

东海陆架盆地大春晓油气田成藏动力学特征及成藏模式

许红^{1,2,3}, 张威威^{1,3,4}, 季兆鹏^{1,5,6}, 王黎⁷, 王晴^{2,8}, 苏大鹏^{1,3}, 雷宝华^{1,3}, 杨艳秋^{1,3}

[1. 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 4. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 5. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 6. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590 7. 中国石油 新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 8. 长江大学, 湖北 武汉 430100;]

摘要:油气成藏动力学是动力学研究的前沿,大春晓油气田成藏动力学是东海陆架盆地油气成藏特征研究的热点,也是长期研究薄弱环节。通过井震解释和数值模拟,分析了大春晓油气田成藏动力学三大能量场:温度场、压力场和应力场的成藏动力学要素特征。研究表明区内具有地温梯度高特点,达 $36\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,且发现60个岩浆侵入岩,导致局部增温作用促进油气成藏;烃源岩热成熟度不一致性明显,数值模拟结果表明,早期大春晓地区东北部和东南部成熟度高,其中,天外天构造和春晓-断桥构造烃源岩成熟时间最晚,大春晓构造烃源岩晚成熟;早、中期NNE向拉张应力场产生拉张正断层,有利于油气运移和保存;晚期NNW向张剪性应力场所形成平移断层有利于油气保存。区内发育典型超压并存在大型超压囊,提出了超压-压力囊模式,超压与断裂体系促进了油气运移。采用数值模拟技术阐述油气运移的时代、过程与结果。通过大春晓油气田含油气系统关键时刻和事件、成藏动力学机制与过程综合分析,建立了大春晓油气田成藏动力学模式和成藏模式。

关键词:成藏模式;成藏动力学;含油气系统事件;大春晓油气田;东海陆架盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Dynamic characteristics and model of hydrocarbon accumulation in the large Chunxiao oil and gas field in the East China Sea Shelf Basin

Xu Hong^{1,2,3}, Zhang Weiwei^{1,3,4}, Ji Zhaopeng^{1,5,6}, Wang Li⁷, Wang Qing^{2,8}, Su Dapeng^{1,3},
Lei Baohua^{1,3}, Yang Yanqiu^{1,3}

[1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Sedimentology & Environmental Geology (State Oceanic Administration, The First Institute of Oceanography, Soa, Qingdao, Shandong 266061, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China; 4. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 5. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 6. Laboratory of Sediment Mineralization and Sediment Mineral, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 7. Research Institute of Exploration and Development of XinJiang Oilfield Branch, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 8. Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China]

Abstract: The research on the dynamics of hydrocarbon accumulation is a frontier of kinetics research. The study on the dynamics of hydrocarbon accumulation in the large Chunxiao oil and gas field is also a hot topic, but a bottleneck as well, in the study of hydrocarbon accumulation features in the East China Sea Shelf Basin for a long time. Through well-to-seismic tie interpretation and numerical simulation, we concluded three energy fields supporting the accumulation in the oil and gas field, including temperature field, pressure field and stress field, the dynamic elements of which were analyzed as well. It's pointed out that the study area is characterized by high geothermal gradient, up to $36\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,

收稿日期:2018-09-13; 修订日期:2018-09-25。

第一作者简介:许红(1957—),男,博士、研究员,海洋石油地质。E-mail: qdxhong@163.com。

基金项目:科技部基础调查专项(2017FY1407);国家自然科学基金项目(41872114);山东省沉积成矿实验室基金项目(DMSM2018030)。

and 60 magmatic intrusive rocks are found therein, leading to the promotion of hydrocarbon accumulation by locally increasing temperature. The thermal maturity of source rocks is significantly inconsistent. The results of numerical simulation show that the maturity is high in degree in northeast and southeast of large Chunxiao area; the Tianwaitian and Chunxiao-Duanqiao structures come to the last in terms of the maturity of their source rocks, and the large Chunxiao structure is also late in this aspect; the NNE-trending tension stress field in the early and middle stages produces tensile normal faults, which are conducive to hydrocarbon migration and preservation. In the later period, the NWW-trending tension-shear stress field forms translational faults, which are also favorable for hydrocarbon preservation. Typical overpressure is developed and a large overpressure sac exists in the area, and an overpressure-pressure sac model is proposed to demonstrate the effect of overpressure and fracture systems on promoting hydrocarbon migration. In addition, the numerical simulation method is used to reveal the era, process and results of hydrocarbon migration. The key moment and events, and dynamic mechanism and process of hydrocarbon accumulation in the study area are integratedly analyzed, leading to the establishment of the dynamic model of hydrocarbon accumulation in large Chunxiao oil and gas field as well as its accumulation model.

Key words: accumulation model, dynamic model of hydrocarbon accumulation, petroleum system event, large Chunxiao oil and gas field, East China Sea Shelf Basin

东海油气勘探始于20世纪50年代,至今沿东海西湖坳陷西斜坡和中央反转构造带西湖-基隆两坳陷间的鞍部地区发现春晓等工业价值油气田。中央反转构造带埋藏史-热演化史具有南北分带特点,北部曾经历更大的埋深和更高的地温梯度^[1]。前人对西湖凹陷应力场和流体势场进行了模拟分析^[2],并预测了西湖凹陷油气运移的有利指向;指出平湖斜坡带花港组泥岩段普遍存在异常高压,且异常高压明显呈带状分布^[3],具有“阶梯式”增大的特征;西湖凹陷西斜坡中段平湖构造带油气主要来源于平湖组煤系源岩,油气藏多分布在超压顶界面附近^[4];由高压流体注入引起的传导型超压在区内目的层发育,并对应优良油气储层,说明异常高压发育与油气充注空间上具有一致性^[5]。在中央反转构造带南部发现的大春晓油气田群位于鞍部地区苏堤构造带,不但是其南延部分,而且南北低,中部高,呈北北东向展布;也相应具有上述温压应力场特征,事实上,大春晓油气田群西南部与西湖坳陷西斜坡宝石油气田为近邻,岩浆火山活动强烈,却长期缺乏相关研究及公开性报道。

Kingston等^[6]提出沉积盆地以板块构造和动力学特征研究为基本内容;Dickinson^[7]提出“Basin Geodynamics”是盆地研究聚焦的方向;李思田^[8-9]反复论证盆地构造动力学机理与盆地形成演化地球动力学背景及油气系统演化动力过程研究的意义。事实上,地球规模尺度动力学(深部、板块尺度)、盆地规模尺度动力学(盆地尺度)、区带规模动力学(目标尺度),即油气成藏动力学^[10]理论体系涉及不同层级动力学研究范畴,但就东海大春晓油气田而言,相关研究薄弱,不

仅属于动力学体系理论创新研究重要环节,而且对于启示和实现东海陆架盆地油气勘探新一轮重大突破实际意义深远。

1 地质概况

东海陆架盆地面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于西太平洋边缘海中段,形成演变受菲律宾海板块-欧亚板块近东西向相对运动影响,特别是发育琉球海沟-琉球岛弧-冲绳海槽盆地-钓鱼岛隆褶带-东海陆架盆地经典板块沟弧盆体系,并受印度-青藏高原相对运动远程效应影响^[11-12],在不同构造演化期形成中-新生代大型叠合含油气盆地并“东西分带、南北分块”;过程中记录下东海地球动力学-盆地动力学过程及结果,包括深部岩浆源区地幔性质、深部过程及特征等珍贵信息,形成东海板块构造的典型沟-弧-盆体系盆地动力学模式^[11];提出了东海新生代盆地历经裂谷期、断陷期、拗陷期和披覆期4大演化阶段^[13]。该盆地并不等同于西太平洋边缘海诸如鄂霍茨克海、日本海等,而是演化更趋成熟,巨厚沉积形成不同时代断陷原型盆地并列、不同类型原型盆地非继承性叠加和后期构造反转(图1)的构造作用过程。

不同时代断陷原型盆地并列,表现为东海陆架盆地西部温东坳陷带北北东向的东断西超古新世断陷,中部浙东坳陷带北北东向的东断西超早中始新世和西断东超晚始新世断陷,叠加起来形成东海大陆边缘裂陷盆地,在东部冲绳海槽海域形成中新世至第四纪弧后裂陷盆地。

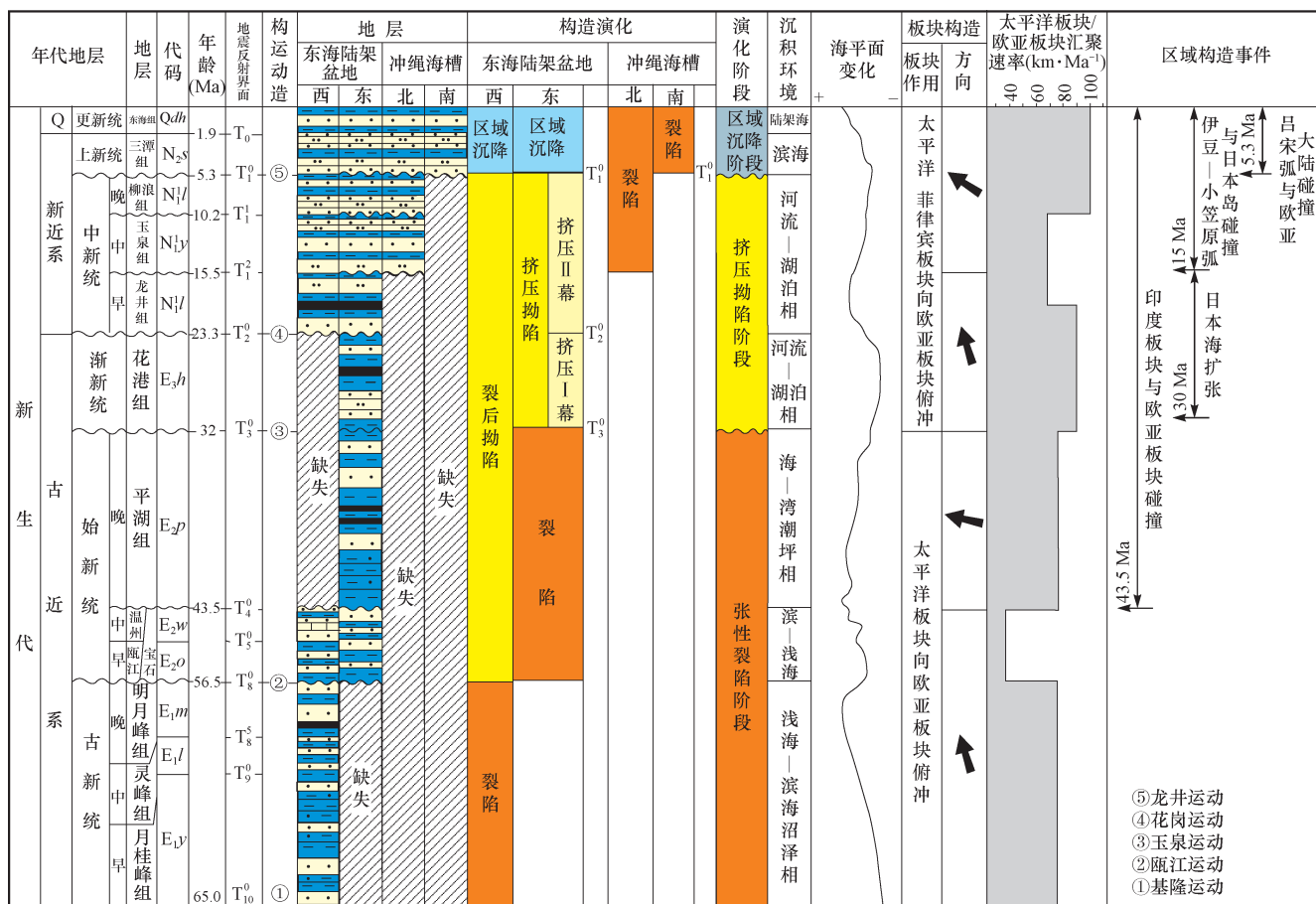


图1 东海陆架盆地动力学演化综合柱状图

Fig. 1 Column showing the dynamic evolution of the East China Sea Shelf Basin

不同类型原型盆地非继承性叠加。西部温东坳陷带表现为3类原型盆地非继承性叠加,即前新生代盆地^[14-15]、古新世断陷-始新世披覆和中新世-第四纪披盖;浙东坳陷带为4种原型盆地构造叠加,即早-中始新世东断西超、晚始新世西断东超的断陷、渐新世至中新世的坳陷和晚中新世至第四纪的披盖;冲绳海槽单一晚中新世至第四纪的断陷。

超过60年勘探发现,基本认识了东海盆地的特征,发现东海裂谷断陷深达10 000~12 000 m,是西湖坳陷和基隆坳陷的构造主体;东海裂谷断陷盆地热沉降均衡时间50~67.5 Ma,形成于“华夏古陆”之上,是陆内海侵作用的产物,具有从海洋插入大陆的特征,并在西湖-基隆两坳陷间形成鞍部;东海裂谷断陷盆地以鞍部地区为界,沉积环境为“南海北陆”;从东到西,带状构造地质时代西老东新;在盆地范围形成排列方向和分布范围都十分宽广的雁行状弧形拉张谷,发现形成大量铲状断裂,证实为“被动地幔”变形。

通过二维-三维调查资料解释,在查明圈闭形态、高点位置和断裂系统基础上,最终确定了大春晓构造4大高点。截至1995年12月,已在大春晓构造先后

发现残雪、断桥、天外天和春晓油气田,在数百平方公里范围内构成大春晓油气田群(图2)。公开性报道数据为:春晓一井渐新统花港组发现油气显示层12层,钻杆单层测试5层,获高产工业油气流,日产气 $160.13 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产油 200.3 m^3 ,具有厚度大(单层最大厚度23.4 m)、储层丰度高、油气产量高等特点,证实大春晓构造为富含油气构造,为特高产凝析油气层,属于逆断层下盘重大油气发现。

2 资料与技术方法

大春晓油气田构造位置见图2,地震数据来自青岛海洋地质研究所和上海海洋石油局。二维多道地震测网密度 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 部分达到 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,总数超过6 000 km;解释绘制1:500 000构造图和火山岩分布图;利用了部分三维资料,涉及春晓1井、3井和天外天1井等钻井资料;同时,参考了多方法资源定量评价和利用Probas2.0盆地模拟软件的数值模拟成果,含油气系统事件、成藏模式与成藏动力学模式分析参考了相关报告、公开性资料和大量测试分析数据。

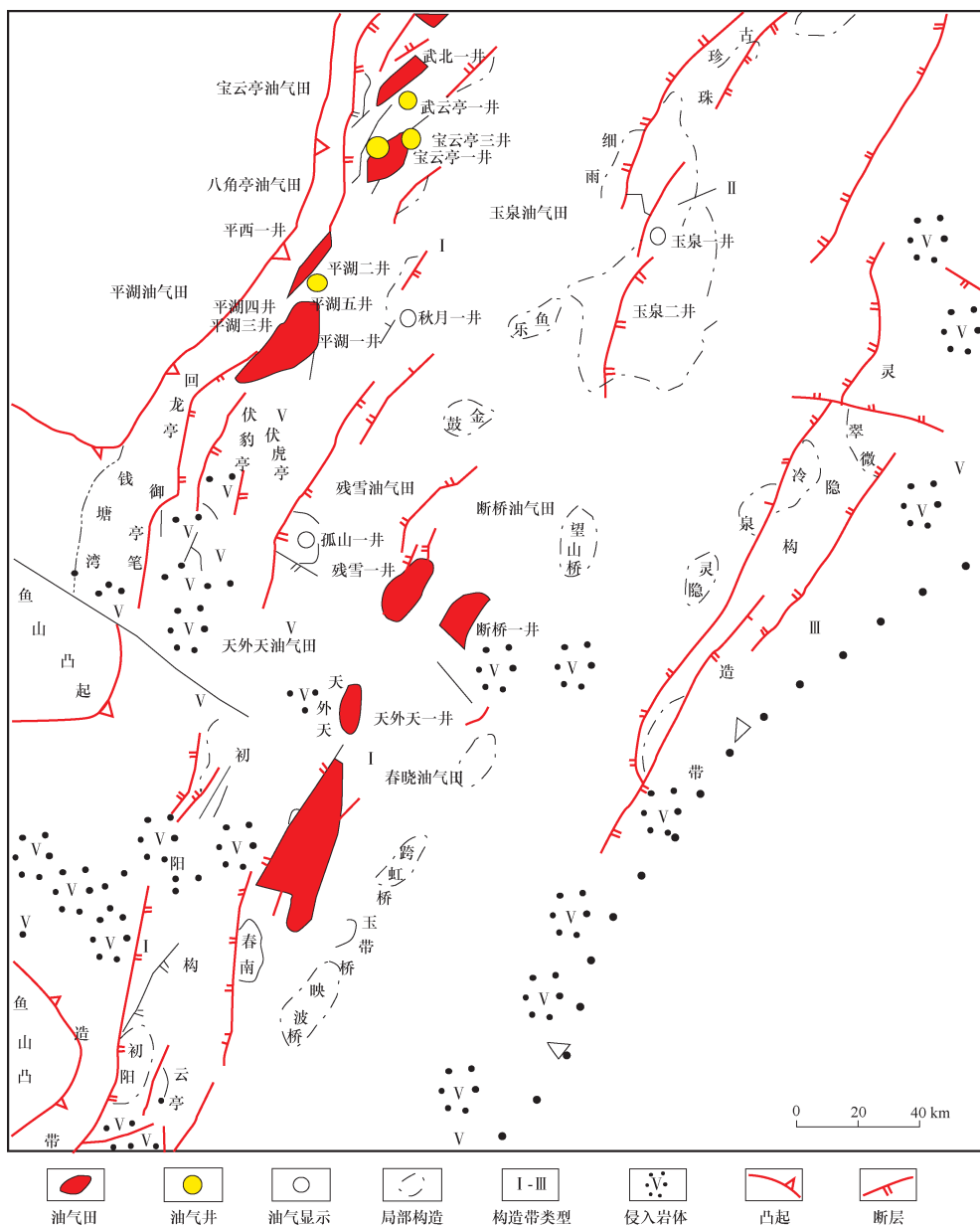


图2 大春晓油气田构造位置

Fig. 2 Location of the large Chunxiao oil and gas field

3 大春晓油气田成藏要素、动力学机制和模式

3.1 大春晓地区火山岩浆作用与烃源岩成熟特征关系

3.1.1 火山岩浆作用是油气成藏增温特征要素

解释发现大春晓油气田周缘 6 000 km² 范围内赋存大量火山喷出-侵入岩体,地震解释超过 60 个,有多种火山岩类型,分别属于欧江运动(T_4^0)、玉泉运动一幕(T_3^1)、玉泉运动三幕(T_3^0)、龙井运动一幕(T_2^4)、龙井运动三幕(T_2^2)、龙井运动四幕(T_2^0) 6 个火山岩浆活

动期;其中,主要活动期为龙井运动一幕(T_2^4)和龙井运动三幕(T_2^2),分别属于晚渐新世一早中新世和中中新世晚期(表1)。岩浆活动与断层关系密切,定性为喷出岩和侵入岩。

相关性分析认为,春晓油气田排烃期、油气运移期为中新世末至上新世,主要火山岩浆活动为多期次活动,但或早于这个时期或只是进入深层生烃层系。事实上各期火成岩侵入对成藏的负面影响和破坏作用均较小,反而在油气形成、运移(如火山浮岩)、聚集、成熟、成藏和保存(如玄武岩既可为储层也可为盖层)过程中是积极因素,起到增温作用,加速烃源岩成熟运移及成藏。

表 1 大春晓油气田不同构造层火山岩岩浆作用解释结果

Table 1 Magmatism interpretation of volcanic rocks in different structural layers in the large Chunxiao oil and gas fiels

构造运动	瓯江运动	玉泉运动一幕	玉泉运动三幕	龙井运动一幕	龙井运动三幕	龙井运动四幕
构造层	T_4^0	T_3^0	T_3^0	T_2^4	T_2^2	T_2^0
火山岩数量/个	2	3	4	20	11	18

3.1.2 较高的古地温是成烃转化增温过程中油气成藏的有利特征要素

根据 5 口钻井储层资料统计分析和研究区温度压力场对比,发现大春晓油气田群地温梯度为 36 ~ 40 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$,如春晓三井实测所示(图 3),表现为高温异常特征。通过储层包裹体分析(气液比 $\leq 5\%$ 的盐水溶液包裹体),认识到平湖组油气储层包裹体温度分布有一个从上段到下段、在各大油气田都保持不变的峰值:130 ~ 135 $^{\circ}\text{C}$ 的特征。识别了 3 期不同温度包裹体:早期温度一般在 107 ~ 174 $^{\circ}\text{C}$,明显高于今地温;中期温度为 98 ~ 160 $^{\circ}\text{C}$,与今地温接近;晚期温度为 84 ~ 148 $^{\circ}\text{C}$,低于今地温。各期温差约 10 $^{\circ}\text{C}$,温度分布中值代表运移期油气进入储层时的古温度^[16]。

通过古地温模式和储层埋藏史研究,确定了包裹体形成时的埋深及对应地质时期。春晓一井包裹体早期温度对应时间 12 ~ 14 Ma(中中新世),中期对应时间 6 Ma,晚期为 2 Ma,大春晓油气田及整个苏堤构造带其余各井的数据也有同样的结论。同时,认为油气开始运移时间(第一期)为中中新世,第二期油气重要运聚期为中新世晚期,第三期大规模油气运移期为上新世至第四纪^[16],这证实了数值模拟的结果,也印证了火成岩研究的结论。

3.2 大春晓地区压力场特征要素

春晓三井钻井深度有限,但钻至 3 600 m 仍然保持正常地层压力特征,所以推测深部地层应当与西湖凹陷已揭示钻井一样存在超压现象。利用天外天 1 井全井段实测 R_0 (镜质体反射率)资料,拟合并模拟形成研究区地层底面 R_0 平面等值线图、地层底面温度平面等值线图、现今深度 R_0 交绘图、现今深度温度交绘图、埋藏史成熟史图和埋藏史温度史图。可见平湖组主力生油层大约在距今 5 Ma,埋深 2 300 m 左右开始烃类热成因过程,迄今平湖组大部或部分尚处于液态烃窗口内。

3.2.1 大春晓地区压力场及超压特征

在预测地下流体压力场的方法中,声波测井的地层压力(DST 和 RFT)和地震速度资料最为重要。根据声波测井(DST)的单井模拟结果,西湖生油凹陷平湖工区、平北工区以 3 800 m 为界(平湖组中下部),之上为常压(压力系数小于 1.2),之下为超压(压力系数大于 1.2)。

地震剖面模拟结果表明,西湖生油凹陷 T_2^0 以上地层压力系数多小于 1.2,为静水压力; T_2^0 — T_3^0 地层压力系数在 1.2 ~ 1.4,少数大于 1.4,最大剩余压力达

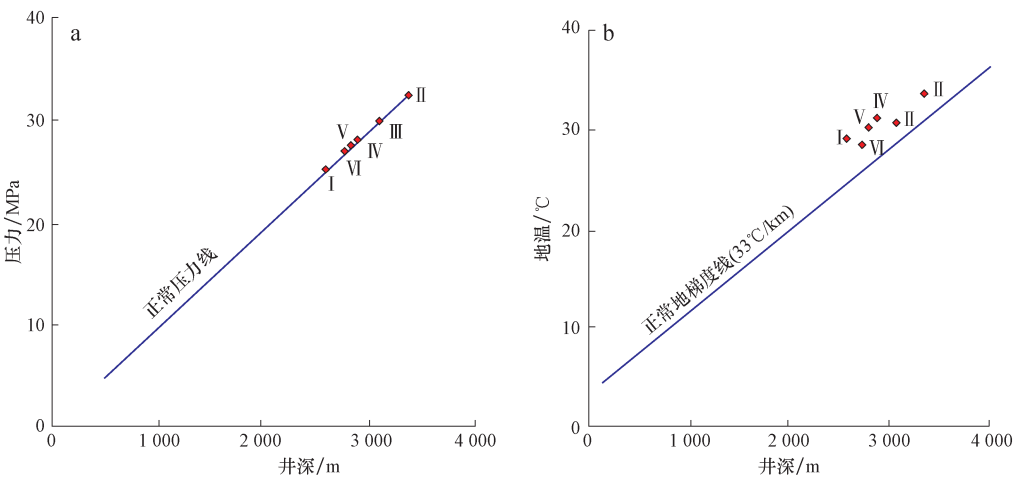


图 3 大春晓油气田春晓三井地层温压变化对比^[17]

Fig. 3 Comparison of formation temperature and pressure changes of well Chunxiao 3 in the large Chunxiao oil and gas fiels^[17]

a. 地层压力变化示意图;b. 地温变化示意图

I—VI代表样品号

20 MPa; T_3^0 以下地层压力系数在 1.4 ~ 1.8, 可达 1.8, 剖面最大剩余压力多数大于 15 MPa。

推测大春晓油气田深部存在高压异常 (大于 3 800 m), 与西湖生油凹陷平湖工区、平北工区一起构成大春晓构造区带北部、东部、西部和深部的超高压带和异常地层压力带; 产生由北部、东部、西部 3 个方向向中部和南部、由下向上的径向与纵向交错泄压区带, 这就是研究区内的运移主带, 运移主带内运移方式以垂向为主。

以上压力因素在时间和空间上的相互作用形成巧妙配合, 构成了大春晓油气田群油气运移动力的特征和机制。根据著名石油地质学家 Hunt^[18] 研究全球 180 个沉积盆地, 发现 160 个存在超压异常, 提出流体压力封存箱理论。本文在强调封闭层与油气产层相关关系 (封闭层之上为正常压力系统, 封闭层之下为异常压力系统, 即超压封存箱, 油气主要产自直接被封闭层封盖的储层中) 基础上, 建立了研究区压力封存箱模式 (图 4)。

3.2.2 沉积作用、成岩作用和构造作用与大春晓地区超压关系

Hunt^[18] (1990) 统计分析了全球 180 个超压盆地特征, 发现其中的 90% 是富含油气盆地。这些超压盆

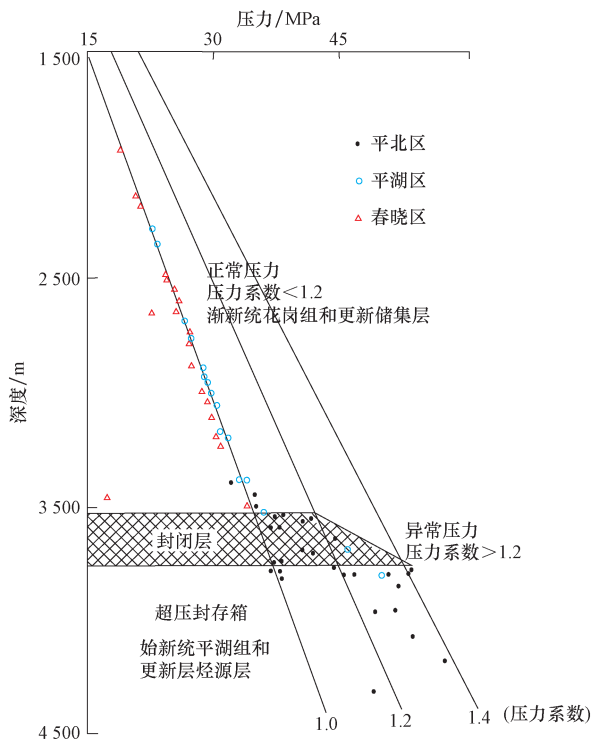


图4 西湖凹陷-大春晓油气田超压封存箱模式

Fig. 4 Xihu Sag-large Chunxiao oil and gas field overpressure storage tank model

地被分为“墨西哥湾”快速沉降型 (产生于欠压实型超压地层) 和“落基山”成岩作用型两类。在东海陆架盆地西湖凹陷和大春晓油气田, 发现不能简单归类为“墨西哥湾”型或“落基山”型。大春晓油气田超压系统可能与多种作用特征要素有关, 包括不平衡压实作用、生烃排烃运移作用、粘土矿物脱水作用、水热增压作用和构造应力作用等。除了强烈挤压构造应力作用之外, 压实不平衡和生烃作用是可以独立产生大规模超压的主要特征要素。

由图 4 可见大春晓油气田主要高产油气层系分别分布于压力封闭层及其上下相邻储层之中, 对应地质层位分别为花港组上段、花港组下段和平湖组上段。

3.3 大春晓地区地质历史时期应力场特征

通过大春晓地区有限元数值模拟研究区域应力场特征, 结果表明早期拉张应力场主要为 NNE 向, 产生的拉张正断层有利于油气运移; 中期压剪性应力场也主要为 NNE 向, 产生一系列挤压背斜, 有利于油气保存; 晚期张剪性应力场主要为 NWW 向, 产生晚期张剪性平移断层, 在断裂活动期渗透能力强, 静止期渗透能力弱, 有利于油气保存。

3.4 大春晓地区油气运移动力学要素

3.4.1 大春晓油气田赋存分布特征

大春晓油气田位于鞍部地区, 得益于以短源 (距离 1 ~ 8 km) 为主、方向性指向性一致、经由输导开启性断层的运移。天外天油气田相邻春晓油气田, 在多层构造图上连通, 由下至上表现为差异构造变动一致性特征, 二者与残雪、断桥油气田一起, 组合形成名副其实的大春晓油气田群。事实上, 从下始新统构造层 (瓯江组) 开始, 春晓-天外天高点逐渐连通一体, 总面积超过 100 km²。其中, 至中-上始新统构造层平湖组上段开始, 春晓构造高点已比天外天构造高点高度增加了 100 m, 由于渐新统花港组构造层和中-上始新统平湖组上段构造层砂体形成实际发现的油气产层, 春晓构造和天外天构造晚始新世和渐新世在高点埋深和构造面积方面发生的上述变化直接导致二者油气产层和油气储量变化。通过二者 100 多米油气产层连井对比, 发现天外天 1 井油气产层高出春晓 1 井油气产层百余米, 出现油气层尖灭。

3.4.2 油气运移动力学时间、过程及量比关系特征

汪蕴璞等^[19] (1997) 通过估算平湖组早、中、晚中新世和上新世 4 个流体排放期, 量化的油气运移时间、

过程及量比关系为:①油气在龙井运动之前中新世已经完成大量运移,龙井运动加快了油气流的运移速率,并在局部地区调整了油气流运移的指向;②平湖组在中新世的排液量比上新世高出近10倍。

3.5 大春晓油气田成藏动力学机制及模式

大春晓油气田成藏动力学机制及模式研究和提出了基于大量生、运、聚勘探数据、包括二维数值模拟实验,涉及旨在满足研究区基本成藏要素条件的油气成藏生排运聚过程、环境和结果及其成藏规律,获得成藏动力学普遍的和特殊的认识结论,以深层次认识大春晓油气田油气成藏的规律,推进成藏动力学理论的认识,进一步启示和实现相邻地区油气勘探突破。

3.5.1 大春晓油气田含油气系统成烃-成藏动力学系统机制与过程

1) 不同压力系统张性断层输导体系运移成藏动力学机制与过程

早期,东海陆架盆地呈拉张应力动力场状态,形成拉张断裂系统,构筑平湖组各大烃源系统由平湖组至花港组各大储层保存体系的主要运移输导系统,也是大春晓油气田最为重要的输导系统。其中,EW向张性断裂是大春晓成藏最大制约因素,该断裂的切割性质以及侧向封堵性质是油气成藏的重要因素。当其切割阻碍不同岩性地层时,导致油气整体侧向成藏;当一些储集封闭有利组合存在时,亦即EW向张性断裂成藏作用在花港组上段中部基本结束后,却仍然可以在花港组上段的下部和花港组下段部分成藏^[20]。

渐新世-中新世,由于中期龙井运动向西的水平挤压作用,导致抬升、剥蚀形成褶皱,使西湖凹陷构造形态由东西方向V型变为W型,同时形成一系列压性逆断层,在正常压力系统中,玉泉运动期形成的系列拉张断层面是开启性质的,而当“超压囊”形成,系列压性逆断层面被封闭,系列非输导性断层组最利于烃类保存。

超压囊内油气主要通过垂直向上运移成藏的机制,还存在正常压力断层系统成藏的机制:断裂输导系统向断面两侧相连砂体等量分配承载烃类,在砂泥岩互层剖面中成藏;第三类机制:在上覆中新世压性逆断层系统中,因渗透能力差或发育不渗透断层系统,形成晚期浅层油气藏。这3类机制均已通过钻井予以证实。

事实上,超压推动运移,产生地形驱动、压实驱动、构造应力驱动和对流驱动,并受沉积作用、成岩作用和构造作用影响或主导,构成油气运移动力学机制。

2) 压性逆断层下降盘封闭形成一批高产能油气藏动力学机制

如前述,大春晓地区发育张性逆断层(渐新世以前)、压性逆断层(中新世)和剪切正断层(上新世末)。目前钻探发现中新世压性逆断层下盘油气藏,证明该断裂系统封盖具有动力学封闭体系性质,含油气层位分别是渐新统花港组和始新统平湖组。花港组下段为主含油气井段,平湖组多层油气藏和花港组上段薄层油气藏为次油气井段,具有含油气层位多,厚度大,储层丰度高,油气产能高等系列特点。

分析研究区平湖组沉积厚度,确认最大沉积厚度为3000m。按照春晓1井砂泥岩含量百分比计算,其泥岩沉积厚度可达2000m。该组岩石性质单一、分布范围广、沉积速率高,将产生不均衡差异压实作用,进而形成超压或“超压囊”,具有很强封盖能力。这种情况又因大春晓油气田两侧为深洼,呈典型W状而放大,构成差异构造-沉积型双要素形成超压机制。

其次,研究区烃类的大量生成时期为晚中新世的生油高峰期,但两侧深洼深部中新世早期即进入生油高峰期。这样,早中新世-上新世有机质丰度较高的平湖组已经成熟,此时泥岩大量成烃,且逐渐形成并达到所谓压实极限形成超压,超压囊位于超压封存箱烃源层系之中,形成典型超压或“超压囊”排烃与运移成藏动力学机制。

再次,西湖凹陷在2100m以下出现蒙-伊混层,而平湖组大套泥岩埋深一般大于3000m。成岩作用研究表明,和大春晓油气田群平湖组一样,凡埋深在3100m以下的沉积层蒙脱石全部转化为伊利石,该深度已经越过生油门限,表明生烃源岩是在生成大量烃类的同时发生蒙-伊转化和大量层间自由水释放的,同时由于这类层间自由水密度低,导致孔隙流体压力增加形成超压和“超压囊”,是第三种成藏动力学机制。

3.5.2 大春晓油气田自生储盖型成烃-成藏动力学系统机制与过程

大春晓油气田群主要生油层系为始新统平湖组,在其东西两侧白堤、三潭深凹中较为发育,东侧最大沉积厚度超过2100m,达到3000m;春晓一井揭示泥岩占组厚的62.2%,泥岩有机碳为0.68%,煤层占组段厚的3.4%,春晓二井揭示泥岩厚度占组段厚度的40.8%,泥岩有机碳含量为1.01%。利用Baspro.2.0超级盆模系统完成模拟结果,认为平湖组生油高峰期在晚中新世(白堤、三潭深凹平湖组生油高峰期在中新世早期,并延续至晚中新世,现仍处于生气高峰阶段;

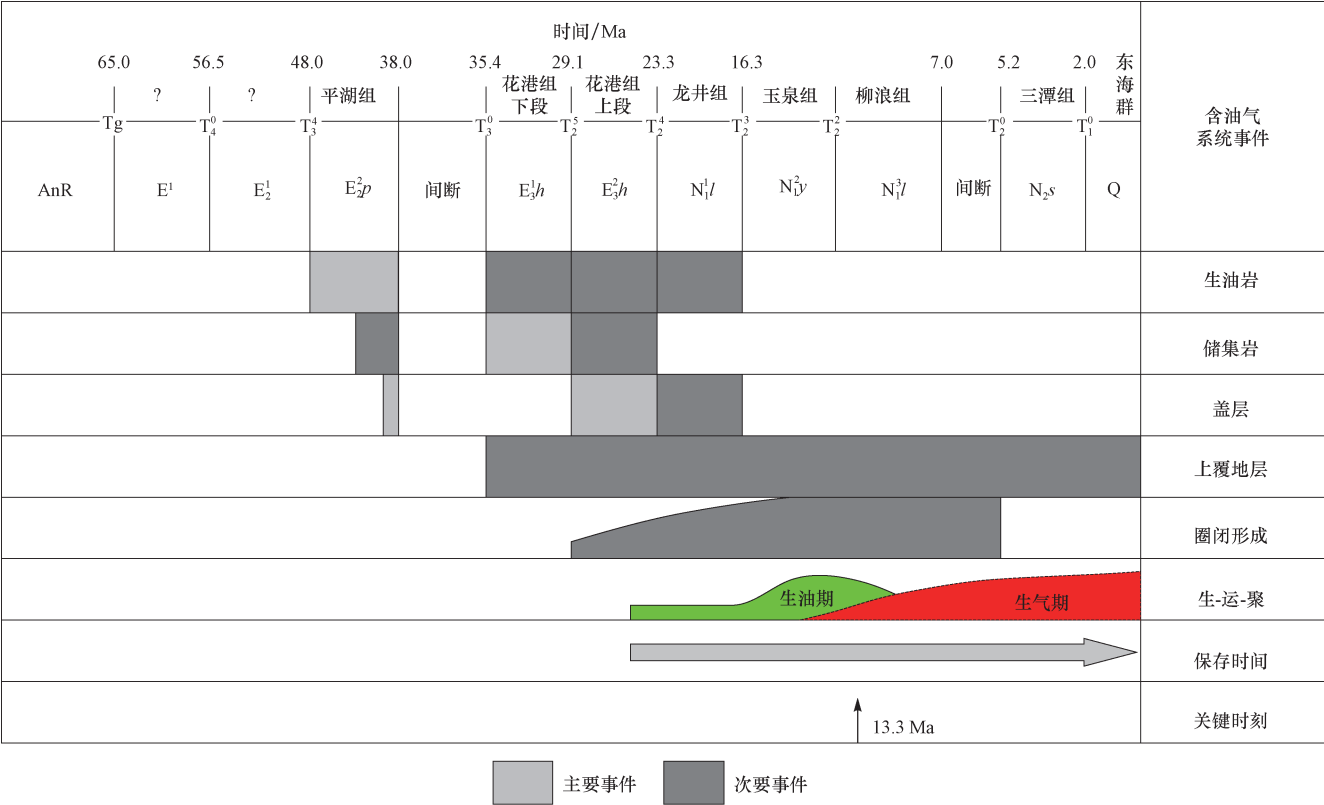


图 5 大春晓油气田群含油气系统事件^[21-22]

Fig. 5 Diagram showing the petroleum system event of the large Chunxiao oil and gas field group^[21-22]

先前所推测前始新统生烃层系目前已在天外天一井、宝石一井等先后钻遇。

前始新统(西湖坳陷深层古新统,确认发育了半深水-深水沉积海相烃源岩)、通过平湖组、花港组及龙井组含油气系统关键时刻研究,认为它们分别构成上、中、下含油气系统及关键时刻(图 5)。

1) 地质要素

有效烃源岩为平湖组为主,包括花港组和龙井组;储层以花港组下段为主,包括平湖组上段,花港组下段,盖层分真假两类盖层及上覆地层。

2) 成藏要素

分为初次运移和二次运移,共同特点是均为短距离(1~8 km 范围内)运移。

3) 初次运移

以水溶相态烃为主,运移动力以压实作用、水热增压作用、粘土矿物脱水作用和烃类生成作用为主,共同产生异常高压,形成初次运移原始动力。主力烃源岩的初始运移期为 39 Ma 前(表 2),另一套烃源岩系为渐新统-中新统,运移时间分别为 25 Ma 和 9 Ma。

4) 二次运移

以溶解相态游离相态烃为主,后者是进入储层之后的运移相态,运移动力以储层中的水压作用、毛细管

表 2 大春晓油气田群油气运移时间推测结果
Table 2 Time estimates for hydrocarbon migration in the large Chunxiao oil and gas field group

地层	初始运移期		主要运移期		
	时间/Ma	相应沉积期	轻质油	湿气	干气
中新统 玉泉龙井组	9	N ₂			
渐新统 花港组	25	N ₁	N ₂		Q
始新统 平湖组	39	E ₃	N ₁	N ₂	
前始新统	55	E ₁₋₂	E ₃	N ₁	N ₂

压力作用、白由浮力作用为主。二次运移时间为主要生气期之后的首次构造运动期,为中-晚中新世,关键时刻为 13.3 Ma。

5) 圈闭形成期

历经玉泉运动(形成锥型),龙井运动(开始定型),形成了上下叠置的复合型断背斜,它们在中新世晚期完成定型。

6) 保存时期

在形成油气田之后历经数个百万年并长期保存至今。存在新生代下古新统自生自储古生新储陆相成烃-成藏动力学系统,特征主要代表了已在 WZ26-1-1 井和 WZ4-1-1 井揭示的月桂峰组和在宝石 1 井揭示的宝石组半深湖相沉积体系,在地震解释中追踪的大春晓油气田群白堤深洼-三潭深洼带的 T₄-T₆ 构

造-沉积层,推测也属于最好生烃源岩,有机质类型较好、丰度高。该套沉积可能具高压高热性能,已证实泥岩具有局部披盖性,封闭性能极好。丽水 36-1-1 井钻探已证实,其生成烃类运移指向遍及大春晓油气田群各大局部构造及东、西斜坡带。

新生代始新统-渐新统自生储盖型成烃-成藏动力学系统是已在大春晓油气田群被十几口钻井所证实的实际存在,包括由含煤层系和滨海湖相沉积体系形成的两套成烃源岩系统。该系统分布于西湖凹陷与大春晓地区,生烃潜力指数好、有机质类型好、丰度高,通过含油气系统埋藏史和关键事件分析,表明成烃-成藏动力学系统事件间匹配关系好。此类中新统成烃-成藏动力学系统可能存在于冲绳海槽盆地、钓鱼岛隆褶带、福州凹陷、西湖凹陷北部(如煤系地层为其烃源层系)和北部断阶带等地区。

3.6 大春晓油气田成藏动力学模式

以过中央背斜带和过春晓一井的二维地震剖面(D465 线)与钻井解释层位及相应参数为基准,提出建立大春晓油气田油气成藏模式和成藏动力学模式(图 6,图 7)。分别命名为中央隆起带背斜高部位-逆断层下盘成藏模式、西部缓坡斜坡带-坡折带成藏模式和大春晓油气田成藏动力学模式。

它们的共同成藏要素特征如下:烃源层系、排烃层系、疏导层系、充注时间、岩相组合与圈闭形成等方面的差异决定了勘探层系、油气藏类型及分布的差异。其中,始新统平湖组-花港组-玉泉-龙井组烃源层系均处于生油窗内,平湖组主力生油层系生排运聚烃

高峰期与大春晓油气田局部构造群圈闭形成时空配置良好;渐新统-中新统烃源层系生排运聚烃高峰期与该局部构造群圈闭形成同期或略晚期匹配。它们的疏导网络体系以短源纵向断裂体系和侧向不整合砂层界面体系为主,成藏动力为超压力与静水浮力,存在压力过渡带、超压带及常压带,油气充满度高或中等,分别以春晓一井、天外天三井、春晓三井、残雪一井为代表,和以平湖一井、宝石一井为代表。

该模式认为,研究区中-下始新统与前始新统(古新统)现已进入干气阶段,钻探试油结果在 2 863.5 ~ 3 280.0 m(压力封闭层及其上下地层之中)发现了 12 层 104.9 m 厚的凝析油气层,测试其中 5 层获得高产工业性凝析油气流。凝析油气极具高温高压低密度性,表明已形成油气藏曾经受到这些凝析油气的抽提作用、溶解作用以及也包括首先发生的充注作用。凝析油气的进入增加了原生油气藏的油气比和成熟度,在圈闭充满后发生过油气的差异聚集作用。由于花港组油气藏是多种烃类混合互溶,会导致油气藏出现多相分异、异相共存的复杂局面;大春晓油气田-苏堤构造带油气藏出现复杂多样油气藏的性质多少与此相关,这些油气田以常压常温油气藏为主,油气藏类型却多样化,有边水气藏、带底油(油环)的边水气藏、块状底水油藏、含气顶底水油藏、底油(油环)凝析气藏等。

上述特征构成大春晓油气田地区现今独特的,以东西两个方向为主的短源烃源岩以纵向为主的多期运移,差异聚集及多层次成藏的模式,并以始新统与前始新统-古新统为主生烃源岩,存在典型超压囊体系,压力封闭层上下地层中聚集凝析油气的成藏模式。

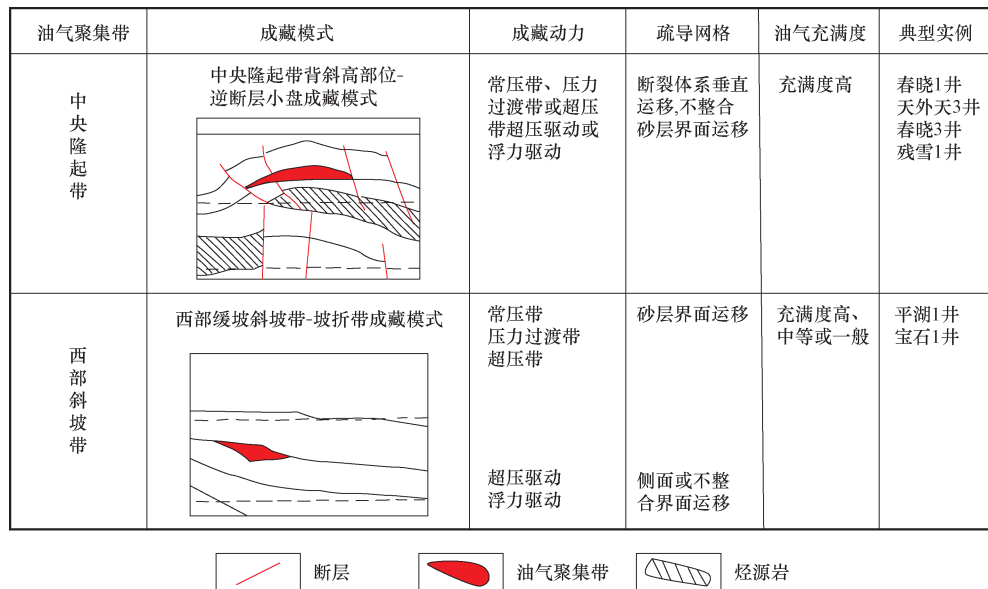


图 6 大春晓地区油气成藏模式

Fig. 6 Hydrocarbon accumulation model in large Chunxiao area

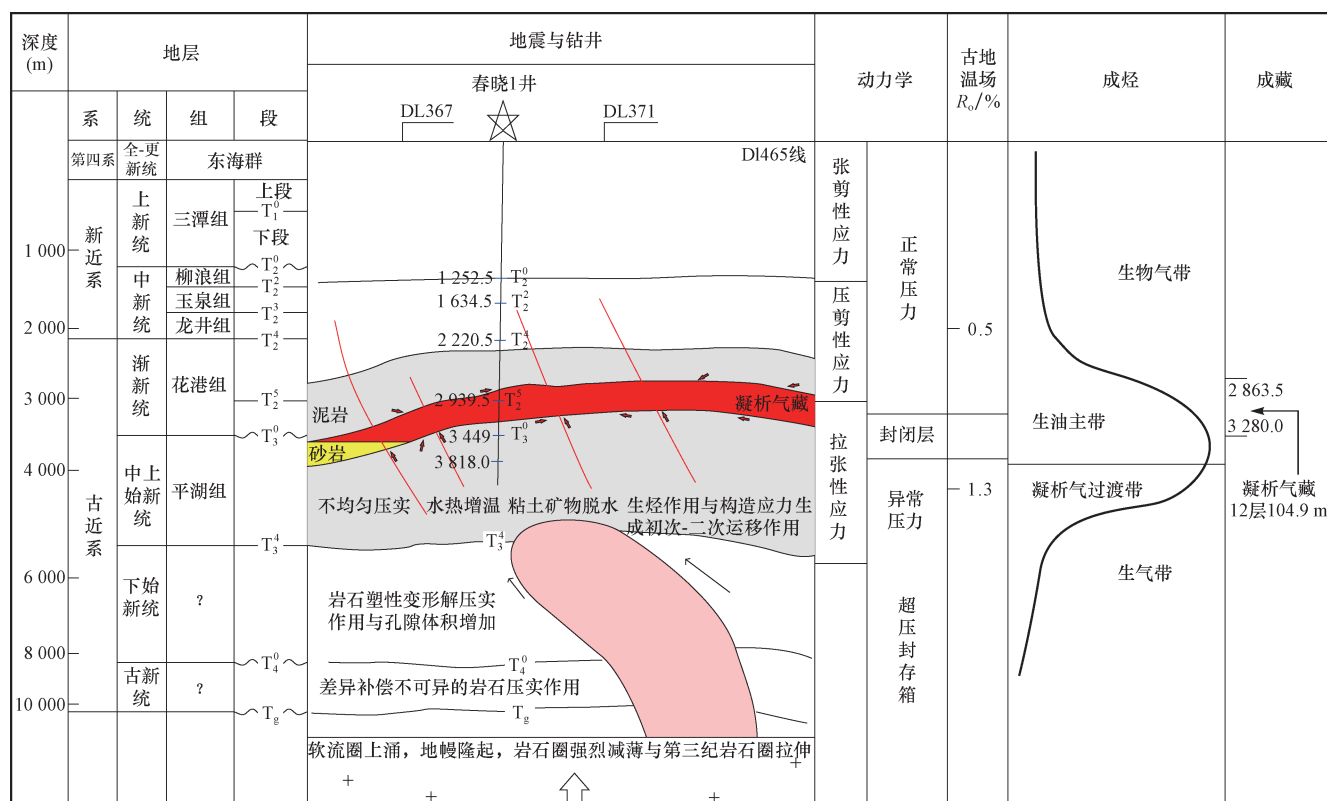


图7 大春晓油气田群成藏动力学模式(据上海海洋石油局D-465测线解释春晓1井反射波组层位)

Fig.7 Dynamic model of hydrocarbon accumulation in the large Chunxiao oil and gas field group(the horizon of reflection wave-group from Well Chunxiao 1 is interpreted according to Line D-465 of the Shanghai Offshore Oil Bureau, Sinopec)

该模式表明,大春晓油气田油气成藏各重要参数之间相互匹配良好,油气成烃条件和成藏条件十分优越,尤其油气田面积较大。因此春晓大油气田是继崖13-1大气田之后,在中国东北部海域发现的又一个大型高产凝析油气田。春晓油气田油气成藏的情况代表了大春晓油气田群乃至西湖凹陷多数油气田成藏基本的事实,邻区及深层将是具有重要勘探发现领域。

4 结论

1) 大春晓油气田成藏动力表现为三大能量场:

① 高地温场。地温梯度高特点,达36~40℃/km;发现60个岩浆侵入岩,导致局部增温作用促进油气成藏;烃源岩热成熟度不一致性明显,早期东北部和东南部成熟度高,天外天,春晓-断桥构造成熟时间最晚,就整体而言,大春晓构造烃源岩晚成熟。② 有利应力场。早、中期为NNE向拉张应力场,产生拉张正断层,有利油气运移、保存;晚期NNW向张剪性应力场,形成平移断层有利于油气保存。③ 典型超压场。发现大型超压囊,形成地形驱动、压实驱动、构造应力驱动和对流驱动等,沉积作用、成岩作用和构造作用主导运移机制,促进油气运移,提出超压-压力囊模式。

2) 大春晓油气田含油气系统成烃-成藏动力学系统存在多种成因机制包括:① 压性逆断层下降盘封闭形成一批高能油气藏动力学机制;② 不同压力系统张性断层输导体系运移成藏动力学机制;③ 各大生烃层系运移动力学超压、短源和纵向运移成藏动力学机制;④ 输导体系依托拉张断层,超压囊压力封闭断面、正常压力系统砂岩和泥岩中断裂输导系统所承载烃类对断面两侧相连砂体等量分配、中新世压性逆断层断层系统成藏动力学机制。进一步基于大春晓油气田动力学成藏含油气系统事件,建立了成藏动力学模式并揭示了油气成藏规律。

致谢:感谢“126专项”经费支持,感谢中国石化上海海洋石油局、中国海洋石油总公司,感谢恩师李思田教授,赵金海总工程师,蔡乾忠教授;以及刘申叔,贾建谊总工程师;龚再升,朱伟林总工程师等在资料过程中的支持与帮助。

参 考 文 献

- [1] 曹冰. 西湖凹陷中央反转构造带花港组致密砂岩储层埋藏史-热史[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(4): 405-414.

Cao Bing. The burial history and thermal history of Huagang Forma-

- tion tight sandstone reservoir in the central structural belt of Xihu Sag [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(4): 405–414.
- [2] 高伟中, 孙鹏. 东海盆地西湖凹陷地应力场与油气运移关系探讨[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(1): 1–6.
Gao Weizhong, Sun Peng. Discussion on the relationship between geostress field and hydrocarbon migration in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(1): 1–6.
- [3] 周海廷, 姜效典. 西湖凹陷平湖斜坡带花港组异常压力预测[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 80–86.
Zhou Haiting, Jiang Xiaodian. Abnormal pressure prediction of Huagang formation in Pinghu slope of Xihu Sag [J]. Periodical of Ocean University of China (Science & Technology Edition), 2017, 47(3): 80–86.
- [4] 苏奥, 杜江民. 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(3): 742–750.
Su Ao, Du Jiangmin. Overpressure system and hydrocarbon accumulation in the Pinghu structural belt of the Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Journal of Central South University (Science & Technology Edition), 2017, 48(3): 742–750.
- [5] 陈智远, 徐志星. 异常高压与油气充注的耦合性——以东海陆架盆地西湖凹陷花港组和平湖组为例[J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 186–194.
Chen Zhiyuan, Xu Zhixing. Coupling of abnormal high pressure and hydrocarbon charging: A case from the Huagang Formation and the Pinghu Formation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology & Experience, 2017, 39(2): 186–194.
- [6] Kingston D R, Dishroon C P, Williams P A. Global basin classification system [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1983, 683(683): 295–301.
- [7] Dickinson W R. Basin geodynamics [J]. Basin Research, 1993, 5(4): 195–196.
- [8] 李思田. 盆地动力学与能源资源——世纪之交的回顾与展望[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 1–9.
Li Sitian. Basin dynamics and energy resources: Retrospect and prospect of the turn of the century [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 1–9.
- [9] 李思田. 沉积盆地动力学研究的进展、发展趋向与面临的挑战[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 1–8.
Li Sitian. Progress, trends, and challenges of sedimentary basin dynamics research [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 1–8.
- [10] 郝芳, 邹华耀, 姜建群, 等. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 11–22.
Hao Fang, Zou Huayao, Jiang Jianqun, et al. Dynamics of hydrocarbon accumulation and its research progress [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 11–22.
- [11] 许红, 赵金海, 蔡乾忠, 等. 东海地球动力学环境与过程的同位素证据及盆地动力学模式[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 229–237.
Xu Hong, Zhao Jinhai, Cai Qianzhong, et al. Isotope evidences of geodynamic environment and processes in the east China Sea and Models of basin dynamics [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 229–237.
- [12] 任建业, 李思田. 西太平洋边缘海盆地的扩张进程和动力学背景[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 203–214.
Ren Jianye, Li Sitian. Spreading and dynamic setting of marginal basins of the western Pacific [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(3): 203–214.
- [13] 刘申叔, 赵金海, 杨兆宇, 等. 东海盆地结构与油气勘探, 张渝昌著, 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京大学出版社, 1997, 378–396.
Liu Shenshu, Zhao Jinhai, Yang Zhaoyu, et al. Structure and oil and gas exploration in the East China Sea Basin [M]. Nanjing University Press, 1997, 378–396.
- [14] 杨传胜, 杨长清, 杨艳秋, 等. 东海陆架盆地中生界残留分布特征及其大地构造意义[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(11): 86–95.
Yang Chuansheng, Yang Changqing, Yang Yanqiu, et al. Residue distribution characteristics and tectonic significance of the Mesozoic in the East China Sea Shelf Basin [J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 47(11): 86–95.
- [15] 杨传胜, 杨长清, 张剑, 等. 东海陆架盆地中生界构造样式及其动力学成因探讨[J]. 海洋通报, 2017, 36(4): 431–439.
Yang Chuansheng, Yang Changqing, Zhang Jian, et al. Mesozoic tectonic styles and their dynamics in the East China Sea Shelf Basin [J]. Marine Bulletin, 2017, 36(4): 431–439.
- [16] 陈琳琳, 向昱. 西湖凹陷油气成藏史分析[J]. 海洋石油, 2009, 29(3): 1–6.
Chen Linlin, Xiang Yu. Play evolution analysis of Xihu Sag [J]. Oceanic Petroleum, 2009, 29(3): 1–6.
- [17] 项圣根. 东海西湖凹陷春晓构造油气储层特征[J]. 海洋石油, 2001, 21(7): 21–25.
Xiang Shenggen. Characteristics of oil and gas reservoirs in the Chunxiao Formation in Xihu Sag, East China Sea [J]. Oceanic Petroleum, 2001, 21(7): 21–25.
- [18] Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. AAPG Bulletin, 1990(74): 1–12.
- [19] 汪蕴璞. 西湖凹陷油气运聚成藏的水文地质论证[J]. 中国海上油气, 1997, 11(5): 305–312.
Wang Yunqi. Hydrogeological verification of hydrocarbon accumulation and accumulation in Xihu sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 1997, 11(5): 305–312.
- [20] 白洁, 胡佳庆, 王建红. 东海西湖凹陷春晓构造各井区含油气性特征[J]. 上海地质, 2002, 83(3): 27–31.
Bai Jie, Hu Jia Qing, Wang Jian Hong. Synthetically analyzing hydrocarbon bearing character of Well-sections in CHX structure of Xihu Trough, the East China Sea [J]. Shanghai Geology, 2002, 83(3): 27–31.
- [21] 王丽顺. 西湖凹陷苏堤构造带含油气条件分析[J]. 中国海上油气, 2000, 14(6): 392–397.
Wang Lishun. Analysis of hydrocarbon conditions in Sudi structural belt of Xihu depression [J]. China Offshore Oil and Gas, 2000, 14(6): 392–397.
- [22] 李纯洁, 李上卿, 许红. 西湖凹陷中一下始新统宝石组油气地质与勘探潜力[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 81–87.
Li Chunjie, Li Shangqing, Xu Hong. Petroleum geology and exploration potential of the Middle-Lower eocene gems formation in Xihu depression [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2004, 24(4): 81–87.