

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

陈智远¹, 徐志星², 徐国盛¹, 徐昉昊¹, 刘金水²

[1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059,

2. 中海石油(中国)有限公司 上海分公司, 上海 200030]

摘要:东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带花港组、平湖组普遍发育异常高压, 高压地层中油气显示活跃。在声波时差测井、地球化学及分析测试等资料的基础之上, 运用 Eaton 法计算单井地层压力, 建立单井压力剖面, 并在实测压力的约束下, 明确研究区地层压力的纵、横向分布特征。分析认为, 异常压力在纵向上主要起始于花港组下段, 并且异常高压段呈“阶梯式”增大; 横向上从中央反转构造带南部向中部, 异常高压顶界面有变深趋势。接着, 利用 PetroMod 软件模拟地层剩余压力演化, 认为距今 13~9 Ma 和 4~0 Ma 是地层压力大幅度增大的关键时期。最后, 结合油气充注历史的研究, 确定出油气大规模充注和地层压力的大幅度增加在时间上具有很好的吻合性, 并最终建立起研究区异常高压演化与油气成藏的耦合关系。

关键词:异常高压; 油气成藏; 耦合关系; 中央反转构造带; 西湖凹陷; 东海盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Coupling relationship between abnormal overpressure and hydrocarbon accumulation in a central overturned structural belt, Xihu Sag, East China Sea Basin

Chen Zhiyuan¹, Xu Zhixing², Xu Guosheng¹, Xu Fanghao¹, Liu Jinshui²

(1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology,

Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. CNOOC Shanghai Branch, Shanghai 200030, China)

Abstract: Abnormal overpressure is generally developed in the Huagang and Pinghu Formations of the central overturned structural belt in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. Oil & gas shows have been reported frequently in these overpressured formations. Formation pressure and pressure profiles of single wells in the formations were calculated and established through Eaton method and based on acoustic well logging, geochemical and testing data, and pressure distribution (both lateral and horizontal) of the area was also defined under the constraint of measured pressure data of the formations. Vertically, the abnormal pressure mainly initiates in the lower member of the Huagang Formation, and increases in stepwise way upwards; and laterally, its top boundary deepens from south to central of the belt. The PetroMod software was employed to simulate the evolution of the formation residual pressure. The results suggest that periods of 13~9 Ma and 4~0 Ma be the key pressure incremental stages. A combination of the above mentioned research with the history of hydrocarbon charging in the area indicates a well match between the times of large scale hydrocarbon charging and pressure increase. A coupling relationship between the abnormal high pressure evolution and hydrocarbon accumulations is finally defined.

Key words: abnormal overpressure, hydrocarbon accumulation, coupling relationship, central overturned structural belt, Xihu Sag, East China Sea Basin

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2017-05-08。

第一作者简介: 陈智远(1987—), 男, 博士生, 油气藏地质学与成藏动力学。E-mail: czy880209@yeah.net。

通讯作者简介: 徐国盛(1962—), 男, 教授、博士生导师, 油气藏地质学与成藏动力学。E-mail: xgs@cdut.edu.cn。

基金项目: “十三五”国家科技重大专项(2016ZX05027002-006); 中海油上海分公司重点项目(CCL2014SHPS0014RSI)。

近年来,随着我国东部陆相断陷高压盆地中发现了大规模的油气,研究盆地凹陷内异常高压与油气成藏的关系就成为了当前的重点和热点^[1-5]。油气地质勘探研究表明,异常高压的发育是控制含油气系统内烃类生成及运移、成岩演化和地层流体活动的重要因素^[6-10]。在烃类生成方面^[11-13],异常高压会导致气组分中轻碳的相对增加及中碳组分的相对减少,可以抑制烃源岩的热演化程度,以及增大生烃门限深度和生油窗下限深度。在油气运移和聚集方面^[14-16],异常高压具有正反两方面的作用。首先,异常高压的发育是油气运移的主要动力,在高压的驱使下,油气主要向压力过渡带及常压带运移;其次,泥质岩类由于欠压实等作用造成的异常高压可以作为较好的油气盖层,对油气起封堵作用;最后,储集层中异常高压的存在,可能会突破上覆岩层的破裂压力,导致油气的逸散。

西湖凹陷古近系中深层普遍发育异常高压,其发育分布特征资料相对丰富,前人多针对异常压力在油气成藏中的动力学及成藏模式的研究^[5,17-18],但是对研究区异常压力演化与油气成藏的各要素在时间上匹配关系的研究相对薄弱。因此,本文依托于前人关于异常高压与油气成藏关系的方法理论,在声波时差测井、地球化学及分析测试等资料的基础上,运用 Eaton 法预测地层压力,并建立起典型单井地层压力剖面;再利用 PetroMod 软件模拟地层剩余压力演化,并结合该区地层演化、孔隙演化及油气充注史等,建立起研究区异常高压演化与油气成藏的耦合关系。这些工作对于厘清西湖凹陷中央反转构造带古近系油气成藏时间和下一步勘探布井具有重要的实际意义。

1 地质概况

西湖凹陷位于东海陆架断陷盆地内,是一个东断西超的典型凹陷。西湖凹陷内自西向东从西部斜坡带过渡到中央洼陷-反转构造带,并在东部形成断阶带(图 1),在构造上具有“两洼夹一隆”,东西分带、南北分块的特征。研究区主要位于西湖凹陷中央洼陷-反转构造带南部及中部(图 1)。西湖凹陷古近系主要发育平湖组和花港组,是凹陷内主要的烃源岩和油气储层发育层位^[19]。因此,西湖凹陷古近系始新统平湖组和渐新统花港组是本次研究的重点层位(图 2)。

2 现今地层压力特征

沉积盆地内压力状态是通过与静水压力的对比来

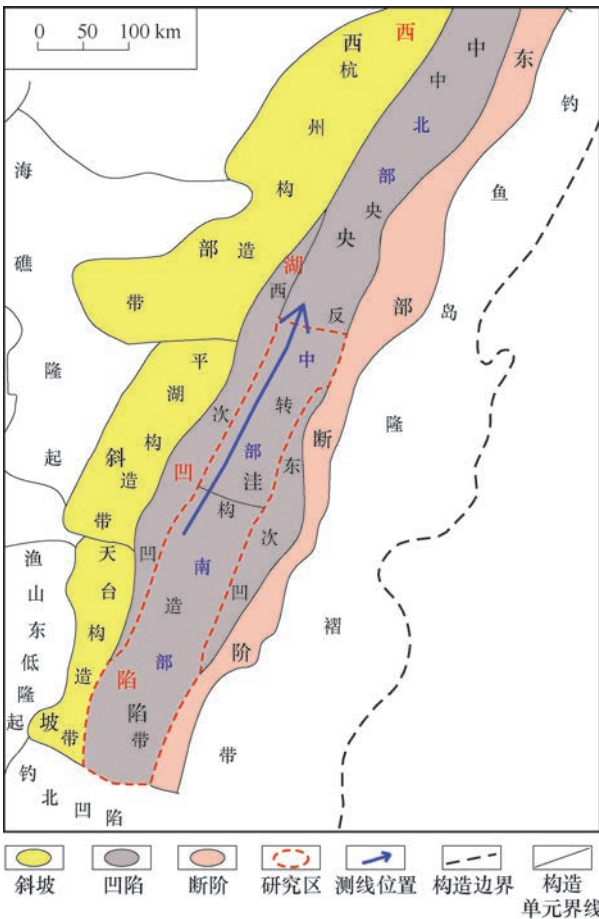


图 1 西湖凹陷中央反转构造带构造位置示意图
Fig. 1 Regional location of the central overturned structural belt in the Xihu Sag

确定的,凡是偏离静水压力(即常压)的情况都被称为异常压力(包括异常高压和异常低压)。盆地中地层孔隙流体压力的描述,是研究地下压力状态的主要方式^[21],这就需要对地层孔隙流体压力与静水压力的偏离程度进行划分。国内外学者普遍采用压力梯度及压力系数对地层孔隙流体压力进行划分^[22-23]。本文根据实测地层压力资料,结合研究区目的层实际地质情况,并在参考国内外学者的分类划分方案基础上^[5,23],对研究区地层压力作如下划分(表 1)。

表 1 西湖凹陷中央反转构造带压力划分	
Table 1 Division of formation pressure of the central overturned structural belt in the Xihu Sag	
压力分类	压力系数
常压	0.98 ~ 1.20
压力过渡带	1.2 ~ 1.4
高压	1.4 ~ 1.7
强高压	1.7 ~ 2.0
超强高压	>2.0



图 2 西湖凹陷新生代地层综合柱状图(据文献[20])

Fig. 2 Stratigraphic column of the Cenozoic strata in the Xihu Sag (after reference[20])

2.1 实测压力纵向分布特征

获取地下地层压力最直接的方法主要来自于实测地层压力。从图 3 中的压力数据可知,西湖凹陷中央反转构造带南部异常高压顶界面(压力系数 1.2)主要起始于 3 300 m;ZHM-1 井在目的层系钻遇异常高

压,压力系数为 1.42。中央反转构造带中部异常高压顶界面有所变化,其顶界面(压力系数 1.2)主要起始于 3 800 m(图 3);ZHS-16 和 ZHS-17 井在目的层系钻遇异常高压,压力系数分别为 1.51 和 1.55。从实测地层压力来看,从中央反转构造带南部向中部,异常高压顶界面有变深的趋势。

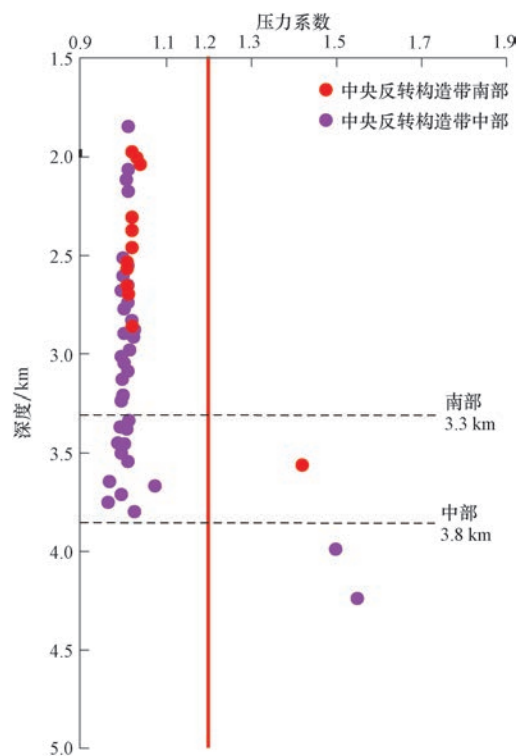


图3 西湖凹陷中央反转构造带实测地层压力纵向分布特征
Fig. 3 Vertical distribution of measured formation pressure in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

2.2 典型单井异常高压发育特征

西湖凹陷中央反转构造带中、南部总共对22口井做了地层压力计算,其中9口井目的层发育有异常高压。本次研究选取中央反转构造带ZHS-16井(南部)和ZHM-1井(中部)两口典型异常高压井做分析介绍。

ZHS-16井位于西湖凹陷中央反转构造带南部黄岩构造高部位。图4是ZHS-16井地层孔隙流体压力综合剖面。从图4中可以看出,该井异常高压顶界面深度为3740 m,层位属于 E_3h^F (花港组),深度向上为常压带,向下的花港组各段地层均发育为异常高压带,并且异常高压带压力及压力系数均呈阶梯式增大(图4),最大地层压力系数可达1.60,实测地层孔隙流体压力与预测结果两者具有良好的吻合性。ZHS-16井3740 m深度以下发育为较好的生油岩和砂、泥岩互层,异常压力系数总体上呈阶梯式增大,烃源岩参数指标及气测参数指标,尤其是TG(热重分析)参数值随着异常压力的增大而有增大的趋势,可以看出异常高压发育规律与有机质演化具有相当的吻合性(图4),说明了该井异常高压的发育与烃类生成作用有着密切的关系。

ZHM-1井位于西湖凹陷中央反转构造带中部的玉泉构造。图5是ZHM-1井地层孔隙流体压力综合剖面。从图5中可以看出,该井异常高压带顶界面深度为3120 m,层位属于 E_3h^F ,深度向上为常压带,向下为异常高压带,并且异常高压带压力随着深度呈阶梯式增大(图5),最大地层压力系数可达1.42,实测地层孔隙流体压力与预测结果两者具有良好的吻合性,说明了声波时差及电阻率对异常高压发育层段存在明显的敏感性,压力预测结果可信。

2.3 地层压力横向展布特征

选取西湖凹陷中央反转构造带ZHM-1井—ZHN-1井连井测线(测线位置如图1)。该测线位于西湖凹陷中央反转构造带中、南部(图6),大致走向为北东—南西向,主要经过了玉泉构造、宁波22-1构造、宁波17-1构造以及宁波6-1构造等构造上的4口单井。从图6中可以看出,黄岩构造异常高压顶界面深度主要起始于3800 m,层位上属于 E_3h^F ;玉泉构造异常高压顶界面深度主要起始于3200 m,层位上属于 E_3h^F 底部;宁波22-1构造异常高压顶界面深度起始于4380 m,层位上属于 E_3h^F 。整体上,从西湖凹陷中央反转构造带南部到中部,异常高压顶界面有变深的趋势,与实测地层压力变化趋势较吻合。并且可以看出,西湖凹陷中央反转构造带中、南部异常高压顶界面大致都出现在花港组下段内,出现的层位大体一致,可见异常高压发育主要受层位的控制。

3 剩余压力演化史

3.1 典型单井剩余压力演化史

本文主要利用PetroMod盆地模拟软件的2D模块来对研究区进行剩余地层压力模拟。模拟中提出了两大假设及参数赋值^[24]:①假设岩石和地层流体在流动中质量平衡;②假设流体在压实排出中满足达西定理;③主要赋值参数为地层顶底年龄、地层剥蚀厚度、砂泥岩百分比、断层的活动性及 R_0 (镜质体反射率)值等。据此,选取西湖凹陷中央反转构造带ZHS-16井进行地层压力演化史数值模拟,模拟结果如图7。从图7中可以看出,该井从20 Ma以来,始新统花港组下段以下地层剩余压力有持续高幅度增大的趋势:地层压力演化至距今约13~9 Ma,花港组及平湖组剩余地层压力增大至2.4~3.6 MPa;距今约4~0 Ma,花港组及平湖组剩余地层压力增大至4.0~8.0 MPa。

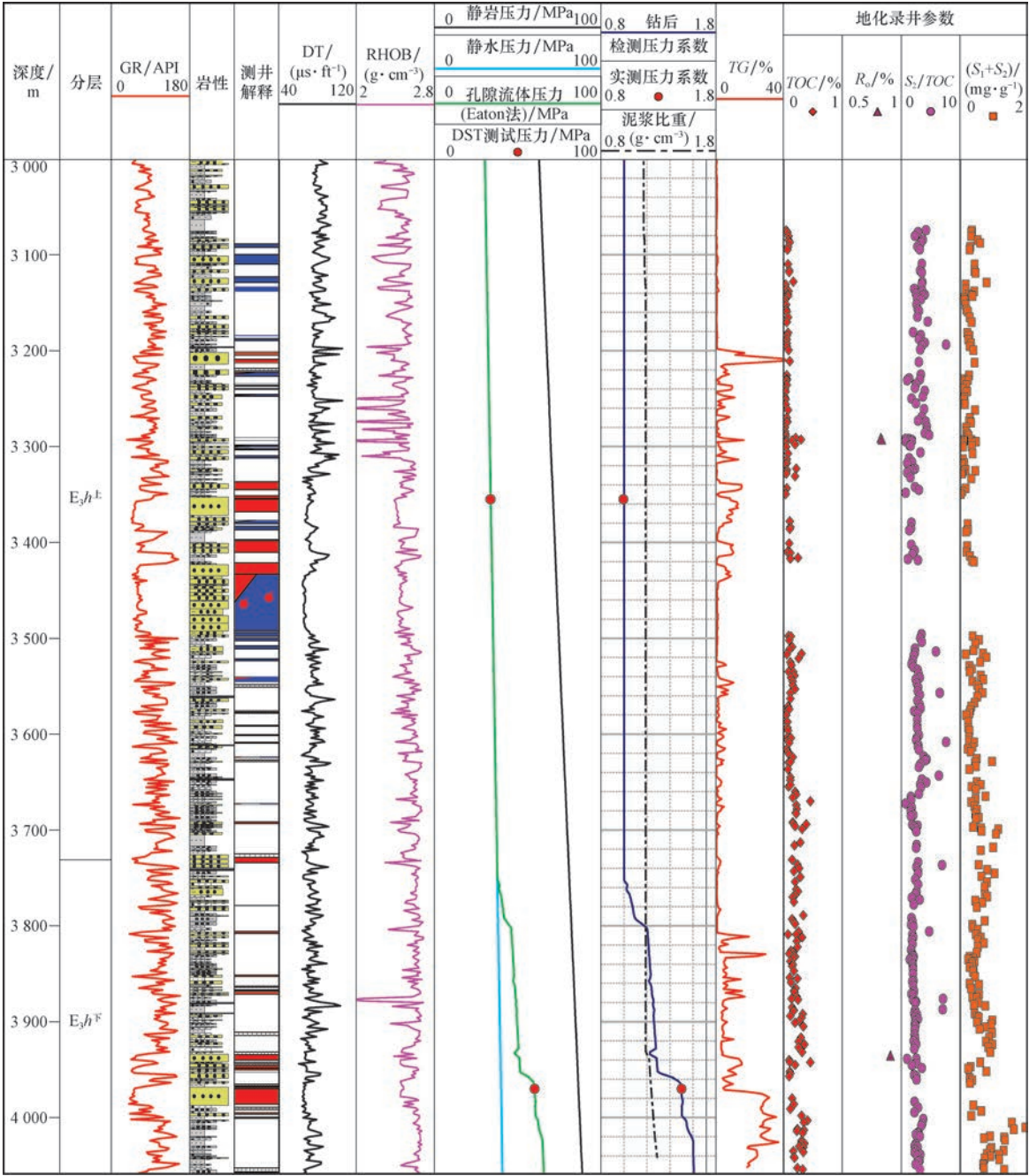


图 4 西湖凹陷中央反转构造带 ZHS-16 井地层压力综合柱状图

Fig. 4 Composite columnar section of formation pressure of Well ZHS-16 in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

3.2 典型剖面剩余压力演化史

根据上述单井地层剩余压力演化史模拟的方法和
数据选取原则,选取经过西湖凹陷中央反转构造带的
典型剖面进行地层剩余压力模拟,模拟结果与单井压
力演化史模拟结果具有客观对应性,可信度高。主要
分为 4 个时期进行模拟。

1) 距今 10.4 Ma

西湖凹陷中央反转构造带地层压力演化至距今约

10.4 Ma,渐新统平湖组地层开始出现低幅度剩余压力
(图 8d)。该时期为中中新世玉泉组沉积时期。根据
研究区流体包裹体测试数据(图 9;表 2)可知,从该时
期开始,西湖凹陷整个范围内始新统平湖组和渐新统
花港组下段烃源岩成熟度开始增高,并开始排烃。这
是该时期平湖组和花港组地层剩余压力增大的主要
原因。

2) 距今 5.2 Ma

该时期主要为早上新世柳浪组沉积时期,凹陷中

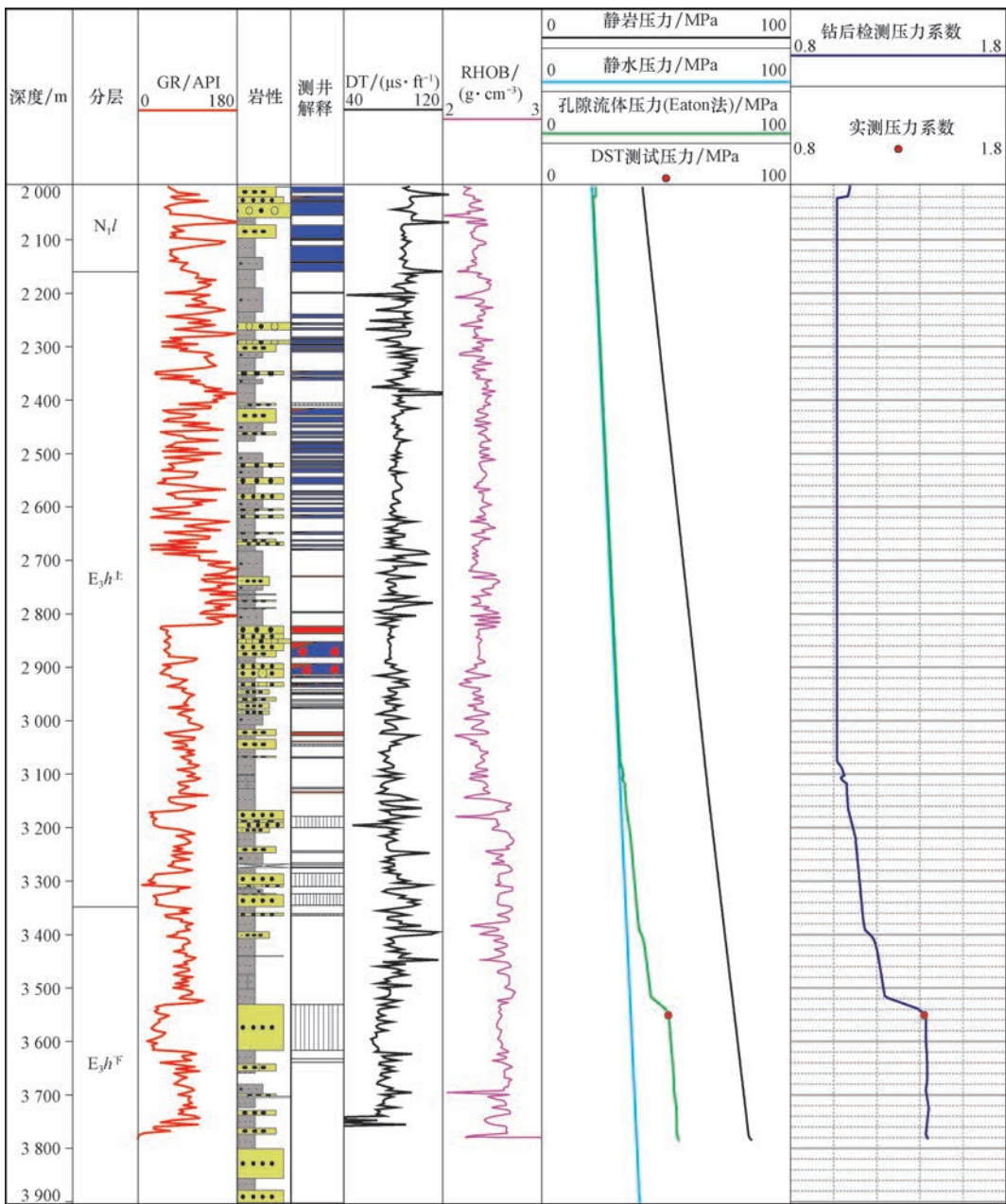


图 5 西湖凹陷中央反转构造带 ZHM-1 井地层压力综合柱状图

Fig. 5 Composite columnar section of formation pressure of Well ZHM-1 in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

心始新统平湖组地层剩余压力变化不大,也呈低幅度高压特征(图 8c)。

3) 距今 2.6 Ma

距今约 2.6 Ma,为上新世三潭组沉积时期。从模拟结果看(图 8b),中央反转构造带地层剩余压力开始从平湖组向花港组传导,导致中央反转构造带花港组下段开始呈现出异常高压现象。横向上看,高压中心明显位于中央反转构造带,这可能是与三潭组沉积早期遭受的构造反转运动有关。根据研究区流体包裹体测试数据(图 9;表 2)可知,该时期目的层的油气充注

持续增强。

4) 现今

地层剩余压力演化至现今,也即第四纪东海群沉积时期。该时期处于构造沉降期,沉积速率持续增加。此外,从油气聚集有关的地化数据分析来看,渐新统平湖组有机质达到高度热演化阶段,成为平湖组本身乃至花港组重要的烃源岩。从模拟结果看(图 8a),凹陷内异常地层高压明显呈现出双中心的特点:一个以中央洼陷平湖组为异常地层高压中心;另一个以东次凹为中心。地层剩余压力呈现出较高幅度的特征。

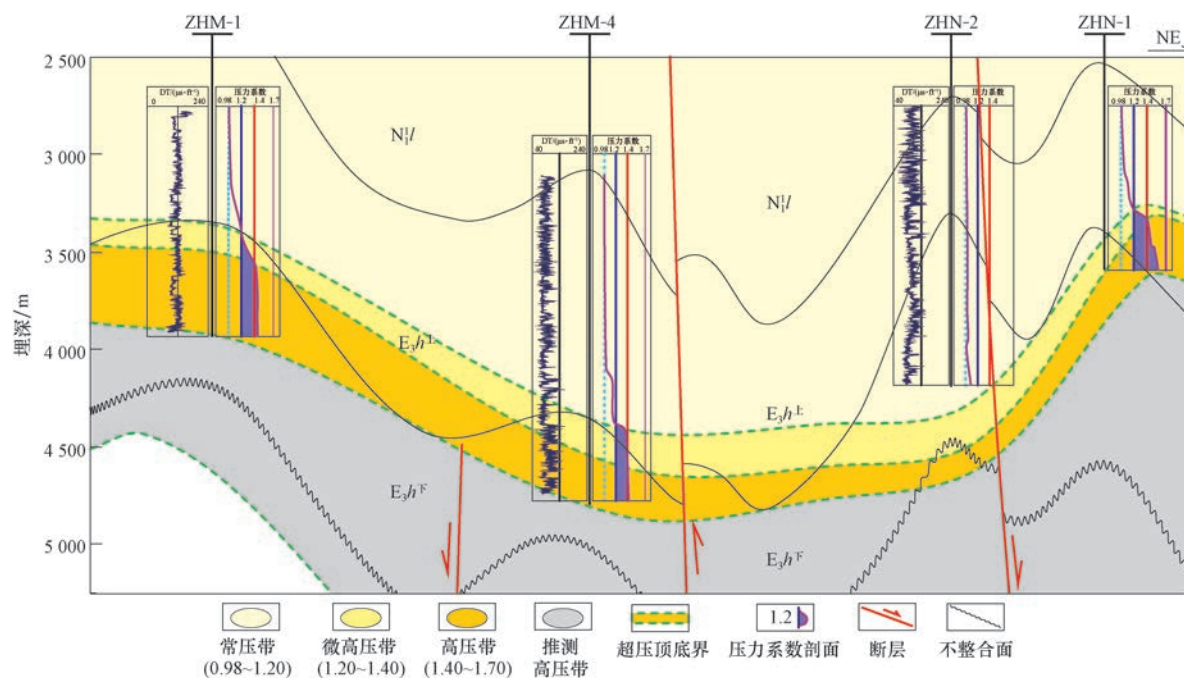


图6 西湖凹陷中央反转构造带 ZHM-1 井—ZHN-1 井地层压力剖面

Fig. 6 Profile of formation pressure of Wells ZHM-1 to ZHN-1 in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

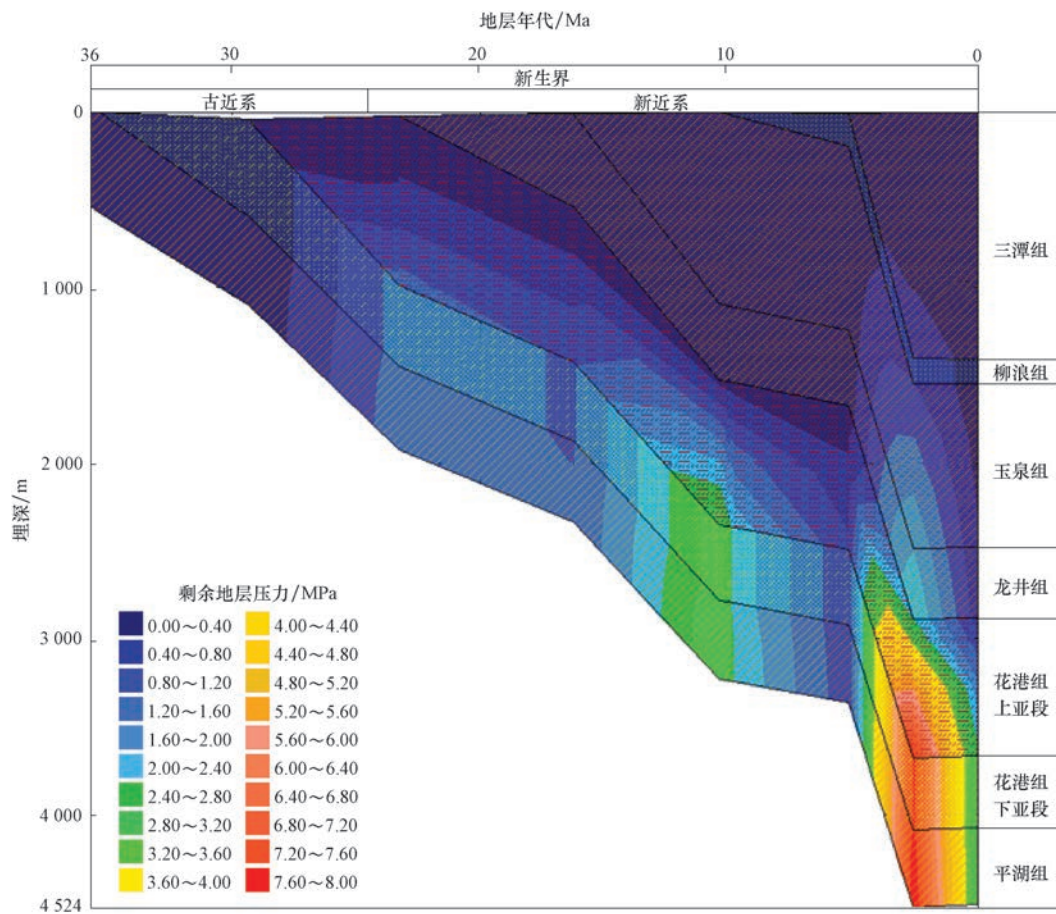


图7 西湖凹陷中央反转构造带 ZHS-16 井剩余压力演化史

Fig. 7 Evolutionary history of residual pressure in Well ZHS-16 in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

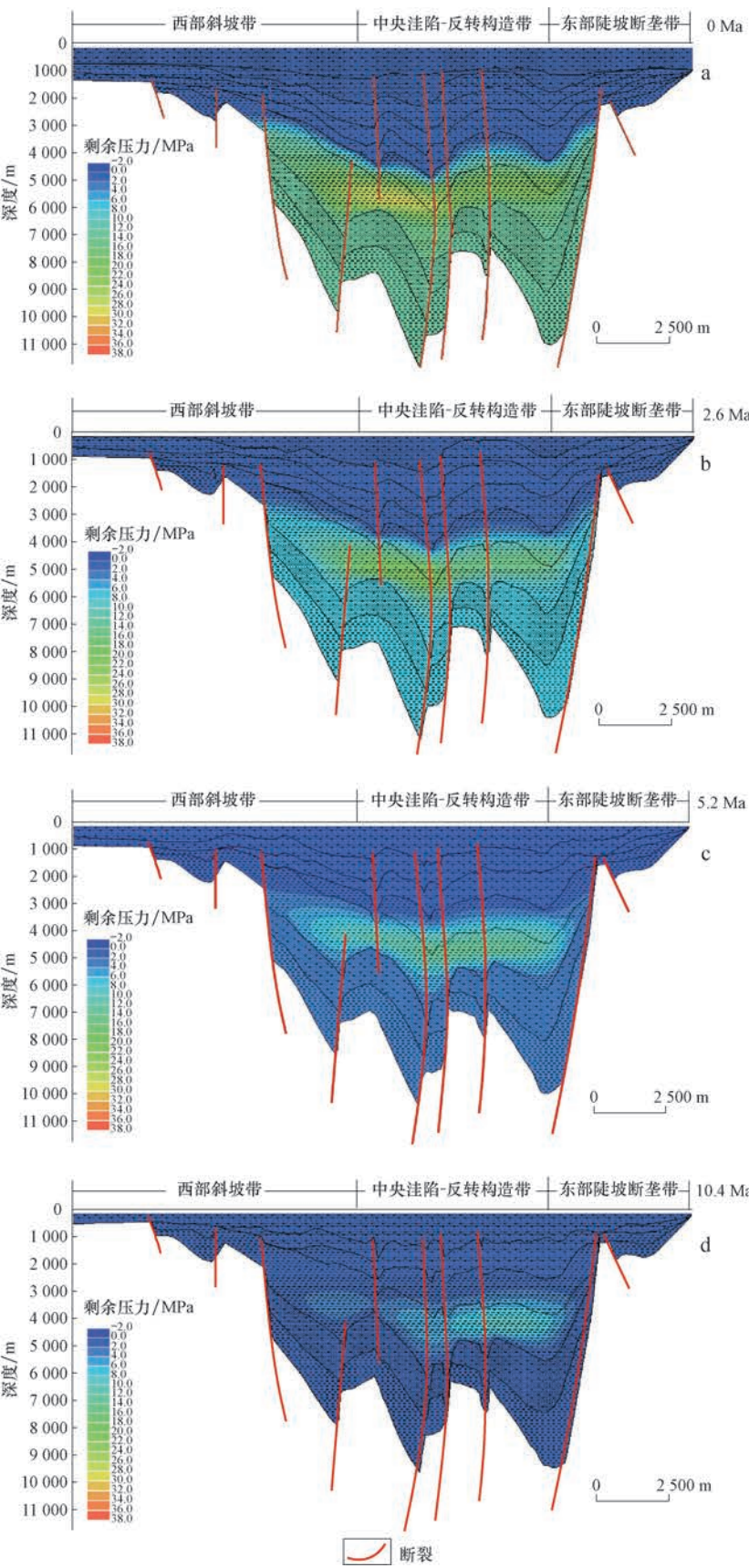


图 8 西湖凹陷中央反转构造带典型剖面剩余压力演化史

Fig. 8 Typical evolutionary history of residual pressure on a typical section in the central overturned structural belt of the Xihu Sag
a. 现今; b. 距今 2.6 Ma; c. 距今 5.2 Ma; d. 距今 10.4 Ma

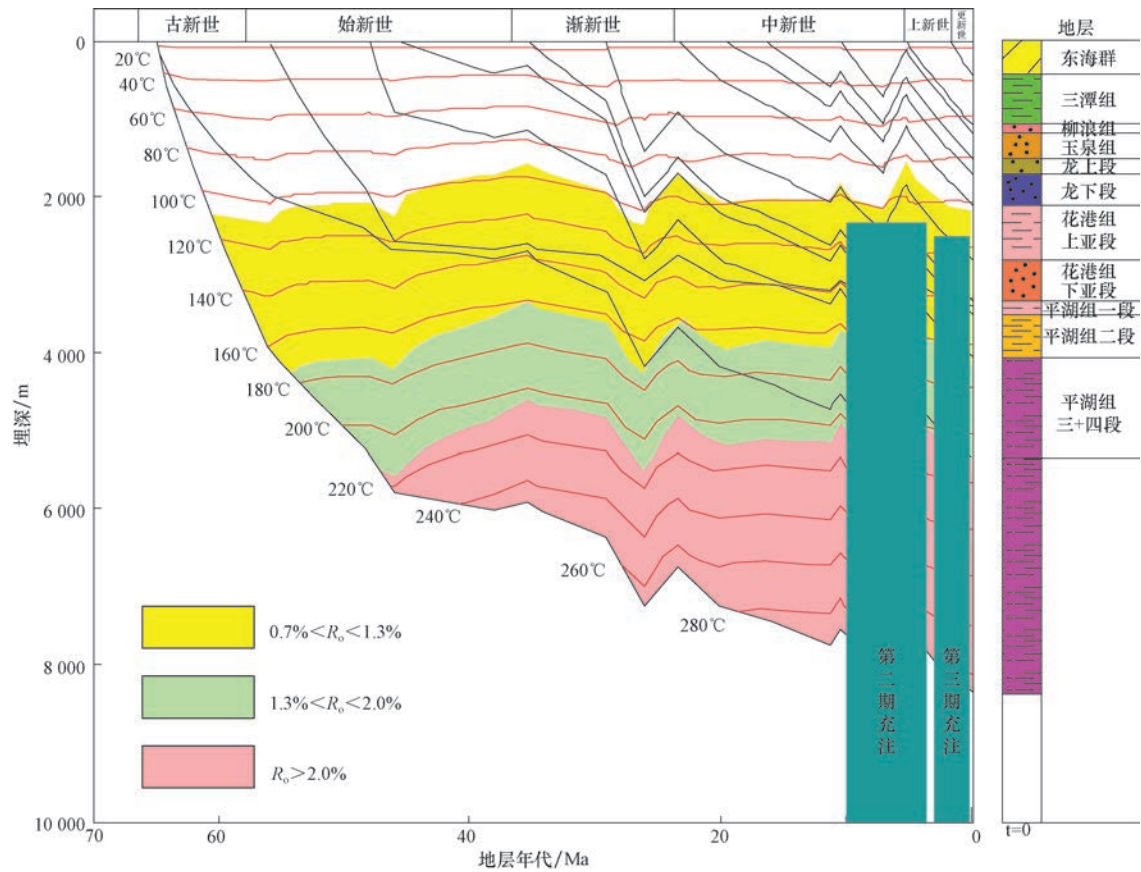


图 9 西湖凹陷中央反转构造带 ZHS-1 井花港组下段储层油气充注历史

Fig. 9 Hydrocarbon charging history of the Lower Huagang Formation in Well ZHS-1 in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

4 油气充注史

研究区目的层烃类包裹体主要以液态烃包裹体为主(图 10a,b),仅含极少量的气态烃包裹体(图 10c)。液态烃包裹体均一温度主要分布在 100 ~ 120 ℃ 范围内;而与其共生的盐水包裹体均一温度分布范围较广,主要在 120 ~ 150 ℃。整体上,液态烃包裹体均一温度较与其共生的盐水包裹体均一温度更低(图 10d)。

从研究区 ZHS-1 井流体包裹体测试结果(表 2)可以看出,该井渐新统花港组上、下两段储层内烃类包裹体及与其共生的盐水包裹体可被区分成 3 期。其中,花港组上段储层内的 3 期流体包裹体分别对应的均一温度为 103 ~ 110,113 ~ 121 及 121 ~ 130 ℃;花港组下段储层内的 3 期流体包裹体分别对应的均一温度为 114 ~ 125,118 ~ 132 及 133 ~ 142 ℃;始新统平湖组地层内则可以区分为 2 期流体包裹体,分别对应的均一温度为 133 ~ 136 和 144 ~ 152 ℃。

表 2 西湖凹陷中央反转构造带 ZHS-1 井流体包裹体显微测温数据
Table 2 Micro temperature measurement data of fluid inclusions of Well ZHS-1 in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

深度/m	岩性	层位	盐水包裹体均一温度/℃		
			A 组	B 组	C 组
2 641.4	粉砂岩	E ₃ h ^上	106 ~ 108/107	116/116	121 ~ 125/124
2 670.1	砂岩	E ₃ h ^上	103 ~ 106/104	113 ~ 118/115	124 ~ 130/125
2 676.3	砂岩	E ₃ h ^上	105 ~ 110/108	114 ~ 121/118.5	127 ~ 130/128
2 984.3	砂岩	E ₃ h ^下	114 ~ 117/115	118 ~ 127/122	133 ~ 136/135
3 211.7	砂岩	E ₃ h ^下	121 ~ 124/123	126 ~ 132/131	135 ~ 141/138
3 283.0	粉砂岩	E ₃ h ^下	123 ~ 125/124	131/131	137 ~ 142/139
3 640.0	泥岩	E ₂ p ³⁺⁴	133 ~ 135/133	148 ~ 150/149	—
3 669.6	砂岩	E ₂ p ³⁺⁴	—	147 ~ 152/148	—
3 673.8	泥岩	E ₂ p ³⁺⁴	133 ~ 136/134	144 ~ 152/148	—

注:数据来源于中国石化石油勘探开发研究院,2003。均一温度数据为范围值/平均值。

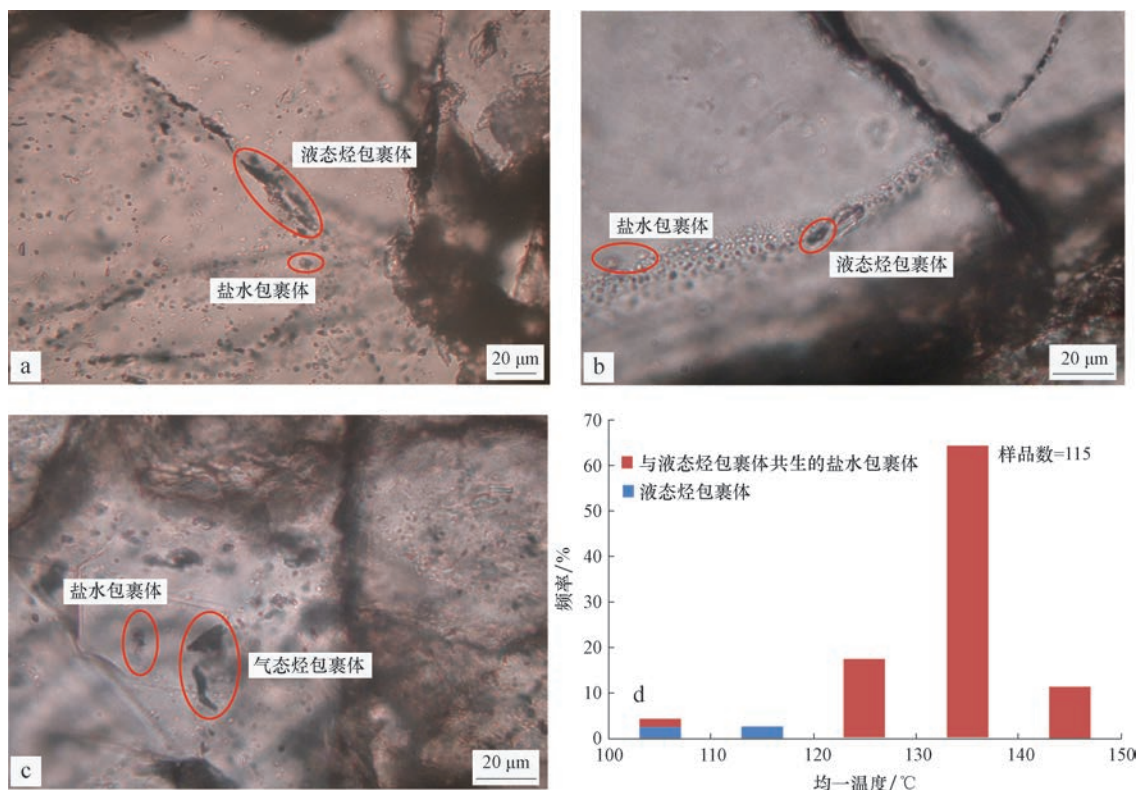


图10 西湖凹陷中央反转构造带包裹体类型及其均一温度分布

Fig. 10 Inclusion types and homogenization temperature distribution of the central overturned structural belt in the Xihu Sag

a. ZHM-4井,埋深3 850.4 m,沿裂缝分布的液态烃包裹体及其共生的盐水包裹体;b. ZHM-5井,埋深3 695 m,石英加大边中的液态烃包裹体及其共生的盐水包裹体;c. ZHM-5井,埋深3 695 m,方解石胶结物中的气态烃包裹体及其共生的盐水包裹体;d. 包裹体均一温度分布直方图

根据上述流体包裹体均一温度分析,确定出研究区目的层油气充注期次,并结合地层分层数据、抬升剥蚀量以及有机质热演化程度值(R_o)等资料,利用PetroMod软件建立起ZHS-1井单井地层埋藏史-热史图(图9)。在此基础上,利用单井地层埋藏史-热史模拟和流体包裹体均一温度测试结果进行对比分析。分析结果表明,ZHS-1井渐新统花港组下段砂岩储层内经历了3期油气充注,但C组流体包裹体所代表的均一温度(133~142℃)超过了现今花港组地层所达到的最大地层温度(132℃),推测其是受到了突发性热事件的影响(在ZHS-1井西南侧的渐新统花港组地层中可见相当规模的岩体侵入)。可以判断,该组包裹体所代表的油气充注发生的时间较早,可以确定为渐新世—中新世时期(喜马拉雅运动中期)。此外,A组和B组两期流体包裹体所代表的油气充注分别主要发生在晚中新世—早上新世及中上新世—第四纪(图9),并且油气大规模充注的时期主要为晚中新世—早上新世(第二期)。渐新统花港组上段和始新统平湖组地层中的两期流体包裹体所代表的油气充注历史与花港组下段基本一致,大致也发生在晚中新世—早上新世及中上新世—第四纪时期;但平湖组地

层中未发现由于热事件而产生的C组流体包裹体,仅检测出两期流体包裹体(A组和B组)。综上所述,西湖凹陷中央反转构造带油气充注的主要时期为晚中新世—早上新世及中上新世—第四纪。

5 超压发育与油气成藏的耦合性

对于西湖凹陷中央反转构造带异常高压与油气成藏的关系,本文通过上述研究认为,该区异常高压的演化史与油气充注史具有良好的耦合关系,基本明确了中央反转构造带异常地层压力的发育与油气成藏在时间上的匹配关系。为了更为全面地分析研究区异常高压发育与各成藏要素的匹配关系,本文选择将西湖凹陷中央反转构造带的地层埋藏演化史、孔隙演化史、异常高压演化史、油气充注史以及盖层的封闭能力等成藏要素结合起来,建立起该区地层、异常高压及孔隙度随地质历史时期的演化图(图11)。

从图11中可以看出,西湖凹陷中央反转构造带油气的充注以及地层的抬升与沉降对地层压力和孔隙度的演化具有深刻的影响。第二期油气充注为该区主要的充注时期,主要处于的地质历史时期为中中新世—

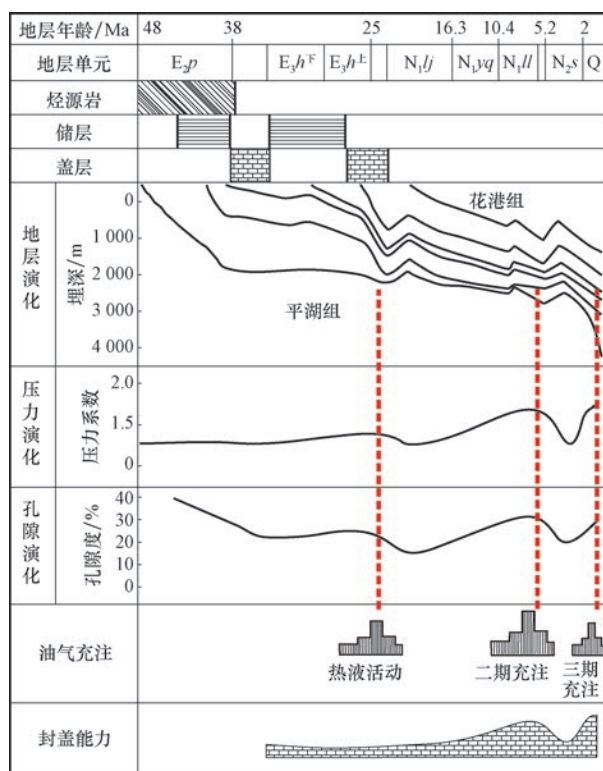


图11 西湖凹陷中央反转构造带平湖组 and 花港组
地层压力演化与油气成藏耦合关系

Fig. 11 Coupling relationship between formation pressure evolution and hydrocarbon accumulation of the Pinghu and Huagang Formations in the central overturned structural belt of the Xihu Sag

晚中新世,该时期出现了第一次地层压力异常(第二根红线)。上新世—第四纪是第三期油气充注的关键时期,该时期同样存在地层的快速沉降埋藏,过高的沉降速率叠加油气在中上新世—第四纪的持续充注会对地层压力造成显著影响,使之出现了第二次地层压力异常(第三根红线)。通过对图11中压力与油气充注及封盖能力的对比,总体上呈现出超压与油气充注及盖层封闭能力具有时间上的同一性,此时的油气充注一方面可以抑制胶结物生长,另一方面油气生成带来的有机酸也可以溶蚀长石等可溶物质,造成孔隙度增高,形成良好的储层,有利于油气成藏。综上所述,西湖凹陷中央反转构造带平湖组和花港组异常压力的演化历史在时间上与地层演化、孔隙演化、油气充注以及封盖能力等成藏要素具有很好的匹配关系。因此,异常地层超压对西湖凹陷油气成藏的作用是建设性的,是该区油气成藏的重要因素。此外,研究发现中央反转构造带南部的ZHN-2井平湖组地层中存在25 Ma左右的有机包裹体,有学者据此推断该区受到过热液活动的影响(第一根红线)^[25],因为在渐新统花港组沉积末期不具备有机质生烃的条件,不可能发生烃类充

注,这将是下一步研究工作。

6 结论

1) 西湖凹陷中央反转构造带普遍发育异常高压,异常高压带主要起始于花港组下段。通过Eaton法计算了单井压力及压力系数,认为研究区花港组以下的异常高压主要呈阶梯式增大,从中央反转构造带南部向中部,异常压力顶界面有变深的趋势。中央反转构造带南部异常高压主要起始于埋深3 300 m,中央反转构造带中部异常高压主要起始于埋深3 800 m,其层位多属于花港组下段。

2) 利用PetroMod软件模拟出西湖凹陷中央反转构造带单井及剖面上不同时期地层压力的演化特征,认为距今13~9 Ma和4~0 Ma是地层压力大幅度增大的关键时期。结合研究区油气充注史的研究,确定了油气大规模充注和地层压力的大幅度增加在时间上具有很好的吻合性,说明了生烃作用造成的油气充注事件是研究区异常高压发育的主要因素。结合该区地层演化、孔隙演化等,明确出研究区异常压力发育演化与油气成藏的耦合关系。

参 考 文 献

- [1] 金秋月,何生,卢梅. 渤海湾盆地车镇凹陷地层超压特征与油气赋存关系[J]. 地质科技情报,2015,34(3):113-119.
Jin Qiuyue, He Sheng, Lu Mei. Relationship between overpressures characteristics and hydrocarbon enrichment in the Chezhen Depression of Bohai Bay Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(3): 113-119.
- [2] 刘景东,蒋有录. 东濮凹陷中央隆起带北部古近系异常高压与油气成藏的关系[J]. 天然气工业,2012,32(12):30-36.
Liu Jingdong, Jiang Youlu. Relationship between abnormally high pressure and hydrocarbon accumulation of the Paleogene reservoirs in the northern part of central uplift, Dongpu sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 30-36.
- [3] 徐东锋,赵红佳,刘见宝. 济阳坳陷沾化凹陷异常高压与油气成藏模式[J]. 石油与天然气地质,2011,32(4):601-606.
Xu Dongfeng, Zhao Hongjia, Liu Jianbao. Abnormal pressure and hydrocarbon reservoiring pattern of the Zhanhua sag in Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 601-606.
- [4] 侯凤香,董雄英,吴立军,等. 冀中坳陷马西洼槽异常高压与油气成藏[J]. 天然气地球科学,2012,23(4):707-712.
Hou Fengxiang, Dong Xiongying, Wu Lijun, et al. Abnormal overpressure and hydrocarbon pooling in Maxi sag, Jizhong Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 707-712.
- [5] 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),2015,42(1):60-69.
Liu Jinshui. Characteristics of formation pressure and their relation-

- ship with hydrocarbon distribution in Pinghu tectonic belt of Xihu sag, East China Sea[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(1): 60–69.
- [6] 李忠, 费卫红, 寿建峰, 等. 华北东濮凹陷异常高压与流体活动及其对储集砂岩成岩作用的制约[J]. 地质学报, 2003, 77(1): 126–134.
- Li Zhong, Fei Weihong, Shou Jianfeng, et al. Overpressure and fluid flow in the Dongpu Depression, North China: Their constraints on diagenesis of reservoir sandstones[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(1): 126–134.
- [7] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(1): 1–12.
- [8] Jeans C V. Clay diagenesis, overpressure and reservoir quality: An introduction[J]. Clay Minerals, 1994, 29: 415–424.
- [9] Hao Fang, Li Sitian, Gong Zaisheng, et al. Thermal regime, interreservoir compositional heterogeneities, and reservoir-filling history of the Dongfang gas field, Yinggehai Basin, South China Sea: Evidence for episodic fluid injections in overpressured basins? [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(5): 607–626.
- [10] 王永诗, 王勇, 郝雪峰, 等. 深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏——以济阳坳陷东营凹陷古近系为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 490–498.
- Wang Yongshi, Wang Yong, Hao Xuefeng, et al. Genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of quality reservoir in deep and complicated reservoir rocks: A case from the Palaeogene in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 490–498.
- [11] 李志, 窦立荣, 艾小兰. 异常高压与油气的生成[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(5): 28–30.
- Li Zhi, Dou Lirong, Ai Xiaolan. Abnormal high pressure and generation of hydrocarbon[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(5): 28–30.
- [12] Price L C, Wenger L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis[J]. Organic Geochemistry, 1992, 19: 141–159.
- [13] Dalla T M, Mahlmann R F, Ernst W G. Experimental study on the pressure dependence of vitrinite maturation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(14): 2921–2928.
- [14] Bekele E B, Person M A, Rostron B J, et al. Modeling secondary oil migration with corescale data: Viking Formation, Alberta basin[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(1): 55–74.
- [15] 曾治平, 郝芳, 宋国奇, 等. 车镇凹陷套尔河洼陷古地层压力演化与油气幕式成藏[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 193–198.
- Zeng Zhiping, Hao Fang, Song Guoqi, et al. Palaeo-formation pressure evolution and episodic hydrocarbon accumulation in Tao erhe Depression, Chezheng Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 193–198.
- [16] Du Xuebin, Xie Xinong, Lu Yongchao, et al. Multiple overpressure systems and their relationship with hydrocarbon accumulation in the Qikou Depression of the Bohai Bay Basin, China[J]. Geological Journal, 2015, 50(4): 465–476.
- [17] 张先平, 张树林, 陈海红, 等. 东海西湖凹陷平湖构造带异常压力与油气成藏[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(3): 93–97.
- Zhang Xianping, Zhang Shulin, Chen Haihong, et al. Abnormal pressure and related reservoir formation in the Pinghu structural belts of Xihu Depression, East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(3): 93–97.
- [18] 杨彩虹, 孙鹏, 田超, 等. 东海盆地西湖凹陷平湖组异常高压分布及形成机制探讨[J]. 海洋石油, 2013, 33(3): 8–12.
- Yang Caihong, Sun Peng, Tian Chao, et al. Distribution and formation mechanism of overpressure in Pinghu Formation, Xihu sag, East China Sea[J]. Offshore Oil, 2013, 33(3): 8–12.
- [19] 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 Guohua. 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.
- [20] 张远兴. 东海西湖凹陷流体动力场演化及其对油气成藏的影响作用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009: 1–6.
- Zhang Yuanxing. The evolution of fluid dynamic field and its impact on hydrocarbon accumulation in Xihu Depression, East China Sea shelf Basin[D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing), 2009: 1–6.
- [21] 郝芳. 超压盆地生烃作用动力学与油气成藏机理[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 3–18.
- Hao Fang. Kinetics of hydrocarbon generation and mechanism of hydrocarbon accumulation in overpressure Basin[M]. Beijing: Science Press, 2005: 3–18.
- [22] 杜栩, 郑洪印, 焦秀琼. 异常压力与油气分布[J]. 地学前缘, 1995, 2(3–4): 137–147.
- Du Xu, Zheng Hongyin, Jiao Xiuqiong. Abnormal pressure and hydrocarbon accumulation[J]. Earth Science Frontiers, 2(3–4): 137–147.
- [23] Chilingar G V, Serebryakov V A, Robertson J O. Origin and prediction of abnormal formation pressures[M]. USA: Elsevier Science, 2002: 1–20.
- [24] 石万忠, 陈红汉, 陈长民, 等. 珠江口盆地白云凹陷地层压力演化与油气运移模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31(2): 229–236.
- Shi Wanzhong, Chen Honghan, Chen Changmin, et al. Modelling of pressure evolution and hydrocarbon migration in the Baiyun Depression, Pearl River Mouth Basin, China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(2): 229–236.
- [25] 高伟中, 杨彩虹, 赵洪. 东海盆地西湖凹陷热事件对储层的改造及其机理探讨[J]. 石油实验地质, 2015, 37(5): 548–554.
- Gao Weizhong, Yang Caihong, Zhao Hong. Reservoir formation and modification controlled by thermal events in the Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(5): 548–554.