

西湖凹陷孔雀亭构造平湖组油气来源及充注特征

李朝阳¹, 魏琳^{1*}, 刁慧², 程熊¹, 侯读杰¹

¹ 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

² 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

* 通信作者, linwei@cugb.edu.cn

收稿日期: 2020-03-31

中国地质大学(北京)基本科研业务费(35832019035)和国家科技重大专项(2016ZX05027001-003)资助

摘要 西湖凹陷平湖斜坡带北部孔雀亭含油构造油气资源丰富, 但成藏过程复杂, 其油气来源和充注过程尚不明确。通过油源对比及流体包裹体岩相学、均一温度、盐度、结合激光拉曼测试等多种方法, 对孔雀亭构造油气来源、油气充注期次和成藏时间进行了分析。研究表明孔雀亭地区烃源岩主要分布在古近系始新统沉积的平湖组、宝石组地层, 烃源岩类型包括煤、碳质泥岩和泥岩, 有机质类型为 II_1-II_2 型; 平湖组上、中、下段和宝石组烃源岩总有机碳含量(TOC)、生烃潜力(S_1+S_2)、氢指数(HI)等指标有所差异, 其中平下段烃源岩有着较高的总有机碳含量; 平湖组、花港组砂体多层系含油, 油气地球化学性质均有差异, 油源对比显示该区油气可划分为2类, I类较低成熟度的油气来源于孔雀亭地区中低带平湖组下段烃源岩, II类较高成熟度的油气可能来源于中低带宝石组烃源岩; 平湖组储层发育2期流体包裹体, 第1期气液两相包裹体发黄色、黄绿色、蓝绿色荧光, 因经历再平衡作用, 认为其捕获均一温度为130~140 °C, 成藏时期为5~2 Ma, 以轻质油和凝析油充注为主; 第II期天然气包裹体呈灰色, 无荧光显示, 未经历再平衡作用, 结合主峰均一温度140~150 °C, 认为成藏时期为2 Ma至今, 以天然气充注为主, 呈现晚期充注特征。激光拉曼检测到包裹体中含有沥青质, 推测晚期可能伴有气洗作用。研究认为孔雀亭构造油气主要成藏时间为三潭组沉积至今, 具备优良的储盖组合与构造演化的时空配置, 具有“早油晚气, 晚期成藏”的充注特点。

关键词 孔雀亭构造; 油源对比; 流体包裹体; 均一温度; 盐度; 激光拉曼; 成藏期次

Hydrocarbon source and charging characteristics of the Pinghu Formation in the Kongqueting Structure, Xihu Depression

LI Chaoyang¹, WEI Lin¹, DIAO Hui², CHENG Xiong¹, HOU Dujie¹

¹ School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

² Shanghai Branch of CNOOC (China) Co. Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract The Kongqueting oil-bearing structure located in the north of the Pinghu slope belt in the Xihu Depression has abundant oil and gas resources, but the process of hydrocarbon accumulation is complicated, and the oil and gas sources and charging processes are still unclear. The sources, charging periods and accumulation time of oil and gas in the Kongqueting structure were investigated by means of oil—source correlation, petrography, homogenization temperature, salinity of fluid

引用格式: 李朝阳, 魏琳, 刁慧, 程熊, 侯读杰. 西湖凹陷孔雀亭构造平湖组油气来源及充注特征. 石油科学通报, 2021, 02: 196-208

LI Chaoyang, WEI Lin, DIAO Hui, CHENG Xiong, HOU Dujie. Hydrocarbon source and charging characteristics of the Pinghu Formation in the Kongqueting Structure, Xihu Depression. Petroleum Science Bulletin, 2021, 02: 196-208. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.016

inclusions and laser Raman measurement. The results show that source rocks are mainly distributed in the Eocene Pinghu and Baoshi Formations. Source rocks include coal, carbonaceous mudstone and mudstone, and the organic matter type is $II_1 - II_2$. The total organic carbon content (TOC), hydrocarbon generation potential (S_1+S_2) and hydrogen index (HI) of source rocks of Upper, Middle and Lower Pinghu Formations and Baoshi Formations are different. Source rocks of the Lower Pinghu Formations have higher total organic carbon content. The sandbodies of the Pinghu and Huagang Formations are multi-layer oil-bearing systems, and the geochemical properties of the oil and gas are different. The oil-source correlation shows that the oil and gas in this area can be divided into two type: the oil and gas with lower maturity of type I are derived from source rocks of the lower Pinghu Formation in the middle and lower belts in the Kongqueting area, while the oil and gas with higher maturity of type II may be derived from the source rocks of the middle and lower belts of the Baoshi Formation. The fluid inclusions in the Pinghu Formation develop two stages: In the first phase, the gas-liquid two-phase inclusions fluoresce in yellow, yellow-green and blue-green. Due to the special geologic processes, the capture homogenization temperature was 130~140 °C, and the accumulation period was 5~2 Ma, which was dominated by light oil and condensate oil charging. The natural gas inclusions of the second stage were gray with no fluorescence display and had not experience the special geologic processes. Combined with the main peak homogenization temperature of 140~150 °C, it was considered that the hydrocarbon accumulation period was 2 Ma till now, featured as natural gas charging, showing the characteristics of late charging. Asphaltene in the inclusions was detected by laser Raman and it is speculated that there may have been gas washing in the late stage. The study shows that the main time of hydrocarbon accumulation in the Kongqueting structure is from the deposition of the Santan Formation up to the present day. It has a good spatiotemporal arrangement of reservoir-cap assemblage and structural evolution, and has the charging characteristics of "early oil, late gas and late accumulation".

Keywords Kongqueting Structure; oil source correlation; fluid inclusion; homogenization temperature; salinity; laser Raman; accumulation period time

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.02.016

0 引言

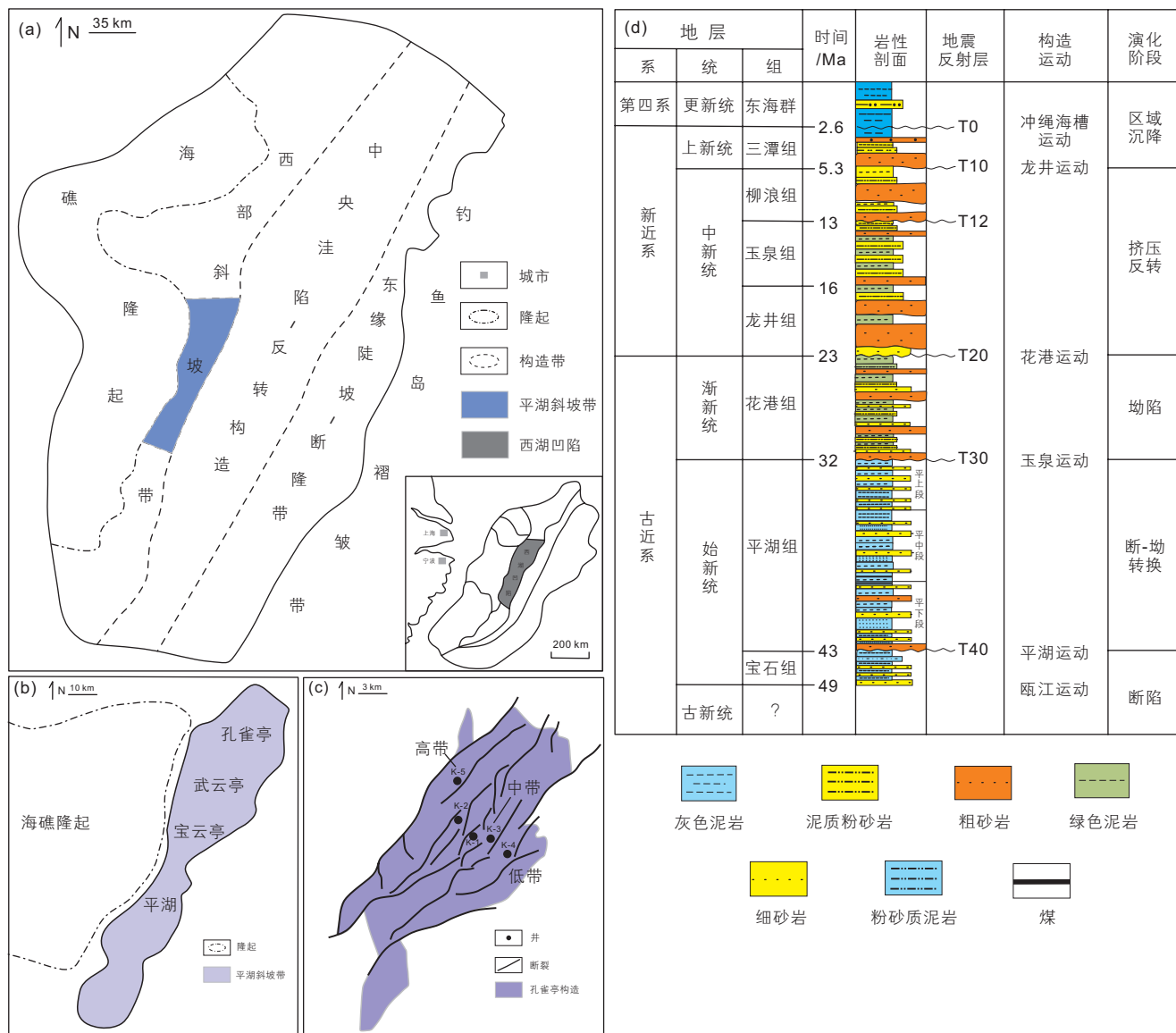
基于烃源岩评价、原油性质和油源对比综合分析油气来源,结合流体包裹体特征判断油气充注时间和期次,已经成为含油气盆地成藏研究中的一项重要工作^[1-7]。西湖凹陷平湖斜坡带油气资源丰富,主要包括孔雀亭、武云亭、宝云亭、平湖4个构造带,但不同含油构造成藏过程复杂、差异性明显。近年来不同学者对油源组合、成藏时间等问题开展了一定的研究工作,但对于成藏时间及期次的认识具有较大差异,具体包括:(1)刁慧^[8]等认为武云亭构造经历两期油气充注,气态烃充注晚于油气两相烃充注,充注时间均为2 Ma,且认为原油和对应成熟度的天然气来自于本地平湖组烃源岩,高成熟度天然气来自于东侧主注平湖组烃源岩;(2)苏奥^[9]等认为宝云亭构造经历两期油气充注,充注时间为19.2~15.6 Ma和11.3~2.8 Ma,一期天然气充注,充注时间为2.5 Ma至今,同时还存在一次混源作用和气洗作用;(3)苏奥等^[10]认为南部平湖构造带存在两期油气充注,第一期为16.8~13.2 Ma,第二期为10 Ma至今。孔雀亭构造是西湖凹陷平湖斜坡带近几年的勘探重点,但目前对该构造详细的油气来源及充注特征相关研究仍较为薄弱,孔雀亭地区平湖组下覆宝石组泥岩是否有生烃贡献,其与斜坡带其它

含油构造区油气充注特征是否具有差异,值得进一步研究。因此本研究综合孔雀亭构造相关井的油气地球化学分析及流体包裹体资料,对孔雀亭地区的油气充注成藏特征进行详细分析,确立了油气充注时间和期次,为进一步认识该区油气成藏过程奠定了基础。

1 研究区概况

东海陆架盆地位于中国东海大陆架之上,地处欧亚板块东南缘与西太平洋板块构造活动带的中部,其东接钓鱼岛岩浆岩带,西与浙闽隆起带相邻,南北与中国东海边界相同^[11]。东海陆架盆地自东向西可划分为东部坳陷带、中部隆起带和西部坳陷带3个构造单元^[12]。西湖凹陷位于东海陆架盆地的东部坳陷带,呈NNE走向,由3个一级构造单元组成,自东向西依次为:东缘陡坡—断隆带、中央洼陷—反转构造和西部斜坡带(图1a)^[13]。

平湖斜坡带位于西湖凹陷西部斜坡带中部,是西湖凹陷内勘探程度最高、油气最富集的区带之一,自北向南细分为孔雀亭、武云亭、宝云亭、平湖4个次级构造单元(图1b)^[14]。孔雀亭构造位于平湖斜坡带北部的鼻状隆起带上,在古新一始新世断陷期受平湖运动影响,发育同生断裂以及大量因断裂而形成的构



(a) 西湖凹陷构造位置图; (b) 平湖斜坡带构造位置图; (c) 孔雀亭构造位置图; (d) 孔雀亭构造地层柱状图

图1 研究区构造位置及地层柱状图

Fig. 1 Tectonic-stratigraphic division of the study area

造圈闭,成为顺倾向节节下掉的断块群(图1c)。根据斜坡带井的位置与海礁隆起和洼陷中心相对远近又划分为高带、中带和低带(图1c,靠近隆起侧为高带)。研究区由下而上发育了古新统宝石组(顶界面T40)、始新统平湖组(顶界面T30)、渐新统花港组(顶界面T20)以及中新统以上地层(图1d),主力油气产层为始新统平湖组和渐新统花港组^[15-17]。平湖组发育于西湖凹陷裂陷演化晚期,经历了振荡式水进、水退沉积,该沉积时期以淡水沉积为主,间歇发育半咸水沉积特征,为三角洲—潮坪沉积体系。根据其地震反射特征又分为上、中、下三段,岩性以砂泥岩互层为主,其间夹有多层厚度不等的煤层^[18]。

2 油气来源分析

2.1 烃源岩特征

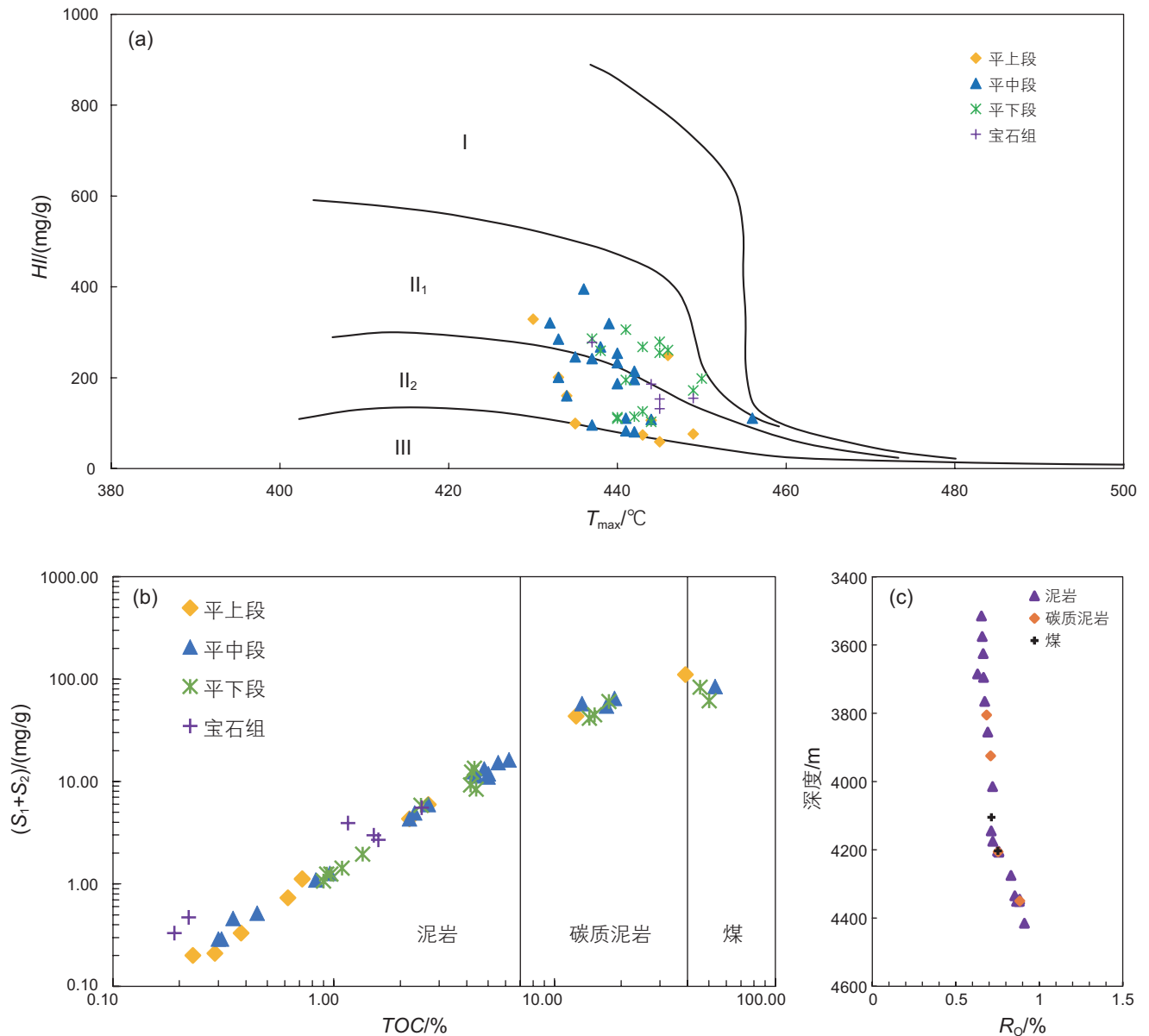
前人^[9]研究认为孔雀亭地区烃源岩主要分布在花港组和平湖组,近年来的研究认为,花港组虽然发育有一定厚度的泥岩,但由于埋藏深度较浅,其生、供烃能力较差,而埋藏更深的宝石组泥岩具有一定的生烃能力^[10]。因此本研究选取了孔雀亭构造K-1井、K-3井共33块烃源岩样品(包含宝石组泥岩)进行岩石热解分析,对该区不同埋深烃源岩的特征进行了总结。

由实验数据可知,孔雀亭构造平湖组上、中、下段和宝石组烃源岩有机质类型以II₁—II₂型为主(图2a);平上段烃源岩有机碳含量(TOC)平均值5.95%,生烃潜量(S₁+S₂)平均值为16.86 mg/g,氢指数(HI)平均值为145.2 mg/g;平中段烃源岩有机碳含量平均值为7.42%,生烃潜量平均值为18.61 mg/g,氢指数平均值为205.55 mg/g;平下段烃源岩有机碳含量平均值为11.19%,生烃潜量平均值为23.19 mg/g,氢指数平均值为203 mg/g;宝石组烃源岩埋藏较深,现有资料显示其煤层不发育,主要为泥岩,有机碳含量平均值1.2%,生烃潜量平均值为2.66 mg/g,氢指数平均

值为168.17 mg/g,且根据烃源岩有机碳含量和生烃潜力的相关关系,对烃源岩进行了分类研究,分类标准为:泥岩有机碳含量小于7%;碳质泥岩有机碳含量7%~40%;煤有机碳含量大于40%(图2b)。根据烃源岩成熟度和深度关系可知,平湖组、宝石组烃源岩在3500 m左右均已达到生烃门限(图2c),并且有机碳含量和生烃潜量等指标较好,均具备生烃供烃能力。

2.2 油气地球化学特征和来源分析

本研究挑选了孔雀亭地区高带K-5井14块烃源岩样品和中低带K-1井13块烃源岩样品,以及K-1井、



(a) 烃源岩有机质类型划分; (b) 烃源岩岩性划分; (c) 烃源岩 R_o 与深度关系

图2 孔雀亭地区烃源岩地球化学特征

Fig. 2 Geochemical characteristics of source rocks in Kongqueying area

K-3井、K-4井、K-5井4个油样和K-1井、K-2井、K-3井、K-4井4个天然气样进行油源对比分析(井位置见图1c)。原油和烃源岩样品进行了气相色谱-质谱分析,气相色谱实验使用Agilent 7890A气相色谱仪完成,色谱-质谱实验使用Agilent 7890A-5975C气相色谱-质谱联用仪完成。原油和天然气组分碳同位素的分析由气相色谱-同位素比值质谱仪(GC-IRMS)完成。

由实验数据可知,孔雀亭构造原油成熟度(低Pr/nC₁₇,低Ph/nC₁₈)明显高于高带烃源岩(图3),与中低带烃源岩成熟度更接近(图4a)。由不同层段烃源岩生物标志物参数对比可知(图4),平湖组上、中、下段和宝石组烃源岩具有一定的差异,宝石组烃源岩Pr/nC₁₇值、Ph/nC₁₈值、Pr/Ph值、16 β -扁枝烷/异海松烷值、二萜烷/nC₂₀值和降异海松烷/异海松烷值均最低,而平下段烃源岩Pr/Ph值、二萜烷/nC₂₀值较高(图4b, c)。由孔雀亭原油生物标志物参数特征可知(表1),原油可以分为两类,即K-3、K-4、K-5井原油为I类, K-1井原油为II类。I类原油其成熟度(相对较高的Pr/nC₁₇, Ph/nC₁₈)低于II类原油, 16 β -扁

枝烷/异海松烷值也低于II类原油,全油碳同位素轻于II类原油,而Pr/Ph值、二萜烷/nC₂₀值和降异海松烷/异海松烷值高于II类原油。这些特征与平下段和宝石组烃源岩具有很好的相似性,因此认为I类原油来源于中低带平下段烃源岩,II类原油来源于中低带宝石

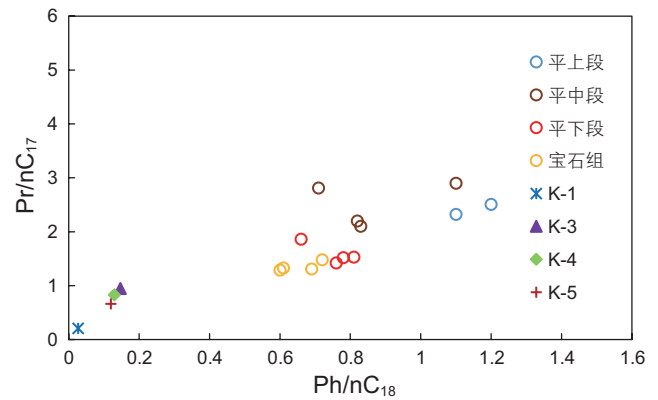
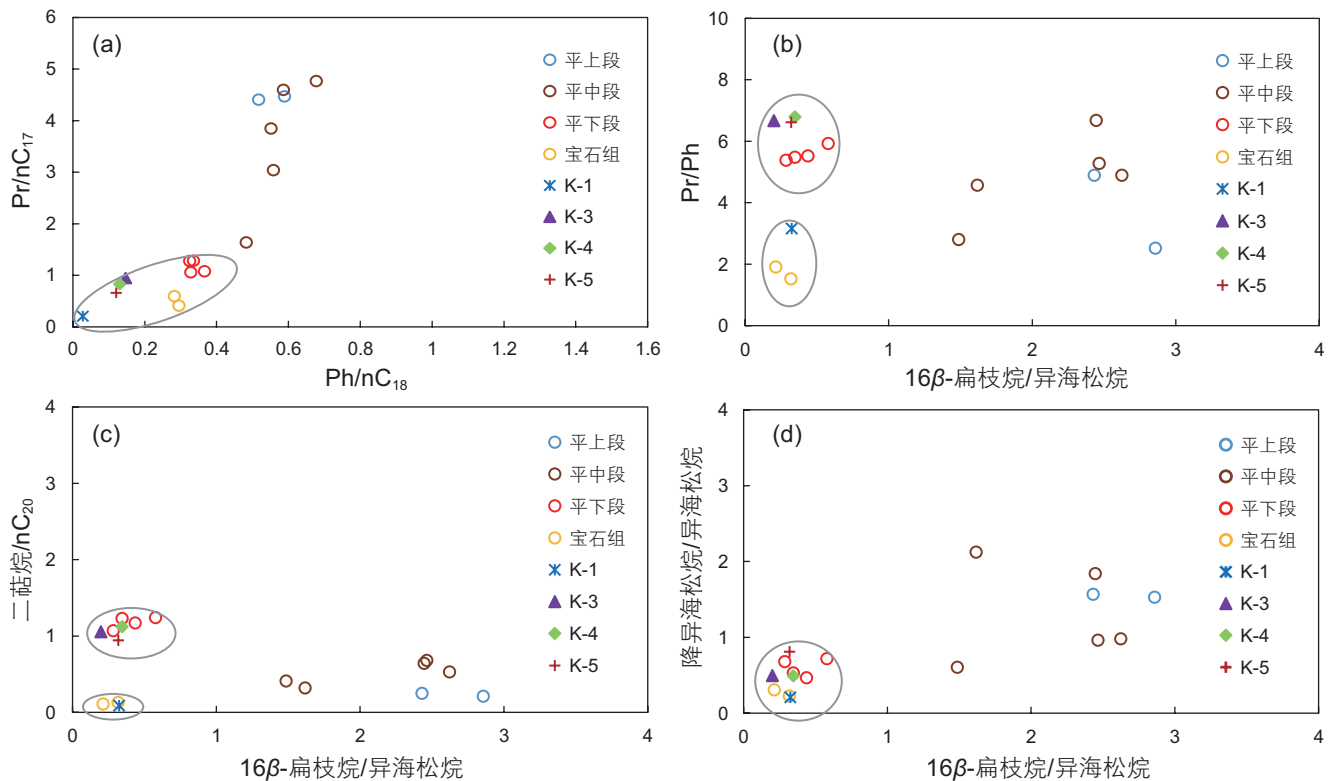


图3 孔雀亭构造原油与高带烃源岩生物标志物参数对比
Fig. 3 Biomarker parameters comparison between the crude oils and source rocks located in high zone in Kongqueting structure



(a)Pr/nC₁₇与Ph/nC₁₈关系图; (b)Pr/Ph与16 β -扁枝烷/异海松烷关系图; (c)二萜烷/nC₂₀与16 β -扁枝烷/异海松烷关系图; (d)降异海松烷/异海松烷与16 β -扁枝烷/异海松烷关系图

图4 孔雀亭构造原油与中低带烃源岩生物标志物参数对比

Fig. 4 Comparison of biomarker parameters between the crude oil of the Kongqueting structure and the source rocks located in middle and low zones

表 1 孔雀亭地区原油地球化学特征统计表

Table 1 Typical biomarker and carbon isotope data showing geochemical characteristics in studied crude oil in Kongqueting area

井号	Pr/n C ₁₇	Ph/n C ₁₈	Pr/Ph	二萜烷/nC ₂₀	16β-扁枝烷/异海松烷	降异海松烷/异海松烷	δ ¹³ C _{oil} /‰
K-1	0.21	0.03	3.16	0.09	0.32	0.21	-24
K-3	0.95	0.15	6.68	1.05	0.21	0.49	-26
K-4	0.83	0.13	6.79	1.12	0.35	0.49	-26
K-5	0.66	0.12	6.62	0.94	0.32	0.81	-27

组烃源岩(图 4)。

孔雀亭构造凝析油是与天然气伴生的,二者来源应该相同,且由图 5 可知 K-1 井天然气 δ¹³C₂, δ¹³C₃ 明显重于该区其它井天然气,反映其具有更高的成熟度与不同的母源,而且上文已经指出 K-1 井凝析油的成熟度也更高(更低的 Pr/nC₁₇, Ph/nC₁₈),二萜烷含量低(二萜烷/nC₂₀=0.09),异海松烷占绝对优势,扁枝烷含量低,轻组分更丰富、含有丰富的 C₂₇ 甾烷,藿烷系列以 C₃₀ 为主峰, T_m 与 C₃₁ 升藿烷含量较低。这一分布特征与本井钻遇的宝石组泥质烃源岩分子地球化学特征完全一致(图 6),也再次表明 K-1 井凝析油与天然气来源于宝石组烃源岩。前人^[19]研究推测认为孔雀亭构造原油和天然气为本地和东侧西部次洼平湖组烃源岩混合来源,即成熟度更高的油气来源于深部次洼,但由于深部次洼烃源岩埋藏深,取样难度大,只能根据成熟度差异进行推测。而本研究充分考虑了本地埋藏较深的宝石组烃源岩,经油源对比分析认为较高成熟度的油气与宝石组烃源岩具有很高的相

似性。

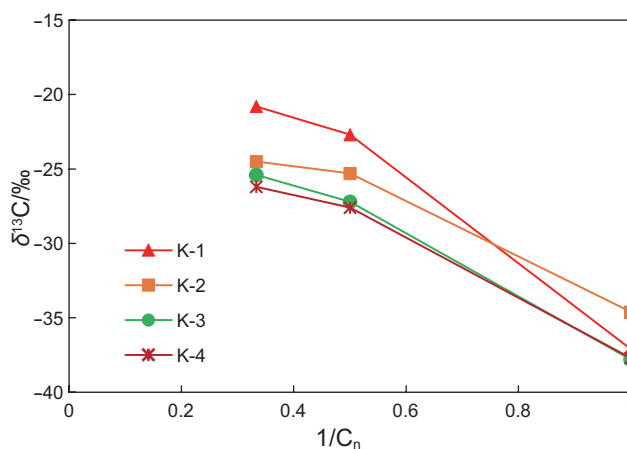


图 5 孔雀亭构造天然气碳同位素分布

Fig. 5 Distribution of carbon isotopes of natural gas in the Kongqueting structure

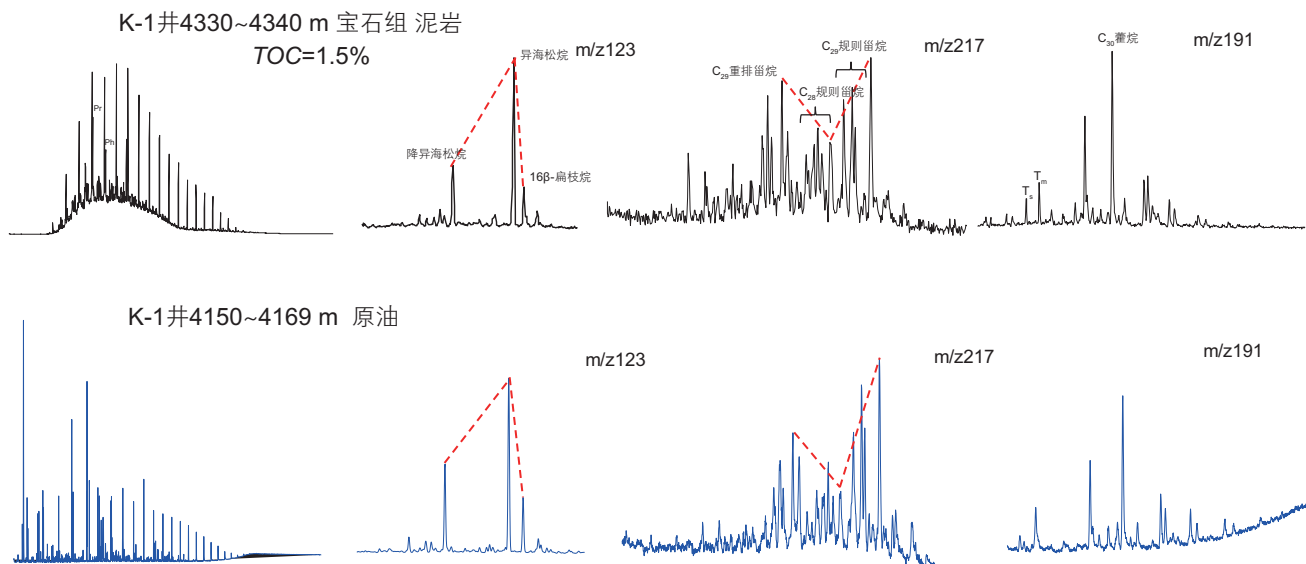


图 6 孔雀亭构造原油与烃源岩生物标志物特征

Fig. 6 Biomarker characteristics of crude oil and source rock in Kongqueting structure

3 油气充注过程分析

3.1 流体包裹体特征

综合考虑孔雀亭构造油气分布特征,本研究优选油气发现较高的K-1井、K-2井、K-3井、K-4井、K-5井等5口井进行取样,制作了30块平湖组细砂岩样品进行流体包裹体岩相学观察和参数测定,并对K-1井和K-3井样品进行了激光拉曼分析。实验分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,采用的仪器为英国Linkamd冷热台(THMS600型)和研究级显微激光拉曼光谱仪(LabRAM HR800型)。

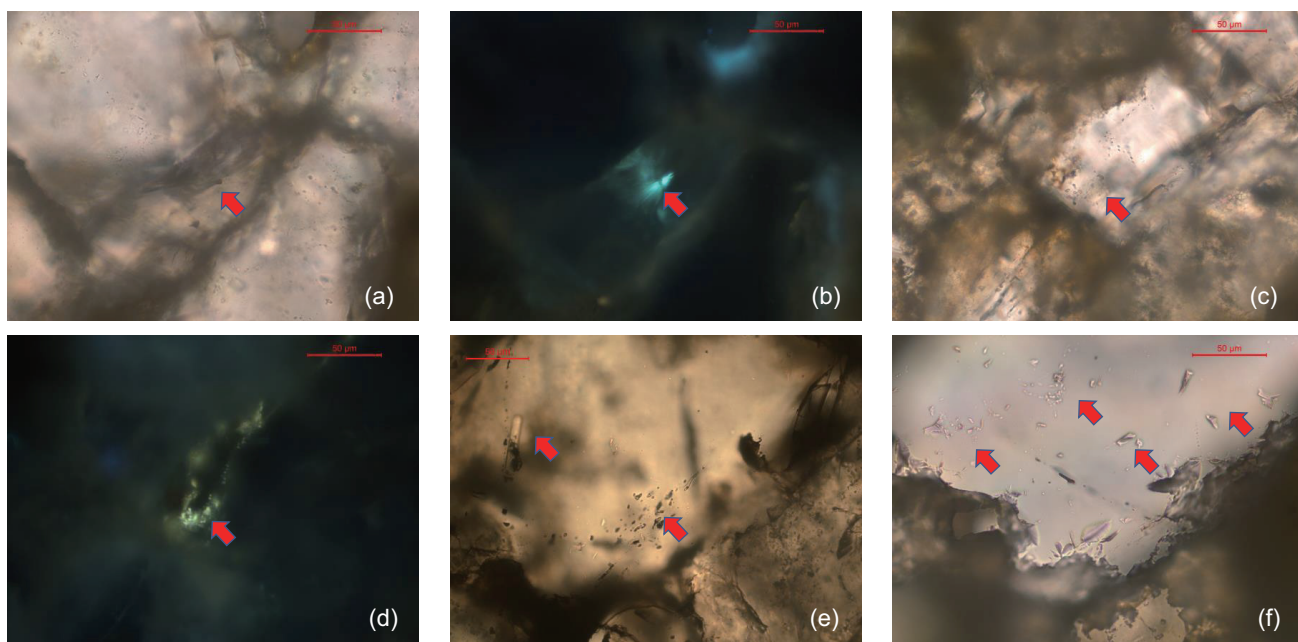
3.1.1 流体包裹体岩相学特征

研究区平湖组储层主要发育含烃包裹体和盐水包裹体,含烃包裹体包括气液两相和天然气包裹体。包裹体主要分布在石英加大边、加大边微裂隙、切穿石英颗粒的微裂隙,大小在1~10 μm,形状主要为椭圆形、方形、三角形及不规则形,发育丰度一般(GOI为3%左右)。气液两相包裹体呈淡黄色,在荧光显微镜下,主要有黄色、黄绿色、蓝绿色等荧光颜色,天然气包裹体呈灰色,无荧光显示(图7)。

根据流体包裹体荧光显示和产状等信息,将孔雀亭地区平湖组储层流体包裹体划分为两个期次:第I期沿方解石胶结物微裂隙分布的气液两相包裹体,荧光颜色(黄色、黄绿色、蓝绿色)反映不同成熟度的轻质油、凝析油充注;第II期为沿切穿石英颗粒微裂隙分布的灰色天然气包裹体,反映晚期天然气充注。

3.1.2 流体包裹体均一温度与盐度特征

流体包裹体均一温度是指气—液两相流体变为单一均匀相流体时所需的温度。测量均一温度时,由于烃类包裹体容易散失氢离子,从而改变包裹体的成分,造成测量误差,所以一般测量与烃类包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度,将其作为古地温的近似值和热时间标志,从而进行油气成藏期次划分^[20]。本研究测的是与气液两相包裹体和天然气包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度和盐度,共139个测点。数据(表2)显示平湖组包裹体均一温度普遍偏高,与气液两相包裹体共生的盐水包裹体均一温度主峰在150~160 °C,最高达175 °C,这明显超过了现今地层温度,可见其主峰温度并不能代表被捕获时的地层温度,还需要结合包裹体盐度信息进行下一步的分析。而与天然气包裹体伴生的盐水包裹体均一温度相对较小,主峰在140~150 °C(图8)。



(a)单偏光;(b)UV激发荧光:沿方解石胶结物微裂隙分布、呈淡黄色—灰色的气液烃包裹体,显示蓝绿色荧光,K-4井,4345.62 m;(c)单偏光;(d)UV激发荧光:沿方解石胶结物微裂隙成带分布、呈淡黄色—灰色的气液烃包裹体,显示黄色—黄绿色荧光,K-4井,4388 m;(e)单偏光:沿切穿石英颗粒及其加大边的微裂隙成带分布、呈淡褐色的含烃盐水包裹体,K-3井,4191.72 m;(f)单偏光:沿石英颗粒微裂隙成带分布,呈灰色的天然气包裹体,K-1井,4385 m

图7 孔雀亭构造流体包裹体镜下特征

Fig. 7 Fluid inclusions pictures under microscope of samples from the Kongqueting structure

表 2 孔雀亭地区部分井流体包裹体均一温度、盐度统计表
Table 2 Statistical table of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in some Wells in Kongqueting area

井号	深度/m	均一温度/°C	盐度/%	伴生关系			
K-1	4385	143	0.35	与天然气包裹体伴生			
		142	0.53				
		157	1.91				
		153	1.74				
		151	3.55				
		136	2.24				
		140	2.07				
		142	3.06				
		K-3	4191		141	7.31	与气液两相包裹体伴生
					146	7.17	
150	7.31						
156	0.35						
154	0.53						
161	2.9						
159	2.9						
160	3.06						
132	3.39						
K-4	4388			168	2.41	与气液两相包裹体伴生	
		169	2.57				
		156	0.35				
		153	0.35				
		154	1.91				
		130	3.06				
		161	3.06				
		157	0.71				
		135	1.74				
		K-4	4345	158	2.9		与气液两相包裹体伴生
178	2.24						
144	1.23						
131	1.23						
172	0.71						
168	0.71						
162	1.23						
142	1.4						
136	10.31						
145	10.49						
	139	10.31					

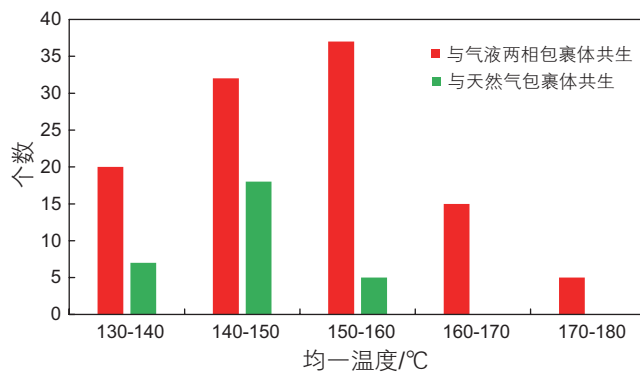


图 8 孔雀亭构造平湖组储层流体包裹体均一温度分布
Fig. 8 Homogenization temperature distribution of fluid inclusions in reservoirs of Pinghu Formation in Kongqueting structure

盐水包裹体中盐度信息也对成藏有重要指示作用，包裹体的盐度可近似地反映成岩期地层孔隙溶液的盐度，是进行流体活动分析的主要依据^[21]。从研究区流体包裹体盐度分布可以看出，与气液两相包裹体伴生的盐水包裹体盐度分散，从 0~14% 有着不同程度的分布，而与天然气包裹体伴生的盐水包裹体盐度相对集中，在 0~4% 之间(图 9)。与气液两相包裹体伴生的盐水包裹体有着两种特殊的均一温度与盐度分布，一种是均一温度集中而盐度变化大，另一种是均一温度变化大而盐度集中(图 10)。这种情况的出现，推测该类型包裹体经历了再平衡作用，包裹体经历了两种改造，一种是泄漏和再充填(包裹体盐度分散，均一温度集中)；另一种是伸展变形(包裹体盐度集中，均一温度分散)。因为流体包裹体被捕获后随着埋深增加和成岩作用增强，原始孔隙溶液温度和压力逐渐升高，一些矿物变得不稳定，溶解度增加，或者与孔隙溶液发生化学反应，这些均可导致流体包裹体形态以及孔隙溶液成分改变，最终使流体包裹体均一温度和盐度发生特殊变化^[22-26]。而与天然气伴生的盐水包裹体均一温度和盐度都相对集中，可见未受再平衡作用。因此认为与气液两相包裹体伴生的盐水包裹体捕获均一温度为 130~140 °C，与天然气包裹体伴生的盐水包裹体捕获均一温度为 140~150 °C。

3.1.3 流体包裹体激光拉曼特征

激光拉曼光谱成分分析主要集中在对单个包裹体中挥发组分、子矿物、络阴离子的测定和气水化合物进行研究，对油气储层包裹体中常见的挥发组分(H₂S、CO₂、N₂)及烃类组分(CH₄、C₂H₆、C₃H₈、C₆H₆)等能够有效的识别出来^[27-28]。

天然气包裹体的激光拉曼谱图中可见宿主矿物石

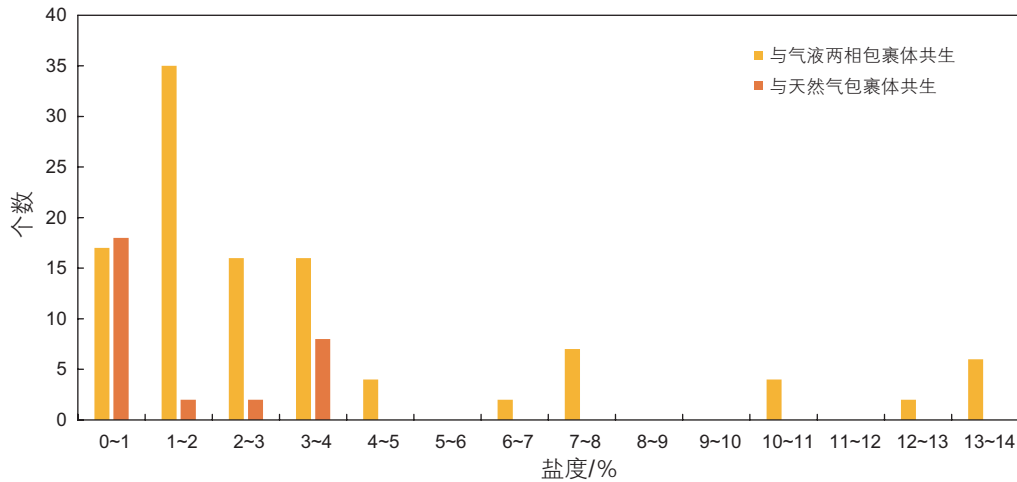


图9 孔雀亭构造平湖组储层流体包裹体盐度分布

Fig. 9 Salinity distribution of fluid inclusions in reservoirs of Pinghu Formation in Kongqueting structure

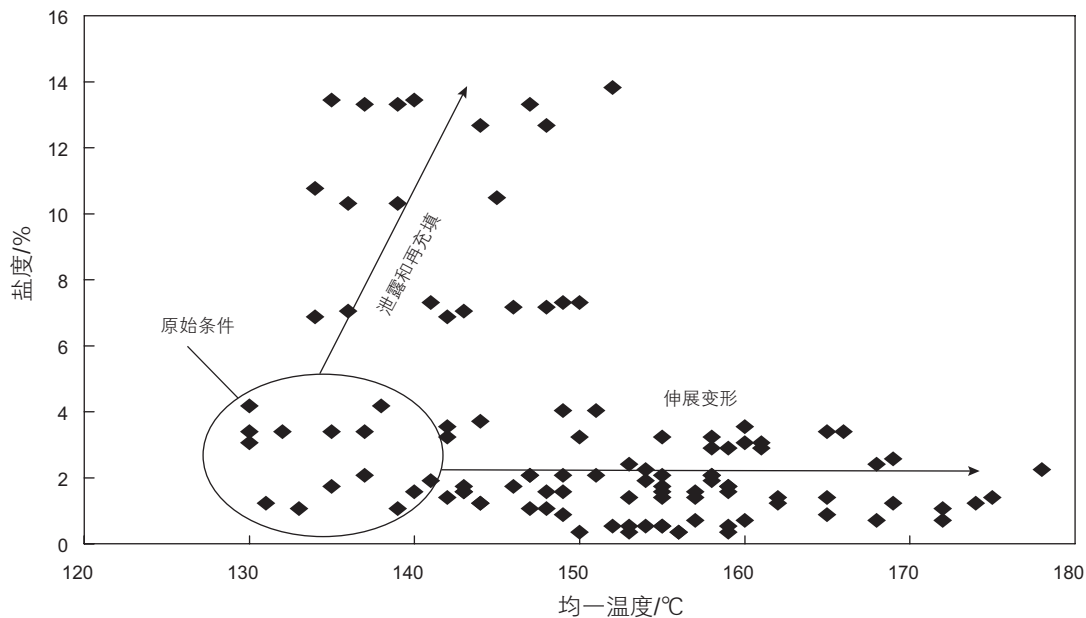


图10 与气液两相包裹体伴生的盐水包裹体盐度、均一温度散点图

Fig. 10 Scatter diagram of salinity and homogenization temperature of saline inclusions associated with gas-liquid two-phase inclusions

英的高强度拉曼散射峰, 还可见到相对强度较高的 CH_4 (拉曼位移 2913 cm^{-1})、 CO_2 (拉曼位移 1283 cm^{-1} , 1386 cm^{-1})、沥青(拉曼位移 1580 cm^{-1} 、 2712 cm^{-1})、 N_2 (拉曼位移 2327 cm^{-1})的拉曼散射特征峰, 天然气包裹体中甲烷的纯度普遍很高, 有些近似为纯甲烷包裹体。 CH_4 、 CO_2 、 N_2 的拉曼散射峰呈现出窄而弱的特点, 沥青的拉曼位移较大, 呈现出宽而弱的特点(图11、12)。天然气包裹体中除了强度较高的石英拉曼散射特征峰, 其他成分拉曼散射特征峰强度都较低, 应该是受到包裹体中流体溶度和宿主矿物高强度特征峰的共同影响。K-1井激光拉曼检测到包裹体含有沥青

质, 推测可能沉积晚期大量高一过成熟天然气的气洗作用的产物。

3.2 油气充注时间与期次分析

将与各期油、气包裹体相伴生的同期盐水包裹体的均一温度作为其捕获时的最小古地温, 再结合古地温演化的埋藏史, 就可以运用流体包裹体方法间接确定各期油气的成藏时期^[29]。前文已对孔雀亭地区的流体包裹体均一温度特征进行了详细分析, 与气液两相包裹体伴生的盐水包裹体主峰均一温度为 $130\sim 140\text{ }^\circ\text{C}$, 与天然气包裹体伴生的盐水包裹体主峰均一温度为 $140\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$,

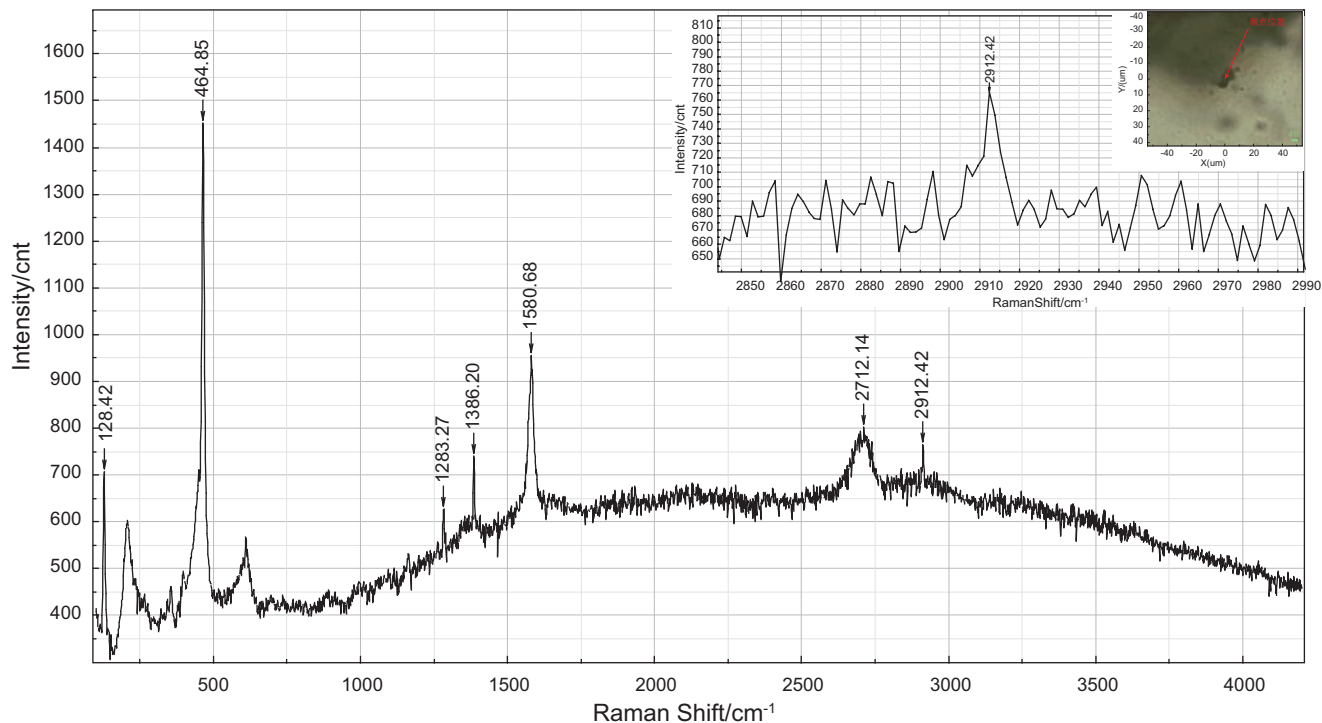


图 11 K-1 井纯气相包裹体 CH₄、CO₂、沥青拉曼散射峰特征

Fig. 11 Raman scattering peak characteristics of CH₄, CO₂ and bitumen in pure gas inclusions in well K-1

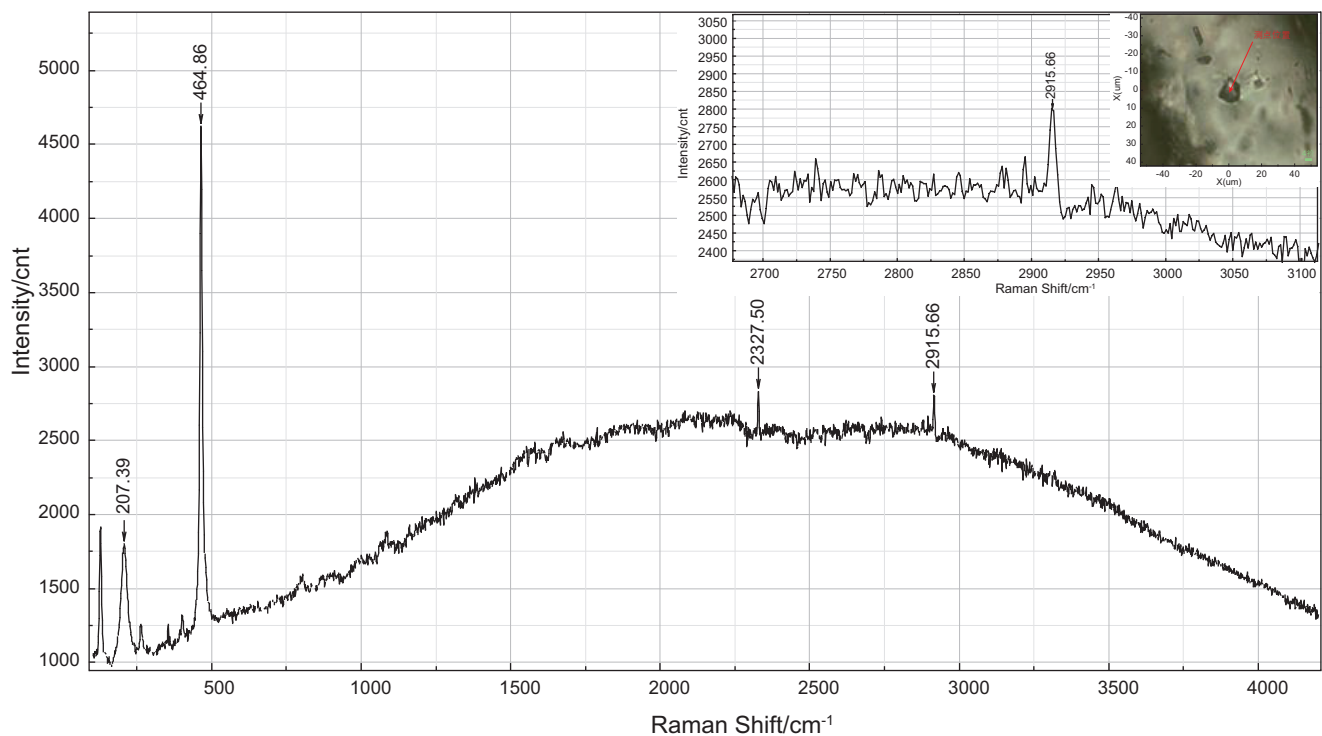


图 12 K-3 井纯气相包裹体 CH₄、N₂ 拉曼散射峰特征

Fig. 12 Characteristics of CH₄ and N₂ Raman scattering peaks of pure gas inclusions in well K-3

将主峰温度与本地埋藏史-热史演化进行结合, 认为孔雀亭构造经历两期油气充注, 气液两相烃充注时间为 5~2 Ma, 气态烃充注时间为 2~0 Ma, 即油气充注时期

为上新世三潭组沉积至今(图 13)。

孔雀亭构造平湖组和宝石组烃源岩在中新世中晚期进入生烃期^[30], 其首先排出液态烃, 沿活动性断

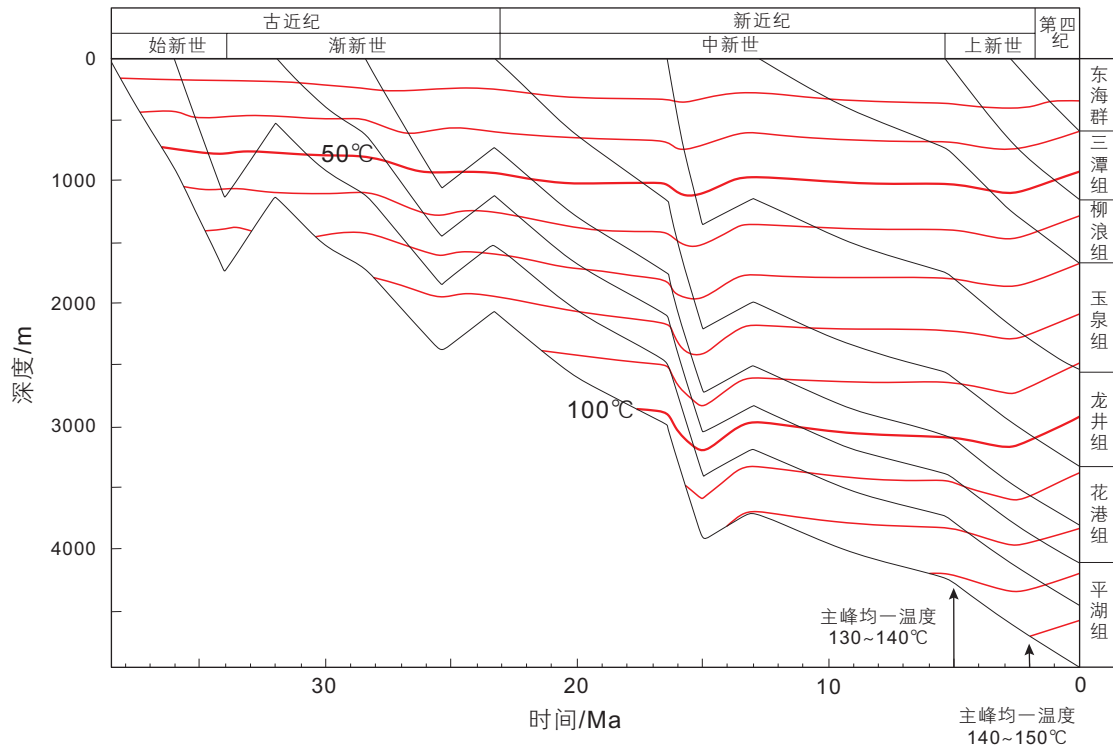


图 13 孔雀亭构造埋藏史—热史演化图

Fig. 13 Burial history and thermal history evolution diagram of Kongqueting structure

裂^[31]与连通性砂体^[32]运移至圈闭形成凝析油与轻质油藏,凝析油与轻质油的充注被储层样品中发育黄色、黄绿色、蓝绿色荧光的气液两相包裹体记录下来,即该阶段为5~2 Ma的凝析油和轻质油充注。上新世末期,烃源岩进一步成熟,天然气开始大量充注,形成气藏圈闭,在储层中发育的天然气包裹体证实了该期充注,此阶段为2 Ma至今的天然气充注。流体包裹体中检测到沥青质,说明晚期大量高一过成熟天然气的强烈充注对圈闭中的凝析油和轻质油有一定的气洗作用。总体上,孔雀亭构造具有明显的“早油晚气,晚期成藏”特点(图14)。

4 结论

(1)孔雀亭构造平湖组、宝石组烃源岩均具有供烃能力,类型有煤、碳质泥岩、泥岩,有机质类型为II₁—II₂型。油源对比分析表明,油气分为两大类:I类较低成熟度油气来源于中低带平下段烃源岩,II类高成熟度油气来源于中低带宝石组烃源岩。

(2)孔雀亭构造发育2期流体包裹体,第一期气液两相包裹体荧光显示黄色、黄绿色、蓝绿色,因经历再平衡作用认为主峰温度130~140℃为该期油气充注时的地层温度;第二期天然气包裹体无荧光显示,未

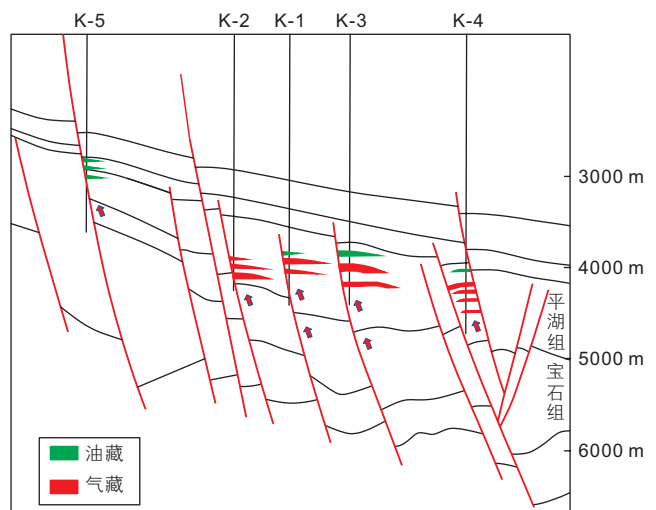


图 14 孔雀亭构造油气分布模式图

Fig. 14 Oil and gas distribution pattern diagram of Kongqueting structure

经历再平衡作用,主峰温度140~150℃为该期油气充注时的地层温度。激光拉曼检测到包裹体中含有沥青质,推测晚期可能伴有气洗作用。

(3)孔雀亭构造经历2期油气充注,有“早油晚气,晚期成藏”的特点:第一期为凝析油和轻质油充注,主要发生在5~2 Ma之间;第二期为天然气充注,发生在2 Ma至今。

参考文献

- [1] 郑有业, 马丽娟. 有机包裹体在生油盆地研究中的应用[J]. 地学前缘, 1998, 5(2): 325-331. [ZHENG Y Y, MA L J. Application of organic inclusions in the study of oil-producing basins [J]. Geoscience Front, 1998, 5(2): 325-331.]
- [2] 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): 190-190. [CHEN H H, LI C Q, ZHANG X M, et al. Determination of hydrocarbon accumulation stage and main accumulation stage in Tahe Oilfield by fluid inclusion [J]. Geoscience Front, 2003, 10(1): 190-190.]
- [3] 蒋有录, 谭丽娟, 荣启宏, 等. 东营凹陷博兴地区油气成藏动力学与成藏模式[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 323-331. [JIANG Y L, TAN L J, RONG Q H, et al. Hydrocarbon accumulation dynamics and its model in Boxing area, Dongying Depression [J]. Geosciences, 2003, 38(3): 323-331.]
- [4] 米敬奎, 肖贤明, 刘德汉, 等. 利用储层流体包裹体的 PVT 特征模拟计算天然气藏形成古压力——以鄂尔多斯盆地上古生界深盆气藏为例[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33(7): 679-685. [MI J K, XIAO X M, LIU D H, et al. Calculation of paleopressure formation in Natural gas Reservoirs by using PVT characteristics of reservoir fluid inclusions — A Case study of deep basin gas reservoirs in upper Paleozoic in Ordos Basin [J]. Science in China: Series D, 2003, 33(7): 679-685.]
- [5] 刘可禹, 张宝收, 张薰, 等. 应用流体包裹体研究油气成藏——以塔中奥陶系储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 171-180. [LIU K Y, ZHANG B S, ZHANG N, et al. Study of oil and gas accumulation using fluid inclusions: A Case study of Tazhong Ordovician reservoir [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 171-180.]
- [6] 平宏伟, 陈红汉. 石油包裹体热动力学模拟古压力改进: 饱和压力预测和体积校正[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, (1): 143-155. [PING H W, CHEN H H. Improvement of paleo-pressure in thermal dynamics simulation of petroleum inclusions: Saturation pressure prediction and volume correction [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2013, (1): 143-155.]
- [7] 康玉柱. 塔里木盆地油气资源潜力及勘探方向[J]. 石油科学通报, 2018, 3(04): 7-13. [KANG Y Z. The resource potential and exploration for oil and gas in the Tarim Basin [J]. Petroleum Science Bulletin, 2018, 3(04): 369-375.]
- [8] 刁慧, 邹玮, 李宁, 覃军. 东海盆地西湖凹陷武云亭构造油气来源与成藏模式[J]. 地质科技通报, 2020, 39(03): 110-119. [DIAO H, ZOU W, LI N, QIN J. Source and accumulation model of Wuyunting tectonic oil and gas in xihu sag, east China sea basin [J]. Bulletin of geological science and technology, 2020, 39(03): 110-119.]
- [9] 苏奥, 陈红汉. 东海盆地西湖凹陷宝云亭气田油气成藏史——来自流体包裹体的证据[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 300-309. [SU A, CHEN H H. History of oil and gas accumulation in Baoyunting Gas Field, West Lake Sag, East China Sea Basin — Evidence from fluid inclusions [J]. Journal of Petroleum Sciences, 2015, 36(3): 300-309.]
- [10] 苏奥, 陈红汉, 雷川, 等. 流体包裹体 PVTx 模拟研究油气充注期次和古压力恢复: 以西湖凹陷平湖构造带为例[J]. 地质科技情报, 2014, 33(6): 137-142. [SU A, CHEN H H, LEI C, et al. Fluid inclusion PVTx simulation study on oil-gas charging period and paleopressure recovery: A case study of Pinghu tectonic zone in West Lake Depression [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(6): 137-142.]
- [11] 姜亮. 东海陆架盆地油气资源勘探现状及含油气远景[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 1-5. [JIANG L. Exploration status and prospect of oil and gas resources in shelf basin of East China Sea [J]. China Offshore oil and Gas (Geology), 2003, 17(1): 1-5.]
- [12] 张国华, 张建培. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 260-270. [ZHANG G H, ZHANG J P. Discussion on tectonic inversion characteristics and genetic mechanism of shelf basin in East China Sea [J]. Geoscience Front, 2015, 22(1): 260-270.]
- [13] 张绍亮, 张建培, 唐贤君, 等. 东海西湖凹陷断裂系统几何学特征及其成因机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1): 87-94. [ZANG S L, ZANG J P, TANG X J, et al. Geometrical characteristics of fault system in West Lake Sag in East China Sea and its genetic mechanism [J]. Marine geology and Quaternary Geology, 2014, 34(1): 87-94.]
- [14] 许婷. 东海盆地西湖凹陷油气成藏系统分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014. [XU T. Analysis of hydrocarbon accumulation system in West Lake Sag, East China Sea Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.]
- [15] 徐志星, 刘洋, 张武, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带原油地球化学特征及油源探讨[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2019, 02: 10-15+44. [XU Z X, LIU Y, ZHANG W, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil sources in pinghu slope Zone of West Lake Depression [J]. Journal of Shengli College, China University of Petroleum, 2019, 02: 10-15+44.]
- [16] 叶加仁, 顾惠荣, 贾健谊. 东海西湖凹陷油气地质条件及其勘探潜力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 111-116. [YE J R, GU H R, JIA J Y. Oil and gas geological conditions and exploration potential in Xihu Sag, East China Sea [J]. Marine geology and Quaternary Geology, 2008, 28(4): 111-116.]
- [17] 唐贤君, 蒋一鸣, 张建培, 等. 东海盆地西湖凹陷平北区断层层断裂特征及其对圈闭的控制[J]. 海洋地质前沿, 2019 (8): 5. [TANG X J, JIANG Y M, ZHANG J P, et al. Fault characteristics of fault depression and its control of traps in Pingbei Area of West Lake Sag, East

- China Sea Basin [J]. *Frontiers of Marine Geology*, 2019 (8): 5.]
- [18] 蒋一鸣, 邵龙义, 李帅, 等. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究[J]. *现代地质*, 2020, 34(01): 141–153. [JANG Y M, SHAO L Y, LI S, et al. Sedimentary system and sequence stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu structural belt of Xihu Sag [J]. *Modern geology*, 2020, 34 (01): 141–153]
- [19] 单超, 叶加仁, 曹强, 等. 西湖凹陷孔雀亭气田成藏主控因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(1): 135–144. [SHAN C, YE J R, CAO Q, et al. Main controlling factors of reservoir formation in the Peacock Pavilion gas field in West Lake Depression [J]. *Marine geology and Quaternary Geology*, 2015, 35(1): 135–144.]
- [20] 邵晓州, 李勇, 张文选, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区长 8 致密砂岩流体包裹体特征与石油成藏[J/OL]. *中国地质*, 网络发布, 2020. [SHAO X Z, LI Y, ZHANG W X, et al. Fluid inclusion characteristics and petroleum accumulation of Chang-8 tight sandstone in Northern Shaanxi of Ordos Basin [J/OL]. *Geology of China*, 2020.]
- [21] 赵迎冬. 流体包裹体中盐度分析与应用——以福山凹陷为例[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2019, 49(5): 1261–1269. [ZHAO Y D. Analysis and application of salinity in fluid inclusions — A case study of Fushan Sag [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science edition*, 2019, 49(5): 1261–1269.]
- [22] 王成, 邢顺淦. 砂岩中自生石英包裹体均一温度和盐度测定及地质应用[J]. *沉积学报*, 1991, 9(3): 106–115. [WANG C, XING S Q. Determination of homogenization temperature and salinity of authigenic quartz inclusions in sandstone and its geological application [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1991, 9(3): 106–115.]
- [23] 陶士振. 包裹体应用于油气地质研究的前提条件和关键问题[J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 77–91. [Tao S Z. Preconditions and key issues of inclusions applied to petroleum geology research [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2004, 39(1): 77–91.]
- [24] 马红强, 陈强路, 陈红汉, 等. 盐水包裹体在成岩作用研究中的应用——以塔河油田下奥陶统碳酸盐岩为例[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(B11): 601–606. [MA H Q, CHENG Q L, CHEN H H, et al. Application of saline inclusions in diagenesis research — a case study of lower Ordovician carbonate rocks in Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Experimental Geology*, 2003, 25(B11): 601–606.]
- [25] 朱丽芬, 陈红汉, 丰勇. 塔北于奇地区奥陶系碳酸盐岩成岩环境分析——来自于流体包裹体的证据[J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(4): 38–43. [ZHU L F, CHEN H H, FENG Y. Diagenetic environment analysis of Ordovician carbonate rocks in The Tarim Yuqi area — Evidence from fluid inclusions [J]. *Lithologic reservoirs*, 2013, 25(4): 38–43.]
- [26] Goldstein R H. Reequilibration of fluid inclusions in low-temperature calcium-carbonate cement[J]. *Geology*, 1986, 14(9): 792–795.
- [27] 刘逸, 王国清, 司宇辰, 等. 激光拉曼光谱气体分析的研究[J]. *石油化工*, 2015, 44(10): 1162–1167. [LIU Y, WANG G Q, SI Y C, et al. Study on laser Raman spectral gas analysis [J]. *Petrochemicals*, 2015, 44(10): 1162–1167.]
- [28] 潘占昆, 刘冬冬, 黄治鑫, 等. 川南地区泸州区块五峰组—龙马溪组页岩裂缝脉体中甲烷包裹体分析及古温压恢复[J]. *石油科学通报*, 2019, 4(03): 242–253 [PAN Z K, LIU D D, HUANG Z X, et al. Paleotemperature and paleopressure of methane inclusions in fracture cements from the Wufeng-Longmaxi shales in the Luzhou area, southern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2019, 4(03): 242–253.]
- [29] 高先志, 陈发景. 应用流体包裹体研究油气成藏期次——以柴达木盆地南八仙油田系三系储层为例[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 548–554. [GAO X Z, CHEN F J. Application of fluid inclusion to study the hydrocarbon Accumulation period — A case study of the third series reservoir in the South Baxian Oilfield, Qaidam Basin [J]. *Geoscience Leading Edge*, 2000, 7(4): 548–554.]
- [30] 陆俊泽, 叶加仁, 黄胜兵, 等. 西湖凹陷平北地区烃源岩特征及生排烃史[J]. *海洋石油*, 2009, 29(4): 38–43. [Lu J Z, YE J R, HUANG S B, et al. Characteristics of source rocks and hydrocarbon generation and expulsion history in Pingbei area of West Lake Sag [J]. *Offshore Oil*, 2009, 29(4): 38–43.]
- [31] 杨彩虹, 曾广东, 李上卿, 等. 东海西湖凹陷平北地区断裂发育特征与油气聚集[J]. *石油实验地质*, 2014 (1): 64–69. [YANG C H, ZENG G G, LI S Q, et al. Fault development and hydrocarbon accumulation in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea [J]. *Petroleum Experimental Geology*, 2014 (1): 64–69.]
- [32] 苏奥, 陈红汉, 马玉华, 等. 东海盆地西湖凹陷孔雀亭气区气侵条件及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(02): 292–300. [SU A, CHENG H H, MA Y H, et al. Characteristics and main controlling factors of gas invasion in Kongqueting gas area, Xihu sag, East China Sea Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(02): 292–300.]