

# 西湖凹陷平湖斜坡构造带油藏成藏期次厘定

倪智勇<sup>1,2\*</sup>, 张紫东<sup>1,2</sup>, 李思澎<sup>3</sup>, 陈践发<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>4</sup>, 刘金水<sup>4</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 海南省地震局, 海口 570100

4 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030

\* 通信作者, nizhy@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-02-16

国家重大科技专项(2016ZX05027-001)资助

**摘要** 西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部, 是我国近海油气勘探前景最好的含油气构造之一, 以天然气资源为主。近年来随着勘探程度的逐渐深入, 发现西部斜坡构造带具备油藏勘探的巨大前景。该地区地质条件复杂, 并非连续沉降盆地, 经历了多次抬升—埋藏过程。复杂的成藏过程导致准确厘定油藏成藏时代和期次存在困难。本文通过流体包裹体测温—埋藏史结合方法以及地质类比法, 综合分析了西湖凹陷西部平湖斜坡构造带油藏的成藏历史。研究表明, 西部斜坡带平湖组储层发育两期颜色不同的烃类包裹体, 一期为发淡黄—黄绿色荧光的烃类包裹体, 捕获温度在 157~173 °C 之间; 另一期为发蓝白色荧光的烃类包裹体, 捕获温度在 169~191 °C 之间。结合埋藏史模拟结果, 厘定平湖斜坡带存在两期成藏, 第一期成藏时间约为 15~13 Ma, 第二期成藏时间约为 2~0 Ma。地质类比法研究表明, 自中新世(17~15 Ma)起, 平湖斜坡带平湖组烃源岩即进入生烃门限, 开始供烃, 龙井运动虽然造成了区域性的地层抬升, 但烃源岩埋深一直处于生烃门限以下, 可以持续供烃, 与流体包裹体研究结果一致。研究表明, 西湖凹陷平湖斜坡带的生排烃期和构造运动共同决定了储层矿物中保留了两期不同荧光颜色的油包裹体, 流体包裹体所反映的两期成藏时代, 分别对应于原油进入储层的最早时代和大规模充注的时代。龙井运动为油藏晚期聚集创造了有利条件, 早期原油充注强度低, 晚期的原油充注是该区油藏成藏的关键期。

**关键词** 成藏期次; 埋藏史; 流体包裹体; 平湖斜坡带; 西湖凹陷

## The oil accumulation period in the Pinghu slope tectonic belt of the Xihu sag

NI Zhiyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Zidong<sup>1,2</sup>, LI Sipeng<sup>3</sup>, CHEN Jianfa<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>4</sup>, LIU Jinshui<sup>4</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Hainan Seismological Bureau, Haikou 570100, China

4 Shanghai Branch, CNOOC China Limited, Shanghai 200030, China

**Abstract** The Xihu sag is located in the northeastern part of the East China Sea Shelf Basin. It is one of the petroliferous units

引用格式: 倪智勇, 张紫东, 李思澎, 陈践发, 张涛, 刘金水. 西湖凹陷平湖斜坡构造带油藏成藏期次厘定. 石油科学通报, 2022, 03: 281-293

NI Zhiyong, ZHANG Zidong, LI Sipeng, CHEN Jianfa, ZHANG Tao, LIU Jinshui. The oil accumulation period in the Pinghu slope tectonic belt of the Xihu sag. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 281-293. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.026

with good prospects for offshore oil and gas exploration in China, and is dominated by natural gas resources. The geological conditions of the Xihu sag are complex because it is not a continuous subsidence basin, and has experienced multiple uplift-burial processes. Its complicated petroleum accumulation process makes it difficult to accurately determine the age and stage of oil charging. This paper comprehensively analyzed the oil accumulation history of the Pinghu slope tectonic belt in the west of the Xihu sag by combining fluid inclusion temperature measurement with burial history information and geological analogy. The research results show that there are two stages of hydrocarbon inclusions with different colors in the Pinghu Formation reservoir of the western slope belt. The fluorescence color of the first stage hydrocarbon inclusions is pale yellow to green-yellow, and the trapping temperatures are between 157 °C and 173 °C. The other stage is blue-white fluorescent hydrocarbon inclusions with trapping temperatures of between 169 °C and 191 °C. Combined with the simulation results of the burial history, it was determined that there were two stages of oil accumulation in the Pinghu slope belt. The first stage of oil accumulation is about 15 Ma to 13 Ma, and the second stage of oil accumulation is about 2 Ma to 0 Ma. The geological analogy method shows that the source rocks of the Pinghu Formation have entered the hydrocarbon generation threshold and began to supply hydrocarbons since the Miocene (17 Ma to 15 Ma). Although the Longjing movement caused a regional uplift, the burial depth of source rocks has always been below the hydrocarbon generation threshold, and hydrocarbons can be continuously supplied, which is consistent with the results of fluid inclusion studies. The study shows that the periods of hydrocarbons generation and expulsion and tectonic movements of the Pinghu slope belt in the Xihu sag jointly determined that these two stages of oil inclusions with different fluorescence color were preserved in reservoir minerals. The two periods of oil accumulation inferred by the fluid inclusions in the reservoir minerals correspond to the earliest era of crude oil entering the reservoir and the era of large-scale oil charging into the reservoir, respectively. The Longjing movement created favorable conditions for the late oil accumulation. The intensity of the early period oil charging was weak, and the late period was the critical period for the oil accumulation in this area.

**Keywords** accumulation period; buried history; fluid inclusion; Pinghu slope belt; Xihu sag

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.026

## 0 引言

东海位于欧亚板块和菲律宾板块汇聚部位,发育典型的沟-弧-盆体系。自西向东分为浙闽隆起、东海盆地和琉球隆起3个地质构造单元。东海盆地呈NNE向展布,由台北坳陷、舟山隆起、浙东坳陷、钓鱼岛隆褶带和冲绳坳陷构成。西湖凹陷是东海重要的近海含油气构造之一,地质条件复杂,油气资源丰富,油气资源以凝析油和天然气为主。前人已于该地区的油气成藏期次以及成藏演化等进行了许多研究,取得了诸多研究成果<sup>[1-4]</sup>。西湖凹陷主要以天然气资源为主,有学者认为,西次凹和中央反转构造带经历了两期天然气成藏,第一期发生在中新世晚期,第二期发生在上新世-更新世<sup>[1,3-4]</sup>。也有学者认为中央反转构造带自中新世起经历了多期成藏<sup>[2]</sup>。随着勘探程度的逐渐深入,在西部斜坡构造带武云亭构造区探明了一个石油储量和天然气储量相当,日产油当量超千立方米的中型油气藏群,表明在西部斜坡构造带具备石油勘探的巨大前景<sup>[5]</sup>。目前,关于西斜坡构造带的油藏的成期次研究相对于天然气成藏期次研究相对较为薄弱,且油藏成藏期次仍然没有统一的认识,伴随石油运移在自生矿物中的流体包裹体(包括盐水溶液包裹体和烃类包裹体)可以为研究油气成藏提供信息。自上世纪90年代以来,流体包裹体被国内外学者广泛应

用于油气成藏研究,取得了诸多成果<sup>[1,6-11]</sup>。流体包裹体显微测温与油藏地层埋藏史-热史相结合,是确定油气成藏时间的主要方法之一。本文以西湖凹陷平湖斜坡构造带的NB14-2-1井为研究对象,基于岩相学分析、流体包裹体显微测温、激光共聚焦扫描显微镜和PVTx模拟等研究手段,重点关注储层矿物中的油包裹体及与其密切伴生的水溶液包裹体,并利用等容线相交法将测得的包裹体均一温度进行校正,同时以地质类比法确定烃源岩的生烃时间作为佐证,结合单井埋藏史对平湖斜坡构造带的油气成藏期次进行研究,为下一步西湖凹陷西部斜坡构造带的勘探提供参考依据。

## 1 区域地质概况

西湖凹陷属于东海盆地浙东坳陷的次级构造单元,是中国近海最大的含油气凹陷,面积约 $5 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。与中国东海大多数新生代断陷盆地相似,受太平洋板块俯冲作用的影响,发育大量NNE向断层,形成了典型的“东西分带,南北分块”的构造格局<sup>[12-14]</sup>。自西向东可以划分为5个NNE走向的二级构造单元,分别为:西部斜坡带、西次凹、中央反转构造带、东次凹和东部断阶带<sup>[12,15]</sup>(图1a)。西湖凹陷是在晚白垩世末期的构造背景上发育起来的沉积凹陷,新生代以来经历了断陷期、拗陷期和区域沉降期3个构造演化阶段<sup>[13,16-20]</sup>。自始新

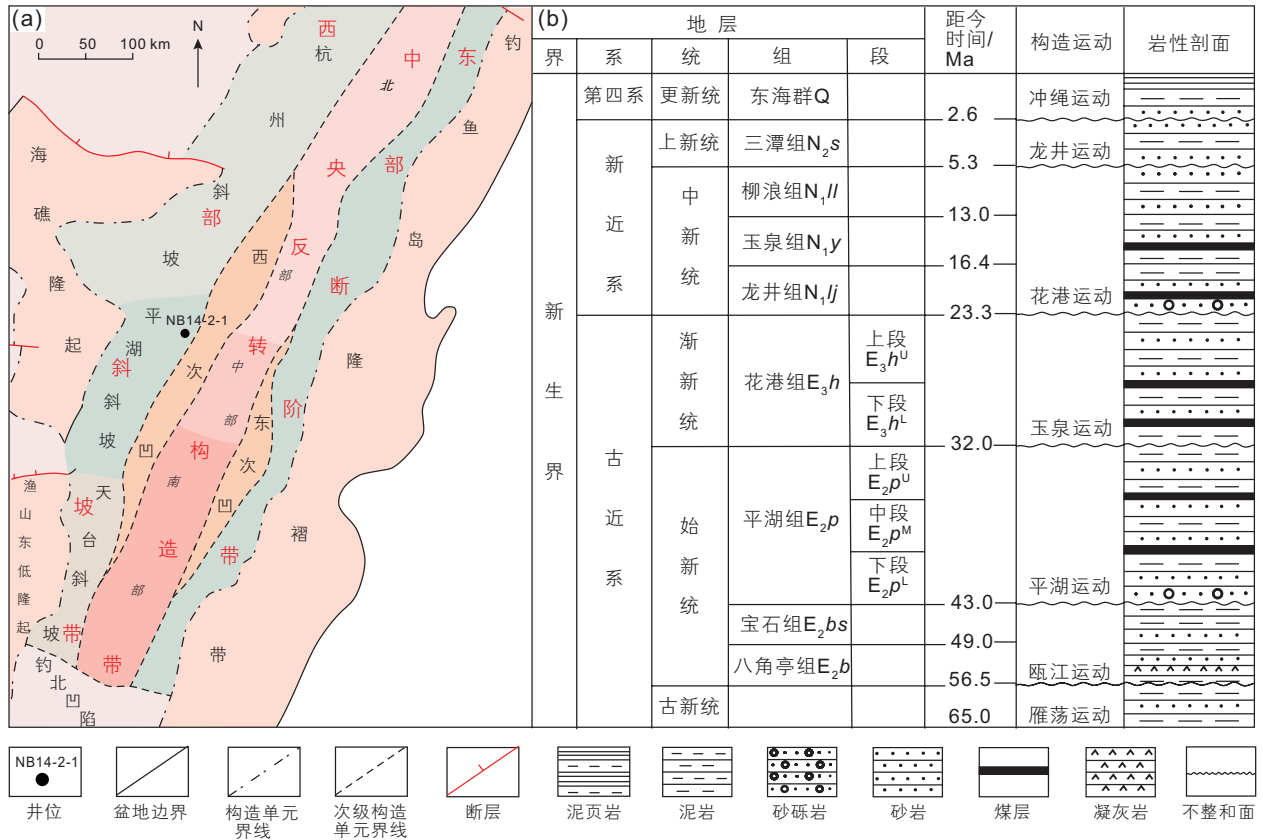


图 1 西湖凹陷区域地质图及地层综合柱状图<sup>[2,17]</sup> (a) 区域地质图; (b) 地层综合柱状图

Fig. 1 Regional tectonic map and comprehensive histogram of strata of Xihu sag (a) regional tectonic map; (b) comprehensive histogram of strata

统以来共发生了 6 次构造运动，分别为雁荡运动、平湖运动、玉泉运动、花港运动、龙井运动和冲绳海槽运动 (图 1b)。这些构造运动中，龙井运动在西湖凹陷表现最为强烈的，使凹陷整体产生巨大的反转<sup>[21]</sup>，表现为背斜、逆断层和区域不整合<sup>[22]</sup>。

西湖凹陷自下而上发育的沉积地层有古近系平湖组、花港组，新近系龙井组、玉泉组、柳浪组、三潭组及第四系东海群 (图 1b)。平湖组为研究区主力烃源岩，岩性主要为暗色泥岩、碳质泥烃源岩，有机质丰度较高。生源主要以高等陆源植物和少量藻类植物，有机质类型为 II-III 型。油气类型主要以天然气和凝析油为主，且具有良好的生烃潜力。花港组及平湖组砂岩段为区内主要储层，岩性主要为长石岩屑质石英砂岩，在成岩早期就遭受了强烈的压实作用，均为近致密-致密储层，与平湖组烃源岩构成“下生上储”的配置关系<sup>[23]</sup>。

## 2 研究对象与研究方法

西湖凹陷总体以天然气资源为主，西部斜坡构造

带的勘探表明其兼具石油勘探的巨大前景<sup>[5]</sup>，本文以西湖凹陷西部斜坡带 NB14-2-1 井的平湖组砂岩-致密砂岩为研究对象，储层岩心样品取自 4100~4250 m，对 17 件长石岩屑质石英砂岩样品进行流体包裹体研究测试与分析。显微测试均在中国石油大学 (北京) 油气资源与探测国家重点实验室完成，所用仪器为 Linkam THMSG-600 型显微测温冷热台。冷热台在进行测温实验前，使用人工合成的流体包裹体标样对其进行温度校正，再进行后续实验，冷热台测温的精度为 ±0.5 °C。本次实验分析中设定的开始升温速率是 5 °C/min，当观察包裹体接近均一态时，将速率降低至 1 °C/min，直至包裹体由气液两相逐渐均一到单一相态，此时观测到的温度为包裹体的均一温度。烃类包裹体的气液比在中国石油大学 (北京) 油气资源与探测国家重点实验室完成，仪器为 OYLMPUS FV1000 型共聚焦显微镜，显微镜水平方向分辨率约是 0.2 μm，垂向分辨率可达 0.1 μm。确定扫描对象后调整各荧光探测强度及光圈光源使包裹体气液荧光边界达到最清晰的状态，以保证体积准确性。在激光扫描显微镜计算机控制软件 FV10-ASW1.5 中，设置待扫描烃类包裹

体的顶底界,采用深度扫描模式进行扫描,获取垂向系列二维切片。利用Image-Pro Premier软件的三维重建功能进行三维图像的重建,得到烃类包裹体的总体积和气泡体积数据,计算烃类包裹体的气液比。

### 3 流体包裹体研究

#### 3.1 岩相学分析

NB14-2-1井平湖组储层岩性为长石岩屑质石英砂岩,经对17件样品的薄片观察,碎屑成分的平均含量如下,石英含量:65%;岩屑含量:20%;长石含量15%,结构成熟度中等,分选一般,次棱角状磨圆。颗粒间以线接触为主(图2a),胶结类型以孔隙式胶结为主,胶结物含量2%~6%。胶结物以碳酸盐为主,一期为方解石胶结充填原生孔隙(图2b);另一期以白云石为主,交代方解石,存在形式以充填次生孔隙为主。岩石孔隙度1%~25%,平均值为12%,总体

来看,岩石较为致密。压溶现象广泛发育(图2a, c)反映平湖组砂岩已进入成岩作用的晚期,石英颗粒的次生加大边现象分布较广(图2b, d),强烈的机械压实作用为导致部分石英颗粒发生破裂(图2c)。平湖组致密砂岩经历了多样化的胶结作用、溶解作用和交代作用。方解石胶结物常常交代石英次生加大边,说明石英次生加大边形成早于方解石交代作用。局部长石、岩屑发生溶蚀作用,产生的溶蚀孔隙后期又多被方解石充填,推断长石、岩屑溶解、石英自生加大发育于同一时期,方解石胶结物的形成时间晚于长石的溶蚀作用。在部分薄片观察到的白云石胶结物交代方解石及碎屑颗粒的现象,且并未见明显的白云石溶蚀,说明铁白云石胶结物形成于成岩晚期。

#### 3.2 流体包裹体类型及产状

##### 3.2.1 盐水包裹体

西湖凹陷NB14-2-1井平湖组储层发育大量盐水包裹体,流体包裹体的宿主矿物以石英为主,盐水包

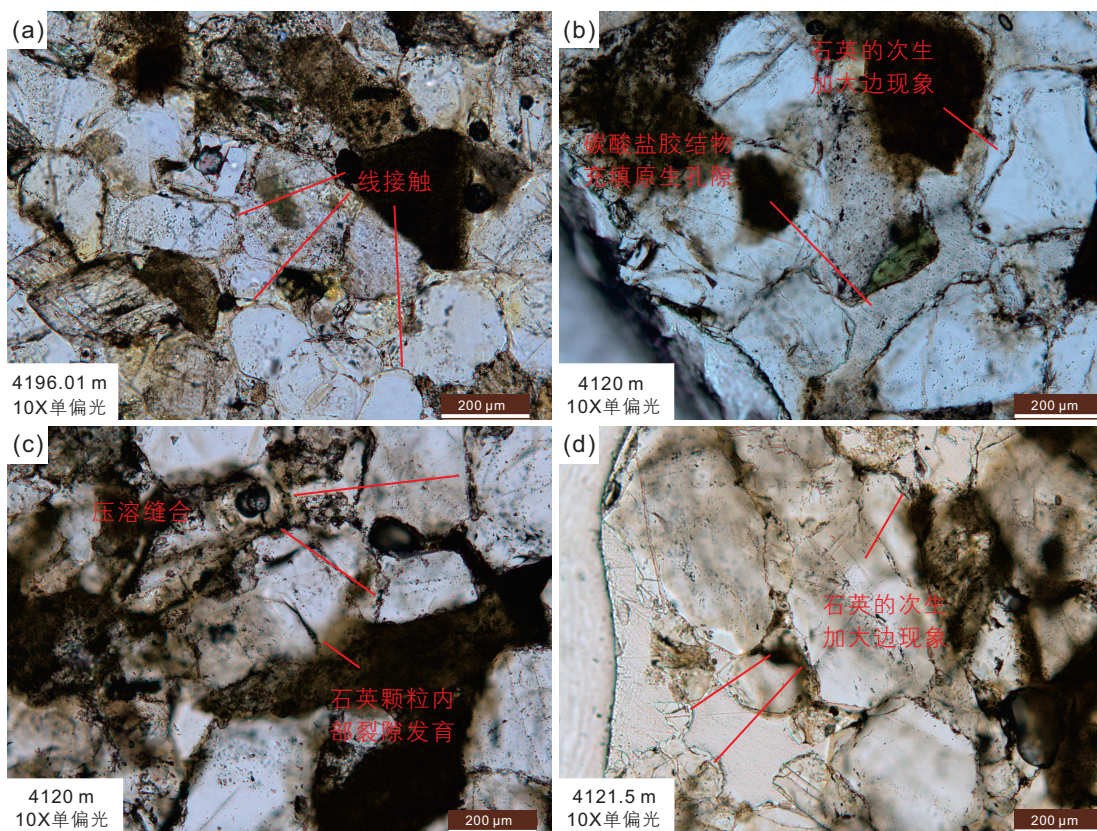


图2 NB14-2-1井平湖组储层成岩特征 (a) 储层矿物颗粒间的线接触; (b) 碳酸盐胶结物充填原生孔隙及石英的次生加大边现象; (c) 石英颗粒内部发育裂隙以及压溶缝合现象; (d) 石英颗粒的次生加大边现象

Fig. 2 Diagenetic characteristics in the Pinghu formation of well NB14-2-1 (a) linear contact between grains of mineral in the reservoir; (b) carbonate cements filled the primary pores and the phenomenon of the secondary overgrowth of quartz; (c) the fractures developed in particles of quartz and the phenomenon of pressure solution and stylolite; (d) the phenomenon of the secondary overgrowth of quartz

裹体在石英颗粒、长石颗粒及碳酸盐胶结物中均发育良好，多为气液两相。盐水包裹体的特点为：大小不

一，大多数为 3~15 μm，形状多样且多为长条形、椭圆形和不规则状(图 3a-h)。在透射光下，盐水包裹体

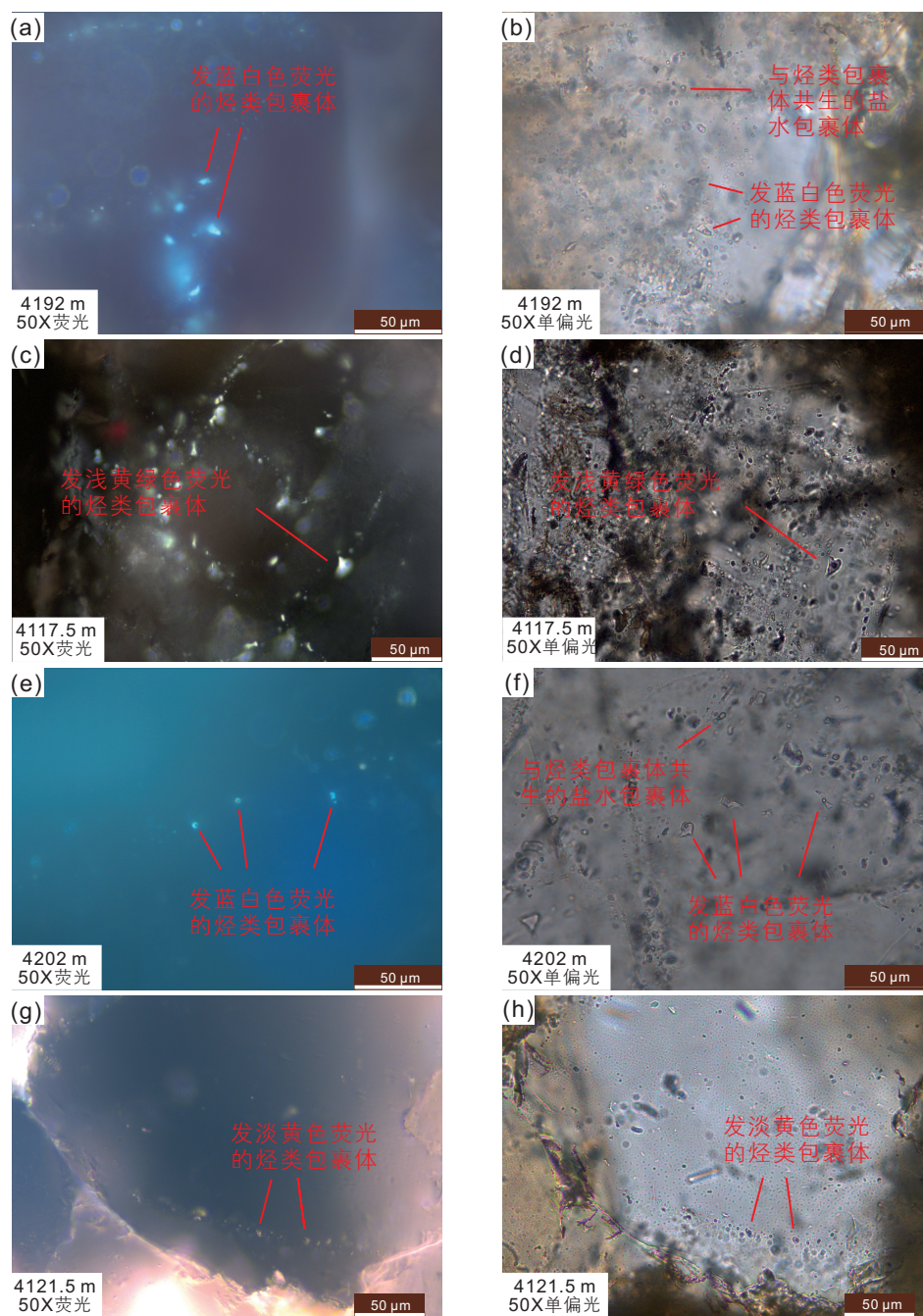


图 3 NB14-2-1 井平湖组流体包裹体显微照片 (a) 石英颗粒裂隙中成群捕获的发蓝白色荧光的烃类包裹体；(b) 透射光下的烃类包裹体以及与之共生的盐水包裹体；(c) 发浅黄绿色荧光的烃类包裹体；(d) 透射光下的烃类包裹体；(e) 成群捕获的发蓝白色荧光的烃类包裹体；(f) 透射光下的烃类包裹体以及与之共生的盐水包裹体；(g) 发淡黄色荧光的烃类包裹体；(h) 透射光下的烃类包裹体

Fig. 3 Photomicrographs of fluid inclusions in Pinghu formation of well NB14-2-1 (a) the hydrocarbon inclusions with blue-white fluorescent were trapped in groups in the fractures of the quartz particles; (b) the hydrocarbon inclusions and brine inclusions in the same period under the transmission light; (c) the hydrocarbon inclusions with pale yellow-green fluorescent; (d) the hydrocarbon inclusions under the transmission light; (e) the blue-white fluorescent hydrocarbon inclusions were trapped in groups; (f) the hydrocarbon inclusions and brine inclusions in the same period under the transmission light; (g) the hydrocarbon inclusions with pale yellow fluorescent; (h) the hydrocarbon inclusions under the transmission light

呈无色透明状,且包裹体边缘及气泡较为清晰。盐水包裹体大多数在石英颗粒内的愈合裂隙、穿切石英颗粒的裂隙及石英颗粒的次生加大边内均有发育(图3a-h)。

### 3.2.2 液态烃类包裹体

液态烃类包裹体在透射光下难以同盐水包裹体区分开来,因此在实验过程中采用具有紫外线光源的显微镜用以辨别,借助烃类包裹体发荧光这一特性加以区分。平湖斜坡带NB14-2-1井的平湖组储层内液态烃类包裹体普遍较为发育,液态烃类包裹体同其共生的盐水包裹体相比,一般直径较大,常在石英颗粒裂隙和次生加大边内呈条带状分布,大小为5~15 μm;形状不一,大多呈不规则状;透射光下多为透明无色,具有明显的黑色气泡边缘(图3d, f)。石英颗粒裂隙中常成群地捕获液态烃类包裹体,在紫外荧光下发蓝白色荧光和黄绿色荧光(图3a, c, e)。在石英次生加大边中捕获的烃类包裹体相对较少,且直径相对较小,多发土黄色荧光(图3g)。

## 3.3 流体包裹体显微测温及压力校正

### 3.3.1 显微测温

在对流体包裹体类型和产状的分析的基础上,对平湖斜坡带NB14-2-1井平湖组储层矿物中烃类包裹体及其伴生的盐水包裹体进行显微测温。流体包裹体显微测温结果表明:与蓝白色荧光烃类包裹体共生,赋存在石英颗粒裂隙中的盐水包裹体的均一温度

分布在150~190 °C之间,冰点温度的分布在-0.1~-15.0 °C之间,根据Bodnar, 1993公式换算<sup>[24]</sup>可得到其盐度介于0.3%~18.7% NaCl;与淡黄色荧光烃类包裹体共生,赋存在石英加大边中的盐水包裹体均一温度较低,且较为集中,分布在130~160 °C,冰点温度范围为-1.0~-5.0 °C,对应盐度为0.2%~3.8% NaCl。(图4)。

### 3.3.2 流体包裹体的捕获温度

流体包裹体的均一温度仅代表包裹体的最低捕获温度,与包裹体实际捕获温存在一定的差异,因此需对实测流体包裹体的均一温度进行压力校正以获得其捕获温度<sup>[25]</sup>。本文应用烃类包裹体与共生盐水包裹体的等容线相交法来确定其捕获温度,盐水包裹体的等容线通过显微测温获得的均一温度和冰点温度得到。烃类包裹体的成分未知,需在已知烃类包裹体的均一温度,烃类包裹体的气液比的基础上结合PVTsim软件,迭代模拟得到烃类包裹体的包络线和等容线<sup>[26-28]</sup>。烃类包裹体的气液比借助于激光共聚焦扫描显微镜,采用Image Pro图像分析软件,对烃类包裹体的低至顶面的信息进行叠加和重构,可以得到直观的烃类包裹体三维图像<sup>[29-31]</sup>,进而确定其气液比。本文分别选取NB14-2-1井平湖组储层11对较大的烃类包裹体(>10 μm)和共生盐水包裹体进行捕获温度分析。实验所选取的烃类包裹体气泡边缘明显,利用激光共聚焦扫描显微镜获取包裹体三维立体图像并计算气液比(图5,表1),同时测得两类包裹

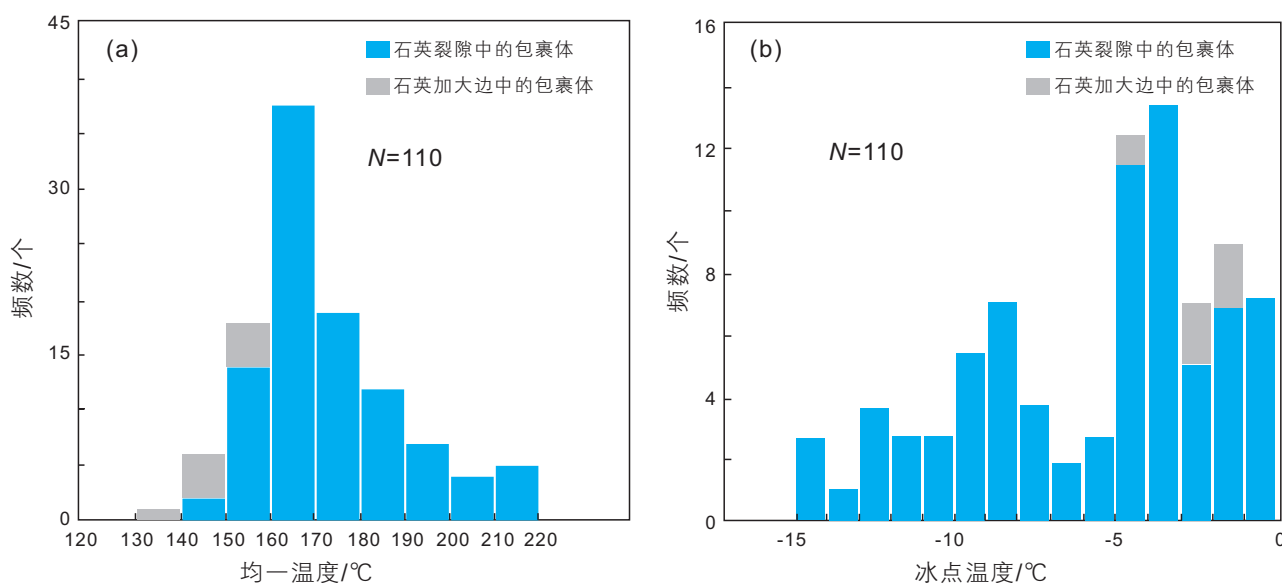


图4 NB14-2-1井盐水包裹体均一温度与冰点温度分布直方图(a)均一温度直方图;(b)冰点温度直方图

Fig. 4 Histogram of homogenization temperature and freezing point temperature distribution of brine inclusions of well NB14-2-1 (a) histogram of homogenization temperature; (b) histogram of freezing point temperature

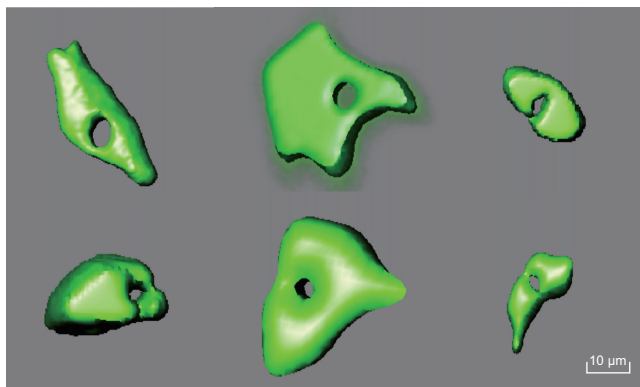


图 5 烃类包裹体三维图像

Fig. 5 Three-dimensional image of hydrocarbon inclusions

体的均一温度(表 1)。

根据烃类包裹体的气液比和均一温度以及伴生盐水包裹体的均一温度,通过PVTsim软件不断迭代模拟,使得模拟的烃类包裹体的气液比与共聚焦显微镜扫描分析所得的气液比一致,并获得烃类包裹体的包络线和等容线。将烃类包裹体和盐水包裹体等容线相交,获取包裹体的捕获温度和压力。实验结果表明:NB14-2-1井平湖组储层发淡黄—黄绿色荧光的烃类包裹体的捕获温度为157~173℃,捕获压力范围为341~365 bar;蓝白色烃类包裹体的捕获温度为169~191℃,捕获压力范围为443~476 bar(图6)。

表 1 NB14-2-1 井烃类包裹体及其共生盐水包裹体测温数据

Table 1 Temperature data of hydrocarbon inclusions and associated brine inclusions in well NB14-2-1

包裹体类型	颜色	均一温度/°C	气液比/%	包裹体类型	均一温度/°C
烃类包裹体	黄绿色	135	10.00	盐水包裹体	153
烃类包裹体	黄绿色	151	11.17	盐水包裹体	172
烃类包裹体	黄绿色	145	10.67	盐水包裹体	158
烃类包裹体	黄绿色	131	9.93	盐水包裹体	148
烃类包裹体	黄绿色	133	6.19	盐水包裹体	162
烃类包裹体	黄绿色	136	10.16	盐水包裹体	153
烃类包裹体	蓝白色	137	12.93	盐水包裹体	156
烃类包裹体	蓝白色	124	12.05	盐水包裹体	132
烃类包裹体	蓝白色	137	13.49	盐水包裹体	152
烃类包裹体	蓝白色	136	13.74	盐水包裹体	150
烃类包裹体	蓝白色	139	13.33	盐水包裹体	154

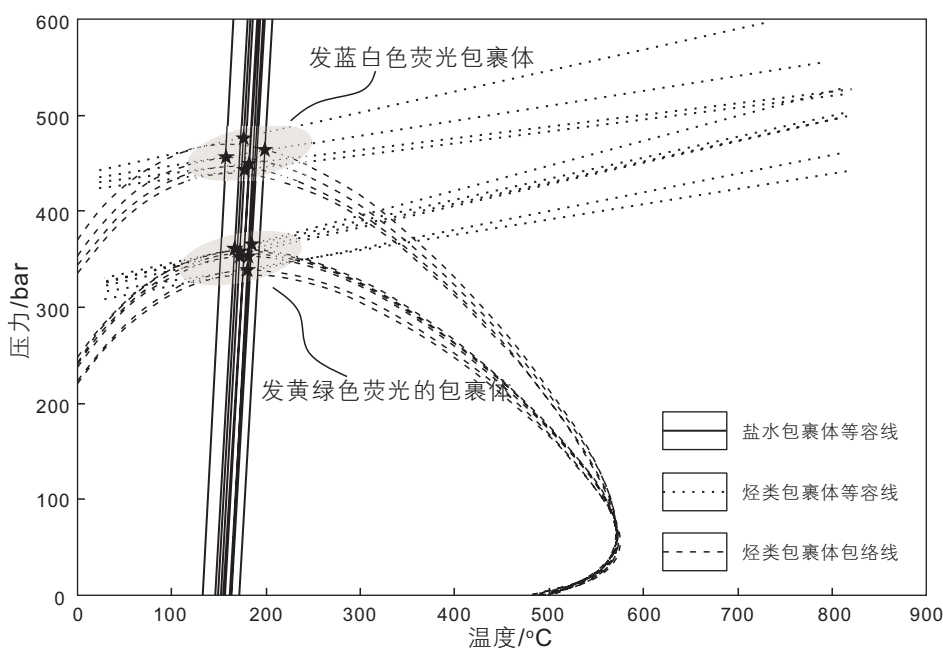


图 6 NB14-2-1 井流体包裹体等容线交会图

Fig. 6 Isochor intersection diagram of fluid inclusion in well NB14-2-1

## 4 油气成藏时间厘定

### 4.1 埋藏史模拟

本文盆地模拟选取BasinMod2009软件。选取平湖斜坡北部NB14-2-1井进行单井数值模拟,重建地层埋藏-热历史,用以厘定油藏成藏时间。大地热流值和地层剥蚀厚度是数值模拟关键的地质参数。根据前人研究资料,西湖凹陷古近纪以来的大地热流值 $56\sim 65\text{ mW/m}^2$ <sup>[32-34]</sup>。西湖凹陷在始新统至中新统末期(56.5~5.3 Ma)这一时期经历了三期重要的构造运动,造成了三期地层的角度不整合接触,分别为平湖组与花港组界面(T0 2)、花港组与龙井组界面(T4 2)、柳浪组与三潭组界面(T0 3)。依据前人对西湖凹陷新生代三个不整合面地层剥蚀厚度的计算分析,平湖斜坡带NB14-2-1井T0 2, T4 2, T0 3剥蚀量分别为500 m, 250 m, 300 m<sup>[18,35-36]</sup>。根据油田的地层分层数据(表2)的地层分层数据,通过BasinMod软件对平湖斜坡北部

NB14-2-1井进行数值模拟,模拟得到NB14-2-1井的埋藏史(图7)。

### 4.2 成藏期次及时间

根据压力校正可知,NB14-2-1井的淡黄色—黄绿色烃类包裹体的捕获温度范围为 $157\sim 173\text{ }^\circ\text{C}$ ,结合NB14-2-1井埋藏史图(图7),确定NB14-2-1井第一期油气充注成藏时间约为 $15\sim 13\text{ Ma}$ 。NB14-2-1井的第二期蓝白色烃类包裹体的捕获温度范围为 $169\sim 191\text{ }^\circ\text{C}$ ,结合NB14-2-1井埋藏史图(图7),对应于两个成藏时代,即 $10\text{ Ma}$ 左右和 $2\sim 0\text{ Ma}$ ,当地层持续埋深时,基本不会发生生排烃间断,而当地层发生抬升后,生排烃则可能停止,当埋藏再次超过抬升前的最大埋深时,则会再次生排烃。因此,确定NB14-2-1井第二期油气充注成藏时间约为 $2\sim 0\text{ Ma}$ 。

## 5 生烃时间厘定

前人研究表明,烃源灶生烃时间与油气藏的成

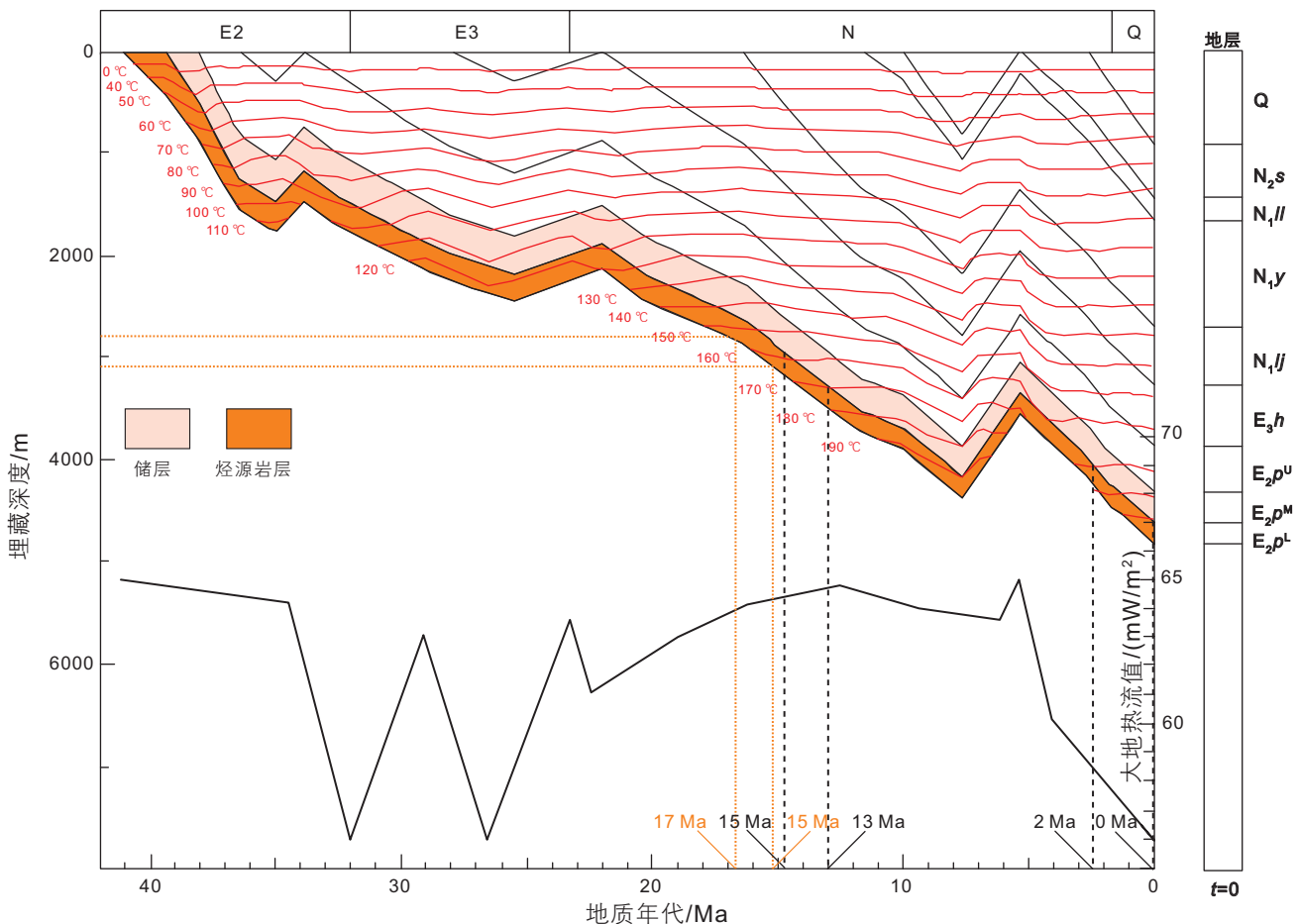


图7 NB14-2-1井埋藏史

Fig. 7 Well NB14-2-1 burial history



藏时间大多差异不大<sup>[37]</sup>。因此可以通过对生烃时间的研究为油气成藏期次的判定提供佐证。在前述流体包裹体与埋藏史相结合厘定成藏期次与时代的基础上,利用地质类比法,厘定西湖凹陷平湖斜坡带平湖组烃源灶的生烃门限深度,作为研究区成藏时间的参考。华北平原北部诸油田的研究表明<sup>[38-41]</sup>,大地热流值在 60.7~79.5 mW/m<sup>2</sup> 时,相应的生烃门限深度为 2300~3000 m,依据西湖凹陷大地热流曲线(图 7),将西湖凹陷不同时期的生烃门限深度厘定如下(表 3):古近系-渐新世时期大地热流值为 56~65 mW/m<sup>2</sup>,该时期西湖凹陷的生烃门限厘定为 2800~3300 m;新近系时期大地热流值 58~65 mW/m<sup>2</sup>,生烃门限深度应当比华北平原北部诸油田上限略浅,厘定为 2800~3100 m;第四系至今大地热流值在 56~58 mW/m<sup>2</sup> 之间,生烃门限深度应大于等于 3100 m。

根据生烃门限厘定结果,结合 NB14-2-1 井埋藏史图(图 7),平湖斜坡带古近系第一个沉降期最大埋深达 1813 m,而此时大地热流值在 56~65 mW/m<sup>2</sup> 之间,生烃门限深度至少为 2800 m,此时的烃源岩埋藏深度远小于生烃门限深度,无法生烃。随后进入第二个沉降期,最大埋深 2478 m 此时的大地热流值仍处于 56~65 mW/m<sup>2</sup> 之间,同样达不到生烃门限深度,无法生烃。花港运动之后,地层在新近系进入第三个稳定沉降期,此时的大地热流值在 58~65 mW/m<sup>2</sup> 之间,烃源岩层约在 17 Ma 时的埋深达到了 2800 m(此时期的生烃门限下限),可以生烃。将 2800~3100 m 的生烃门限深度转换成平湖组烃源岩生烃时间即为油气成藏时间约为 17~15 Ma。龙井运动后新近系的烃源岩埋藏深度大于生烃门限深度,可以生烃。第四系至今大地热流值在 56~58 mW/m<sup>2</sup> 之间(图 7),生烃门限深度应大于等于 3100 m,根据埋藏史图可知,此时烃源岩处

表 2 NB14-2-1 井地层分层数据表

Table 2 Formation layering data table of well NB14-2-1

	顶界深度/m	底界深度/m	地层名称	厚度/m	与下伏地层接触关系
井号	0	912	东海群组	912	不整合
	912	1425	三潭组	513	不整合
	1425	1645	柳浪组	220	整合
NB14-2-1	1645	2690	玉泉组	1045	整合
	2690	3265	龙井组	575	不整合
	3265	3852	花港组	587	不整合
	3852	4800	平湖组	948	未钻穿

表 3 西湖凹陷大地热流值与生烃门限深度类比

Table 3 The correlation of heat flow value with threshold depth of hydrocarbon generation in Xihu sag

地区	时代	大地热流值/(mW/m <sup>2</sup> )	生烃门限深度/m	参考文献
西湖凹陷	古近纪	56.0~65.0	2800~3300	地质类比法 <sup>[38-41]</sup>
	新近纪	58.0~65.0	2800~3100	
	第四纪	56.0~58.0	≥3100	
华北平原北部诸油田		60.7~79.5	2300~3000	

于持续埋深阶段,仍然满足生烃门限,具备生烃能力。

## 6 讨论

从烃源岩热演化的角度,西湖凹陷平湖斜坡带平湖组烃源岩自中新世(17~15 Ma)即达到生烃门限开始供烃。龙井运动虽然造成区域性的抬升,但平湖组仍处在生烃门限以下。可见,自中新世起,平湖组烃源岩即开始持续供烃。无论是勘探结果所显示的少量油

藏,还是本次研究所揭示的储层岩石矿物中的油包裹体,均表明西湖凹陷平湖斜坡带不但有利于天然气成藏,也具备生油的其本条件。流体包裹体测温与埋藏史相结合的研究表明,平湖斜坡带为两期成藏。早期成藏温度为 157~173 °C,成藏年代为 15~13 Ma;晚期成藏温度为 169~191 °C,成藏年代为 2~0 Ma。这与烃源岩热演化所指示的 17~15 Ma 开始持续供烃的推断相一致。储层流体包裹体所记录的两期原油充注主要受控于龙井运动。龙井运动以前,平湖斜坡带主要的圈

闭尚未定形(或早期的圈闭被构造运动所破坏),但烃源岩已开始供烃,少量的油包裹体在储层矿物中得以保存。龙井运动的强烈抬升使得已存在的断层开启,而且促进了平湖组凝析气的向上运移。由于温度和压力的变化,发生气油分离,随着天然气的逸散,原油在花港组储层中保存了下来<sup>[42]</sup>。龙井运动之后,平湖斜坡带圈闭完全形成且此后再无强烈的构造运动,地层迅速沉降,导致温度也快速升高,加速了平湖组烃源岩熟化,生成大量油气,前人研究推测可能是大规模生烃造成的地层压力升高<sup>[43]</sup>。对于NB14-2-1井的模拟结果也表明,第二期烃类包裹体的捕获压力范围为443~476 bar,换算压力系数范围在1.07~1.31。根据研究区地层孔隙压力分类方案<sup>[44]</sup>,地层处于常压到微高压的过渡带,略高于第一期烃类包裹体(换算的压力系数范围为0.96~1.13)的压力条件。此时的微高压状态不会使盖层发生破裂,保持良好封闭性的同时也促进了油气的向上运移。高压异常的状态还可以促进裂缝、断层等良好油气运移通道的产生,且可以构成有利于油气聚集的超压封闭箱<sup>[45]</sup>,因此大量的油包裹体得以保存下来。两期油包裹体荧光颜色差异一方面受热演化程度的影响,晚期油包裹体的成熟度更高;另一方面,晚期的成藏温度为169~191 °C,处于生油高峰结束和生气阶段开始的界线,前人在平湖斜坡带凝析油的族组分鉴定中发现,苯和甲苯的含量相对于正己烷的含量随深度的减小而越低<sup>[46]</sup>,呈现气侵分馏现象。此外流体包裹体也记录并证实了这次事件,苏奥等<sup>[1]</sup>对宝云亭气田流体包裹体的研究表明,第二次蓝绿色荧光油充注时间为11.3~2.8 Ma,并进行了荧光光谱分析,发现了谱型和API<sub>0</sub>介于蓝绿色油包裹体和亮蓝色油包裹体之间的近亮蓝色-近淡蓝色多种渐变

色的油包裹体,充注时间大致为2.5~0 Ma,可以作为天然气改造该期原油的有力证据。在NB14-2-1井的包裹体显微观测中也发现了大量高成熟度的亮蓝色和蓝白色包裹体,且目前并未发现蓝绿色荧光油,说明新生成的天然气对原油发生气洗作用,使原油中轻烃组分增多,且气洗作用规模大且彻底,该次油气充注特点也最接近目前产出油气的性质。因此,西湖凹陷平湖斜坡带的生排烃期和构造运动共同决定了研究区具有两期不同荧光颜色的油包裹体在储层矿物中得以保存,早期原油充注强度低,晚期的原油充注是该区的关键成藏期。

## 7 结论

(1)西湖凹陷西部斜坡带NB14-2-1井平湖储层岩性主要为长石岩屑质石英砂岩。发育碳酸盐胶结和石英次生加大,在石英次生加大边中可见少量液态烃包裹体,大部分液态烃包裹体被捕获在石英颗粒裂隙中。

(2)储层成岩矿物中可见两种发不同荧光颜色的烃类包裹体。通过盐水包裹体测温和烃类包裹体-盐水包裹体压力校正,发淡黄-黄绿色荧光的烃类包裹体的捕获温度为157~173 °C,捕获压力范围为341~365 bar;蓝白色烃类包裹体的捕获温度为169~191 °C,捕获压力范围为443~476 bar。

(3)利用流体包裹体测温和地质类比法,综合分析表明,西湖凹陷平湖斜坡带存在两期成藏。平湖斜坡带平湖组烃源岩自中新世以来即开始持续供烃,早期成藏年代为15~13 Ma,晚期成藏年代为2~0 Ma,龙井运动之后的晚期为关键成藏期。

## 参考文献

- [1] 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. Accumulation history of Baoyunting gas field in the Xihu sag, East China Sea Basin: From evidence of fluid inclusions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 300-309.]
- [2] 张忠民,周瑾,邬兴威.东海盆地西湖凹陷天中央背斜带油气运移期次及成藏[J].石油实验地质,2006,28(1):30-34.[ZHANG Z M, ZHOU J, WU X W. Oil and gas migration periods and accumulation process in central anti-clinal zone in the Xihu sag, the East China Sea Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(1): 30-34.]
- [3] 李朝阳,魏琳,刁慧,等.西湖凹陷孔雀亭构造平湖组油气来源及充注特征[J].石油科学通报,2021,02:196-208.[LI C Y, WEI L, DIAO H, et al. Hydrocarbon source and charging characteristics of the Pinghu Formation in the Kongqueting Structure, Xihu depression. Petroleum Science Bulletin, 2021, 02: 196-208.]
- [4] 徐陈杰,叶加仁,刘金水,等.东海西湖凹陷天然气成藏时期的关键证据:气烃包裹体[J].天然气工业,2021,41(11):64-73.[XU C J, YE J R, LIU J S, et al. Key evidence of gas accumulation period in Xihu sag of the East China Sea Shelf Basin: Gas hydrocarbon inclusion[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 64-73.]

- [5] 周心怀. 西湖凹陷地质认识创新与油气勘探领域突破[J]. 中国海上油气, 2020, 32(1): 1-12. [ZHOU X H. Geol-ogical understand-ing and innovation in Xihu sag and breakthroughs in oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(1): 1-12.]
- [6] 陶士振, 张宝民, 赵长毅. 流体包裹体方法在油气源追踪对比中的应用——以四川盆地碳酸盐岩大型气田为例[J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 327-336. [TAO S Z, ZHANG B M, ZHAO C Y. Application of fluid inclusion in oil gas source trace[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(2): 327-336.]
- [7] 欧光习, 李林强, 张建锋, 等. 塔里木盆地塔中、孔雀河储层流体特征及油气成藏时间研究[C]. 2007年地质流体和流体包裹体研究国际学术会议暨第十五届全国流体包裹体会议论文汇编, 2007. [OU G X, LIN L Q, ZHANG J F, et al. Study on fluid characteristics and hydrocarbon accumulation time of Tazhong and Kongquehe reservoirs in Tarim Basin[C]. Proceedings of the 2007 International Conference on Geological Fluids and Fluid Inclusions and the 15th National Conference on Fluid Inclusions, 2007.]
- [8] HALL D, SHENTWU W, STERNER M, et al. Using fluid inclusions to explore for oil and gas[J]. Petroleum Engineer International, 1997, 70(11): 29-34.
- [9] DUTKIEWICZ A, RASMUSSEN B, BUICK R. Oil preserved in fluid inclusions in Archaean sandstones[J]. Nature, 1998, 395(6705): 885-888.
- [10] MUNZ I A. Petroleum inclusions in sedimentary basins: Systematics, analytical methods and applications[J]. Lithos, 2001, 55(1-4): 195-212.
- [11] PETRYCHENKO O, PERYT T M, ROULSTON B. Seawater composition during deposition of Viséan evaporites in the Moncton Subbasin of New Brunswick as inferred from the fluid inclusion study of halite[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2002, 39(2): 157-167.
- [12] 张建培, 徐发, 钟韬, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组-花港组层序地层模式及沉积演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(1): 35-41. [ZHANG J P, XU F, ZHONG T, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang formations in Xihu trough. [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 35-41.]
- [13] 苏奥. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带油气成藏控制因素[D]. 中国地质大学, 2014. [SU A. Controlling factors of oil and gas accumulation of central inversion tectonic belt in Xihu depression, East China Sea Basin[D]. China University of Geosciences, 2014.]
- [14] 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. Petroleum geological condition and exploration potential of Xihu depression, East China sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(4): 111-116.]
- [15] 刁慧, 刘金水, 侯读杰, 等. 中国近海断—拗转换期煤系烃源岩特征——以西湖凹陷平湖组烃源岩为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(6): 102-114. [DIAO H, LIU J S, HOU D J, et al. Coalbearing source rocks formed in the transitional stage from faulting to depression nearshore China——A case from the Pinghu Formation in t-he Xihu sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6): 102-114.]
- [16] 宋小勇, 储呈林, 芮志峰. 东海盆地西湖凹陷构造样式及其演化[J]. 高校地质学报, 2010(1): 86-93. [SONG X Y, CHU C L, RUI Z F. Structural framework and evolution of Xihu sag in East China Sea Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2010(1): 86-93.]
- [17] 陈智远, 徐志星, 徐国盛, 等. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带异常高压与油气成藏的耦合关系[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 570-581. [CHEN Z Y, XU Z X, XU G S, et al. Coupling relationship between abnormal overpressure and hydrocarbon accumulation in a central overturned structural belt, Xihu sag, East China Sea Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 570-581.]
- [18] 张远兴, 叶加仁, 苏克露, 等. 东海西湖凹陷沉降史与构造演化[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(2): 215-223. [ZHANG Y X, YE J R, SU K L, et al. The burial history and evolution of Xihu depression[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2009, 33(2): 215-223.]
- [19] 朱立新, 宋在超. 东海西湖凹陷原型盆地构造格架与演化分析[J]. 海洋石油, 2016, 36(1): 1-6. [ZHU L X, SONG Z C. Analysis of tectonic framework and evolution of prototype basin in Xihu sag of the East China Sea[J]. Offshore Oil, 2016, 36(1): 1-6.]
- [20] 于仲坤, 丁飞, 赵洪. 西湖凹陷构造演化特征及油气运聚单元划分[J]. 上海国土资源, 2018, 39(4): 75-78. [YU Z K, DING F, ZHAO HONG. Characteristics of structural evolution and classification of hydrocarbon migration and accumulation units in Xihu sag, China[J]. Shanghai Land& Resources, 2018, 39(4): 75-78.]
- [21] 冯晓杰, 蔡东升, 王春修, 等. 东海陆架盆地中生代构造演化特征[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(1): 33-37. [FENG X J, CAI D S, WANG C X, et al. The Meso-Cenozoic tectonic Evolution in East China Sea Shelf Basin[J]. China offshore oil and gas(geology), 2003, 17(1): 33-37.]
- [22] 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]. 地学前沿, 2015, 22(1): 260-270. [ZHANG G H, ZHANG J P. A discussion on the tectonic inversion and its genetic mechanism in the East China Sea Shelf Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 260-270.]
- [23] 钟韬, 李键, 曹冰, 等. 西湖凹陷花港组储层致密化及其与油气成藏的关系[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(1): 20-27. [ZHONG T, LI J, CAO B, et al. Densification timing of reservoir and its bearing on hydrocarbon accumulation in the Huagang Formation of Xihu sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(1): 20-27.]

- [24] BODNAR R J. Revised equation and stable for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57: 683–684.
- [25] 米敬奎, 戴金星, 张水昌. 含油气盆地包裹体研究中存在的问题[J]. *天然气地球科学*, 2005, 16(5): 602–605, 636. [MI J K, DAI J X, ZHANG S C. Some problems existed in research of inclusion occurring in oil and gas bearing basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2005, 16(5): 602–605, 636.]
- [26] APLIN A C, MACLEOD G, LARTER S R, et al. Combined use of confocal laser scanning microscopy and PVT simulation for estimating the composition and physical properties of petroleum in fluid inclusions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1999, 16(2): 97–110.
- [27] APLIN A C, et al. Confocal microscopy of fluid inclusions reveals fluid-pressure histories of sediments and an unexpected origin of gas condensate[J]. *Geology*, 2000, 28(11): 1047–1050.
- [28] NI Z Y, WANG T G, LI M J, et al. An examination of the fluid inclusions of the well RP3–1 at the Halahatang sag in Tarim Basin, northwest China: Implications for hydrocarbon charging time and fluid evolution[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 146: 326–339.
- [29] 金熹高, 朱世雄, 贾世军, 等. 多组份高聚物体系多层形态观察的新方法: 激光共聚焦荧光显微技术[J]. *化学通报*, 1999(6): 34–39. [JIN X G, ZHU S X, JIA S J, et al. A new method for observation of multilayer morphology of multicomponent polymers system: Laser confocal fluorescence microscopy[J]. *Chemistry*, 1999(6): 34–39.]
- [30] 孙先达, 索丽敏, 张民志, 等. 激光共聚焦扫描显微检测技术在大庆探区储层分析研究中的新进展[J]. *岩石学报*, 2005, 21(5): 1479–1488. [SUN X D, SUO L M, ZHANG M Z, et al. New progress of reservoir research by the technology of laser confocal scanning microscope analysis in the Daqing exploration area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(5): 1479–1488.]
- [31] 李耀群, 姚闽娜. 空间分辨荧光分析技术[J]. *分析化学*, 2004, 32(11): 1544–1549. [LI Y Q, YAO M N. Space resolved fluorescence techniques[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2004, 32(11): 1544–1549.]
- [32] 许薇龄, 魏大卫. 东海陆架区地热研究[J]. *地球物理学进展*, 1995, 10(2): 32–38. [XU W L, WEID W. Geothermal study on the continent shelf of the East China Sea[J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(2): 32–38.]
- [33] 何将启. 东海西湖凹陷构造—热历史分析[D]. 同济大学, 2004. [HE J Q. Tectono-thermal history of Xihu depression, East China Sea[D]. Tongji University, 2004.]
- [34] 张洋. 东海西湖凹陷天外天二井热史恢复[J]. *海洋石油*, 2009, 29(4): 44–47. [ZHANG Y. Thermal history reconstruction of TWT–2 well in Xihu depression, the East China Sea[J]. *Offshore Oil*, 2009, 29(4): 44–47.]
- [35] 王子煜, 张明利. 东海西湖凹陷新生界主要不整合面地层剥蚀厚度恢复[J]. *地质论评*, 2005, 51(3): 309–318. [WANG Z Y, ZHANG M L. Erosion restoration of the major Cenozoic unconformities in the Xihu depression of the East China Sea[J]. *Geological Review*, 2005, 51(3): 309–318.]
- [36] 王震, 张明利, 王子煜, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷不整合面剥蚀厚度恢复[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(1): 90–93. [WANG Z, ZHANG M L, WANG Z Y, et al. Erosion thickness restoration of unconformities in the Xihu sag, the shelf basin of east China sea[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(1): 90–93.]
- [37] 王铁冠, 钟宁宁, 王春江, 等. 冀北拗陷下马岭组底砂岩古油藏成藏演变历史与烃源剖析[J]. *石油科学通报*, 2016, 1(01): 24–37. [WANG T G, ZHONG N N, WANG C J, et al. Source beds and oil entrapment alteration histories of fossil-oil-reservoirs in the Xiamaling Formation basal sandstone, Jibei depression[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(01): 24–37.]
- [38] 刚文哲, 仵岳, 高岗, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷烃源岩地球化学特征与地质意义[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(1): 57–61, 65. [GANG W Z, WU Y, GAO G, et al. Geochemical features and geologic significances of source rocks in Nanpu sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2012, 34(1): 57–61, 65.]
- [39] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 超压环境有机质热演化和生烃作用机理[J]. *石油学报*, 2006, 27(5): 9–18. [HAO F, ZOU H Y, FANG Y, et al. Kinetics of organic matter maturation and hydrocarbon generation in overpressure environment[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(5): 9–18.]
- [40] 蔡希源. 湖相烃源岩生排烃机制及生排烃效率差异性——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(3): 329–334, 345. [CAI X Y. Hydrocarbon generation-expulsion mechanisms and efficiencies of lacustrine source rocks: A case study from the Dongying sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 329–334, 345.]
- [41] 朱芒征, 陈建渝. 惠民凹陷临南洼陷下第三系烃源岩生烃门限[J]. *油气地质与采收率*, 2002, 9(2): 35–37. [ZHU Z M, CHEN J Y. Hydrocarbon-generating threshold of the source rocks in Palaeogene of Linnan subsag in Huiminsag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2002, 9(2): 35–37.]
- [42] 魏恒飞, 陈践发, 陈晓东. 东海盆地西湖凹陷凝析气藏成藏特征及分布控制因素[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2019, 49(06): 1507–1517. [WEI H F, CHEN J F, CHEN X D. Characteristics and controlling factors of condensate reservoir accumulation in Xihu sag, East China Sea Basin. [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(06): 1507–1517.]
- [43] 苏奥, 杜江民, 贺聪. 东海盆地西湖凹陷平湖构造带超压系统与油气成藏[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(03): 742–750. [SU A, DU J M, HE C. Overpressure and hydrocarbon accumulation in Pinghu structural belt in Xihu depression, East China Sea

- [J]. Journal of Central South University ( Science and Technology), 2017, 48(03): 742–750.]
- [44] 刘金水. 西湖凹陷平湖构造带地层压力特征及与油气分布的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015(1): 60–69. [LIU J S. Characteristics of formation pressure and their relationship with hydrocarbon distribution in Pinghu tectonic belt of Xihu sag, East China Sea. [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015(1): 60–69.]
- [45] 张国华. 西湖凹陷高压形成机制及其对油气成藏的影响[J]. 中国海上油气, 2013, 25(2): 1–8. [ZHANG G H. Origin mechanism of high formation pressure and its influence on hydrocarbon accumulation in Xihu sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(2): 1–8.]
- [46] 刘金水, 赵洪. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖斜坡带异性气侵的成藏模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(4):487–496. [LIU J S, ZHAO H. Characteristics of differential gas invasion on Pinghu slope of Xihu sag, East China Sea Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2019, 46(4):487–496.]

(编辑 付娟娟)