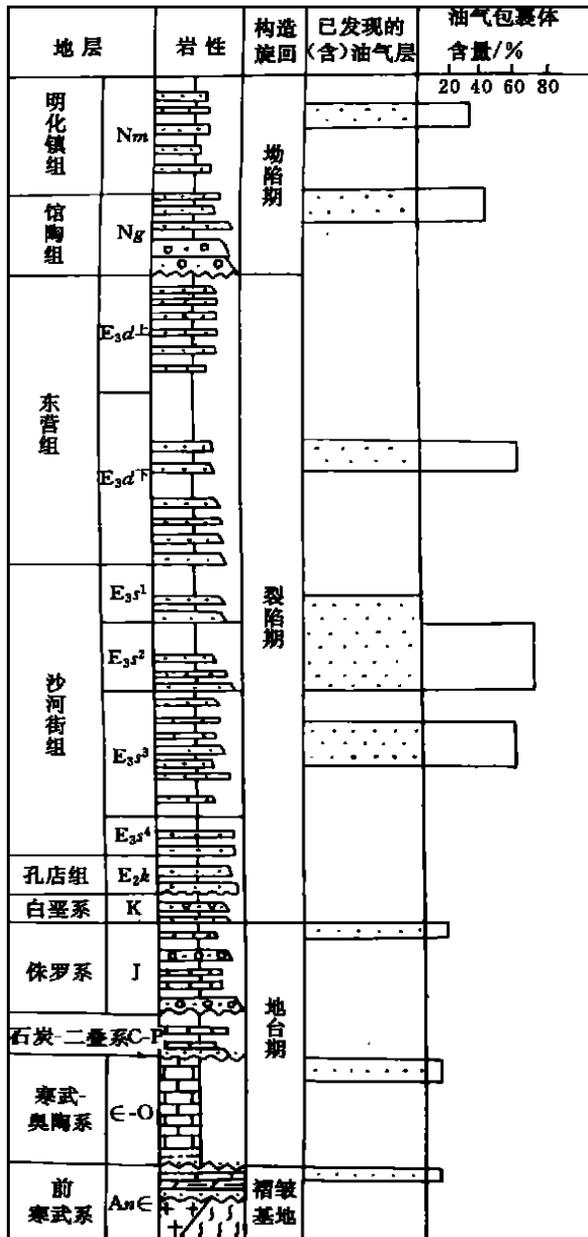


图2 渤中拗陷地层充填特征

Fig. 2 Strata and sediments in the Bozhong Depression

录了有关油气运移、聚集、成藏整个过程的大量信息, 通过对其研究, 可以重建油气运移历史, 探讨油气运移、聚集成藏规律^[1,2]。本文即在油气包裹体研究基础之上, 结合地质演化特征, 对本区油气运移和成藏规律进行分析讨论, 从而为油气勘探提供新的依据。

本次研究样品主要采自于渤中拗陷石臼砣凸起、沙垒田凸起、和渤南凸起的第三系、中生界、古生界地层和盆地基底, 岩性包括了沉积岩、火山岩和盆地结晶基底的变质岩和花岗岩。经显微镜下统计, 发现油气包裹体主要集中分布于石臼砣凸起的东二段(E_{d2})、沙垒田凸起的东三段(E_{d3})和沙河街组(E_s)、渤南凸起的东营组(E_d)和沙河街组(E_s), 而其它地层分布很

少(图2)。大量研究表明, 油气包裹体的分布和含量与油气运移和聚集趋势是一致的, 即沿油气运移路线、方向或距油气藏愈近, 油气包裹体的含量愈高^[3,4]。由上可知, 渤中拗陷油气运移、聚集的主要层位是东营组和沙河街组。本文主要研究早第三系地层中油气包裹体特征。

2 成岩作用与油气包裹体期次

成岩作用研究表明, 本区早第三纪沉积岩经历的成岩作用主要有压实作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用等。压实作用为早期最主要的成岩作用, 胶结作用贯穿于整个成岩过程中, 其主要为硅质胶结和石英次生加大, 之后出现了钙质胶结。溶蚀作用是本区最重要的一次区域性成岩事件, 其形成的大量次生孔隙和裂隙是本区最重要的储集空间。一般认为砂岩溶蚀孔隙是由有机酸作用形成的, 但在渤海海域, 即使埋深达3500m时, 有机酸含量也很低, 分析认为其不足以形成大量的次生孔隙^[5]。结合盆地沉积和构造演化历史、孔隙特征和包体测温结果(见下文)综合分析表明, 本区次生孔隙是在构造隆升过程中因大气淡水淋滤作用形成的一种溶蚀孔隙, 它是本区油气运移的主要通道和储集成藏空间。在成岩作用晚期出现了方解石交代石英胶结物等硅质成分现象。

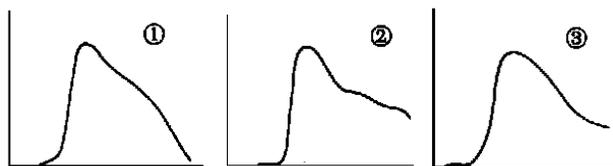
显微镜下观察表明, 本区早第三纪地层中具有两种油气包裹体, 其分别代表了两次油气运、聚过程。第一种油气包裹体主要分布在早期石英胶结物和次生加大边中, 属原生油气包裹体, 其与成岩作用同时形成, 代表了早期一次油气运移。其特征是呈近圆形、椭圆形随机分布, 多为气液二相油气包裹体, 一般小于10 μ m左右, 气/液比约为5%~10%, 大多呈淡黄色。第二种油气包裹体主要分布在石英、长石等次生溶蚀孔隙和裂隙中, 呈蜂窝状、长条状、不规则状等, 一般较大, 多在20~40 μ m, 大多为含盐水油气包裹体, 少数为纯液态油包裹体, 呈非常浅的黄色, 或无色。次生油气包裹体个体大, 分布广泛, 含量明显高于原生油气包裹体, 这说明其代表的第二次油气运移是本区重要的一次油气运移成藏过程。

3 油气包裹体形成温度及油气热演化程度

分别应用包裹体测温方法和荧光光谱方法来确定包裹体形成温度和其内油气有机质热演化程度。理论上讲, 只有均一相流体的均一温度(经压力校正)才能准确反映流体包裹体形成时的环境温度。研究表明, 油气包裹体因含有机质, 其均一温度常比同期盐水电

裹体的均一温度低^[6], 为此, 本研究特选择了与油气包裹体同期的盐水包裹体进行均一温度测量。与早期原生油气包裹体同期的盐水包裹体均一温度主要集中在 112~138℃ 之间(8 个包体平均 126℃), 而分布在溶孔隙和裂隙中与晚期次生油气包裹体共生的同期盐水包裹体均一温度主要分布在 90~117℃ 这间(11 个包体平均 103℃), 后者明显低于前者, 说明晚期次生油气包裹体形成于较低的温度条件下, 这与前面分析的次生溶蚀孔隙形成于构造抬升条件下相吻合。

油气包裹体荧光特征反映了其内有机质(油气)成分特征和热演化程度^[7, 8]。在荧光显微镜下, 两类油气包裹体均发亮黄色荧光, 二者荧光光谱(图 3)基本相似, 都呈左倾的单峰, 荧光参数(λ_{\max} 和 Q 值)均较小, 原生油气包裹体 $\lambda_{\max} = 555\text{nm}$, $Q(650/550) = 0.559$, 次生油气包裹体 $\lambda_{\max} = 545\text{nm}$, $Q(650/550) = 0.585$ 。荧光特征(单峰、低 λ_{\max} 值、低 Q 值)反映出两类包裹体内有机质热演化程度较低。据包裹体荧光研究资料^[9], 以上荧光特征反映出包裹体内油气热演化程度处于成熟阶段, 对应的镜质体反射率(R_o)约在 0.6%~0.8% 左右, 本区新生界第三系烃源岩热演化普遍达成熟阶段($R_o = 0.6\% \sim 1.2\%$), 而前第三纪地层热演化普遍达高、过成熟阶段(R_o 一般大于 1.2%)^[5], 由此可推测包裹体内油气有可能来源于第三系烃源岩, 这将在下文详细讨论。



①原生油气包裹体 ②次生含盐水油气包裹体

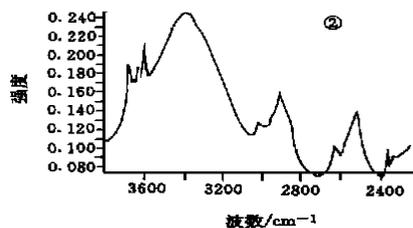
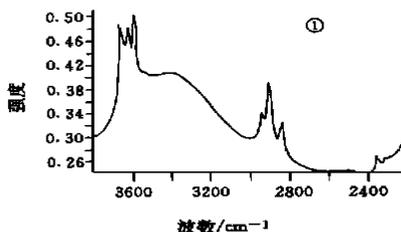
③次生纯液态烃(油气)包裹体

图3 油气包裹体荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectra of the oil-gas inclusions

① Primary oil-gas inclusion

② Brine bearing secondary oil-gas inclusion ③ Secondary oil inclusion



①原生油气包裹体 ②次生油气包裹体

图4 油气包裹体 Micro-FT-IR 光谱

Fig. 4 Micro-FT-IR spectra of the oil-gas inclusions ① Primary inclusion ② Secondary inclusion

4 油气包裹体成分分析

4.1 油气包裹体显微傅立叶红外光谱(Micro-FT-IR)分析

本分析所用的仪器为 Nidlet 750 IR PLAN 显微傅立叶红外光谱仪, 其安装有 NIC PLAN 显微镜。实验条件为扫描 512 次, 分辨率 8cm^{-1} , 采用透射式, 红外物镜为 35 \times 。样品准备和预处理方法同文献^[8], 分析结果减去背景和介质的吸收光谱, 并经 Kramers-kronig 变换, 以消除样品表面镜面反射造成的光谱失真。光谱峰的归属与鉴定参考 Painter P. C 等和 Wang S. H. 的有关资料^[14, 15]。

图 4 为油气包裹体显微傅立叶红外光谱(Micro-FT-IR), 从中可以看出两类包裹体在 2800~3000 cm^{-1} 之间的脂肪烃吸收峰很明显, 其次在 3400 cm^{-1} 附近有一特征明显的吸收峰, 为 H_2O 的吸收峰。比较之下, 次生油气包裹体 H_2O 的吸收峰较强, 说明水含量较高, 这与次生油气包裹体含盐水有关。两类油气包裹体在 3650 cm^{-1} 附近有吸收峰, 此为醇、酚等有机结构中羟基的($-\text{OH}$)伸缩振动, 说明它们含有此类化合物。应用红外光谱分谱技术, 采用计算机曲线拟合方法, 可以确定出油气包裹体中脂肪烃最大烷基碳原子数(即烷基碳链长度)^[8, 9]。据研究, 对于自然界矿物有机包裹体, 其 X 系数值介于 X_{inc} 和 X_{std} 之间, 当红外光谱变形较强时 X 值接近于 X_{inc} , 无变形时 X 接近于 X_{std} ^[9]。由于油气包裹体红外光谱变形很弱, 故其内油气有机质烷基碳原子数应接近于 X_{std} , 经计算, 次生油气包裹体烷基碳原子数为 20, 原生油气包裹体烷基碳原子数为 27(表 1)。

4.2 油气包裹体 GC/MS 分析

选用油气包裹体含量丰富, 且主要以次生油气包裹体为主的石英砂岩样用于 GC/MS 联测分析。样品特征如表 2 所示。

分析时将石英砂岩粉碎过筛, 使石英颗粒基本解

表 1 油气包裹体 Micro-FT. IR 光谱定量分析结果

Table 1 Quantitative results of micro-FT. IR of oil-gas inclusions

分析号	包裹体类型	主峰 / cm^{-1}	区间 / cm^{-1}	峰的 归属	面积	$\frac{\text{REAL}[\text{H}_{2a}]}{\text{AREA}[\text{CH}_{3a}]}$ ①	$\frac{X}{X_{\text{inc}} \cdot X_{\text{std}}}$ ②
C015	原生气 包裹体	2953	3000 ~ 2947	vCH3a	0.2580	7.2	69
		2925	2947 ~ 2880	vCH2a	1.8270		
		2872	2872 ~ 2862	vCH3s	0.0120		
		2852	2862 ~ 2800	vCH2s	0.0872		
C016	次生气 包裹体	2959	2986 ~ 2947	vCH3a	0.0830	4.8	62
		2927	2947 ~ 2878	vCH2a	0.4000		
		2873	2878 ~ 2861	vCH3s	0.0090		
		2856	2861 ~ 2820	vCH2s	0.0970		

①峰面积之比; ②X 系数为烷基碳原子数, X_{inc} : 包裹体有机质烷基碳原子数, X_{std} : 为标准有机质烷基碳原子数

表 2 用于 GC/MS 分析的砂岩油气包裹体样品特征

Table 2 Characteristics of oil-gas inclusions preserved in the sandstone sample for GC/MS analysis

井号	样深	岩性	油气包裹体特征				
			形态大小	气/液比	均一温度/°C	荧光颜色	寄主矿物
CFD18 -1-1	3253.35 /m	石英 砂岩	不规则状, 多在 10~80 μm	<10%	102~115, 平均 108(5个包体)	亮黄色	石英

表 3 油气包裹体气态烃组成特征

Table 3 Composition of organic gas in oil-gas inclusions

气态烃成分	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₁ ~C ₅
含气量(m^3/t 岩石)	1.0496	0.30000	0.1633	0.1234	0.0645	1.701
相对含量/%	61.72	17.65	9.6	7.25	3.88	

离(40~80目),用苯-甲醇混合溶液反复清洗,烘干后采用热爆法打开包裹体。用于分析的色谱仪为 HP5890GC, 质谱仪为 FINNINGAN-MAT SSQ710。

表 3 为用 GC 检测分析得出的油气包裹体气态烃组成特征(最大热爆温度 300°C), 该砂岩样包裹体中总气态烃含量为 1.701 m^3/t 岩石, 其中以甲烷(C₁)含量最高(1.0496 m^3/t 岩石), 占总气态烃的 61.72%, 当然这与热爆法打开油气包裹体过程中使其中一些重烃裂解有关。在此需要说明的是用热爆法分析得到结果是一个多期次、不同来源包体的混合成分, 该方法本身具有一定的局限性。

图 5 为油气包裹体萜烷(m/z 191)和甾烷(m/z 217)质量色谱图, 可以看出萜烷化合物中三环萜烷含量较高, 其与五环萜烷含量相当, 以 C₂₃ 为主峰, 并含有 γ -蜡烷(C 峰)。但五环萜烷以藿烷为主, 四环萜烷(C₂₄, A 峰)含量较高, 并有 C₃₀ 重排藿烷(B 峰)。

甾烷化合物中, C₂₇、C₂₈、C₂₉ 的 $\alpha\alpha\alpha R$ 构型化合物呈“V”字型分布, 重排甾烷含量丰富。甾烷 C₂₇、C₂₈、C₂₉ 中以 C₂₉ 含量最高。油气包裹体的以上生物标志化合物特征与本区第三系油气生物标志化合物基本特征相类似^[16], 它们反映了以湖相烃源岩为源岩、以水生生物和藻类为主要生油母质, 同时还有陆生母质的源岩有机质特征。结合前文油气包裹体中有机质热演化程度研究结果, 综合分析认为本区油气包裹体记录了来自于下第三系湖相泥质烃源岩的油气运聚成藏过程。

5 渤海中坳陷油气运移规律和油气勘探方向分析

渤海海域面积约 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占整个渤海湾盆地总面积(约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$)的 36.5%。渤海中坳陷是渤海海域地质构造单元的主体, 其与四周环绕的凸起构成了特殊的油气藏系统, 其内发育有包括下第三系东

下段和沙一段、沙三段及中生界和上古生界煤系地层在内的多套烃源岩, 其中下第三系东营组(E_d)—上第三系(N)最大厚度达 8 000 m, 下第三系沙一段(E_s^1)到东营组下段($E_d^{\text{下}}$)烃源岩已经进入成熟阶段^[16]。整个第三系发育了以厚层砂岩和泥岩互层为特征的湖相沉积, 具有良好的生储盖条件。和整个渤海湾盆地一样, 渤中拗陷自新生代以来, 进入一个较长期的快速沉降阶段。早第三纪的裂陷阶段, 是其发育的鼎盛时期, 主要表现为拉张断裂的形成和裂陷快速沉降、接受沉积。直到早第三纪晚期(相当与东营组沉积晚期)开始抬升隆起, 在早、晚第三纪地层之间形成一个沉积间断, 这一沉积间断在渤海湾盆地范围内普遍存在。磷灰石裂变径迹记录了 20 ~ 30Ma 间的这次构造事件^[13]。沉积间断面及其以下附近的地层岩石(主要是东营组和沙河街组)受大气淡水淋滤作用形成的大量溶蚀孔隙和裂隙, 为油气运移和聚集提供了有利的通道和场所。本区许多大的断裂是基底大断裂长期活动的继续, 下降盘箕状断陷中形成的油气可通过断裂运移到浅部具良好聚集空间和保存条件的地层中成藏。

油气运移, 油气来源于下第三系湖相泥质烃源岩, 次生油气包裹体代表的第二次油气运移是本区最重要的一次油气运移成藏过程。有两大因素控制着这次油气运移成藏作用, 一是构造运动, 二是成岩作用, 前者是指发生于早第三纪的断陷作用和早第三纪末期的构造抬升运动, 后者是指与构造抬升作用伴随的溶蚀作用。构造运动形成的拉张断裂为断陷内油气运移提供了良好的通道, 溶蚀作用在东营组和沙河街组产生的大量的次生孔隙, 为油气聚集成藏提供了有利的空间。由此决定了本区油气运移、聚集的有利层位是东营组和沙河街组, 而在构造高点, 有被断裂与下部烃源岩贯通的上第三系也是晚期油气运移和聚集的有利场所。这就说明了在本区诸多含油气层中为何第三系含油气最丰富、油气藏规模最大, 一直是本区主力生产油层。

6 结论

通过有机包裹体研究表明渤中拗陷有过两次油气运移, 而晚期的一次油气运移是本区最重要的成藏作用。渤中拗陷油气来源主要是下第三系的湖相泥岩, 油气运移、聚集成藏的主要层位是下第三系的东营组和沙河街组。分析认为渤中拗陷目前油气勘探的重点应该放在浅部的第三系地层, 而不是深部的其它地层。早第三纪晚期的构造运动特征、早、晚第三纪之间沉积间断面及其以下地层岩石次生孔隙特征研究和与之相关储层预测是渤中拗陷油气勘探获得突破关键之所在。

参 考 文 献

- Burruss R C. Hydrocarbon fluid inclusion in studies of sedimentary diagenesis[J]. Mineralogical Association of Canada, 1981, 6: 138 ~ 156
- 施继锡, 傅家谟, 李本超. 有机包裹体及其与油气的关系[J]. 中国科学(B辑), 1987, 3: 318 ~ 325
- Karlsen D A, Nedkvitne T, Larter S R, *et al.* Hydrocarbon composition of authogenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 3641 ~ 3659
- Nedkvitne T, Karlsen D A, *et al.* The relationship between diagenetic evolution and petroleum emplacement in the Ula Field, North Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1993, 10: 255 ~ 270
- 武文来, 周士科. 渤海海域深部碎屑岩储层孔隙预测[J]. 中国海上油气, 1997, 11(4): 240 ~ 248
- Newell K D, Burruss R C, Palaces J G. Thermal maturation and organic richness of potential petroleum source rocks in Proterozoic Rice formation, North American Mid-Continent rift system, Northeastern Kansas[J]. *AAPG Bull.*, 1993, 11: 1922 ~ 1941
- Burruss R C. Practical aspect of fluorescence microscopy of petroleum fluid inclusions[J]. *SEPM (Society of Sedimentary Geology)*, 1991, 25: 1 ~ 7

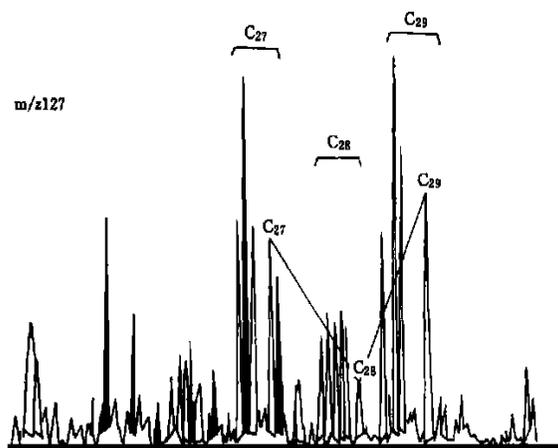
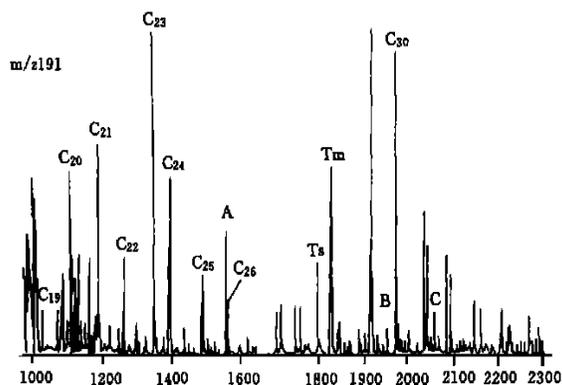


图5 油气包裹体萘烷(m/z 191)、甾烷(m/z 217)质谱图

Fig. 5 Mass spectrometry of oil-gas inclusions

前面油气包裹体研究结果表明, 本区曾有过两次

- 8 李荣西, 金奎励, 廖永胜. 有机包裹体显微傅立叶红外光谱和荧光光谱测定及其意义[J]. 地球化学, 1998, 27(3): 244~250
- 9 Pironon J. Organic inclusion in salt. Part I: Solid and liquid organic matter carbon dioxide and nitrogen species in fluid inclusion from the Bresse basin(France)[J]. Org. Geochem., 1995, 23(5): 39~402
- 10 Pamell J, Ansong G, Jiamo F, Guoying S. Geology and geochemistry of bitumen vein deposits at Ghost City, Junggar Basin, Northwest China[J]. Geol. Mag., 1994, 131: 181~190
- 11 Pironon J, and Burres O. Semi-quantitative FT-IR microanalysis limits: evidence from synthetic hydrocarbon fluid inclusions in sylvite[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1990, 54: 509~518
- 12 Melimans R K. The application of fluid inclusion to migration of oil and diagenesis in petroleum reservoirs[J]. Applied Geochemistry, 1987, 2: 585~603
- 13 郭随平, 施小斌, 王良书. 胜利油区东营凹陷热史分析—磷灰石裂变径迹证据[J]. 石油天然气地质, 1996, 107(1): 32~36
- 14 Painter P C, Snyder R W, Starsinic M, *et al.* Concerning the application of FT-IR to the study of coal: a critical assessment of band assignments and the application of spectral analysis programs[J]. Appl. Spectrosc., 1981, 35: 475~485
- 15 Wang S H, Griffith P P. Resolution enhancement of reflectance IR spectra of coal by Fourier self-deconvolution. I. C-H stretching and bending models. Fuel[J]. 1985, 64: 229~236
- 16 龚再升, 王国纯, 贺清. 上第三系是渤海中坳陷及其周围油气勘探的主要领域[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(3): 145~156

Oil-Gas Inclusions and Reservoir Formation in Bozhong Depression of the Bohaiwan Basin

LI Rong-xi^{1,2} JIN Ku-li² ZHONG Wen-wen³

1 (Open Lab of Ore Deposits Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

2 (China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

3 (China Offshore Oil Exploration and Development Research Center, Gaobeidian Hebei 074010)

4 (Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 7100543)

Abstract

Two types of oil-gas inclusions, the primary and the secondary, were recognized in the Tertiary clastic rocks in Bozhong Depression of the Bohaiwan Basin in Northeastern coastal area of China. These two types of oil-gas inclusions recorded two stages of oil migration and accumulation in the region. The secondary porosity and fractures, filled with abundant secondary oil-gas inclusions, are the kind of dissolution pore formed by the eluviation due to the uplift of the region at the end of the early Tertiary. Data from temperature measurements and analysis to compositions together with biomarkers of the oil-gas inclusions indicate that the oil trapped in secondary porosity and fractures originated from the lower Tertiary lacustrine source rocks and the oil accumulations were controlled by the Tertiary tectonics and diagenesis. It is proposed that targets for oil exploration in the region should focus on the Tertiary sediments rather than the Pre-Tertiary depositions. Tectonics, sedimentary discontinuity between lower and upper Tertiary and reservoir prediction are the key subjects for oil prospecting in the region.

Key words oil-gas inclusion, migration accumulation, Bozhong depression, Bohaiwan Basin