

东海西湖凹陷大中型油气田形成条件及勘探方向

周荔青, 江东辉, 张尚虎, 周兴海, 杨鹏程, 李 昆

(中国石化 上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要:为了解决东海西湖凹陷保俶斜坡带勘探成效差以及中央背斜带勘探效果南北差异大的问题,通过盆地分析理论体系对西湖凹陷石油地质条件进行了系统研究和重新认识,认为保俶斜坡带和中央背斜带由于构造格局及构造演化的差异形成了不同的油气成藏体系,有利成藏要素的叠合区为大中型油气田的发育区。保俶斜坡带以断陷构造层为主,晚期挤压弱,构造定型早,具有“紧邻富生烃洼陷、发育多期叠置的规模储集体、形成多类型构造—岩性复合圈闭、具有良好的垂向封盖条件以及发育网毯式高效输导体系”的有利成藏条件。近生烃洼陷的断层坡折带及地貌坡折带处形成的大型潮控三角洲砂体上倾尖灭带为大中型油气田发育区。中央背斜带经历了拗陷期强烈挤压,形成了大型反转背斜,具有“先存古构造背景、发育大型构造—岩性复合圈闭、断砂配置条件好以及具备高效储盖组合”四元控藏的特征,成藏条件叠合较好的龙井、古珍珠、湖心亭等地区是大中型气田发育区。

关键词:油气富集规律;构造—岩性油气藏;大中型油气田;保俶斜坡带;西湖凹陷;东海

中图分类号: TE155

文献标识码: A

Formation conditions and exploration direction of large and medium oil and gas reservoirs in Xihu Sag, East China Sea

ZHOU Liqing, JIANG Donghui, ZHANG Shanghu, ZHOU Xinghai, YANG Pengcheng, LI Kun

(SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: A low exploration success ratio on the Baochu Slope of Xihu Sag of East China Sea has been inferred, and the ratio in the Central Anticline Belt varies significantly in different sub structures. To solve this issue, the petroleum geologic conditions of the sag were systematically reviewed in light of new basin analysis methodologies, and new understanding have been achieved. Due to the differences in tectonic features and evolution histories, the Baochu Slope and Central Anticline Belt developed different petroleum systems and play types. Only those areas with overlapping favorable fairways of all petroleum system elements promise the formation of large oil and gas fields. The Baochu Slope is featured by tectonic rifting, with weak later compression and early structure formation. Its favorable conditions for hydrocarbon accumulation include: short distance to the main source kitchen; multiple, overlapping, large-scale reservoirs; multiple structural-stratigraphic trap types; good vertical sealing zones; and effective lattice pattern migration pathways. The large to medium structural-stratigraphic fields are concentrated in fairways with a large scale source kitchen and updip pinchout of tide-dominated delta sands controlled by paleo slope break which in turn were induced by either faulting or paleo morphology. The Central Anticline Belt has experienced strong inversion and compression during the late depression stage, and developed inverted compressional slip faults and large scale anticlines. Hydrocarbon accumulation is controlled by four major factors: preexisting structural highs before the compressional event, large scale structural-lithological traps, excellent timing of hydrocarbon charging during deformation, and highly effective reservoir-seal combinations. The areas with good congruence of these controlling factors promise the occurrence of large-scale deposits such Longjing, Guzhenzhu, Huxinting fields.

Key words: hydrocarbon enrichment rule; structural-lithological reservoir; medium and large scale oil and gas fields; Baochu Slope; Xihu Sag; East China Sea

朱夏先生是我国油气盆地研究的奠基人之一,他建立了盆地分析理论体系,创立了著名的“朱夏程式”,为我国石油地质学的发展和油气勘查部署

的科学决策作出了卓越的贡献。朱夏先生也推动了东海油气勘探工作,西湖凹陷的构造名称均由朱夏先生所命名。本文以朱夏先生的油气勘探理论

收稿日期: 2020-06-01; 修订日期: 2020-07-24。

作者简介: 周荔青(1964—),男,博士后,教授级高级工程师,从事油气勘探综合研究工作。E-mail: zhoulq.shhy@ sinopec.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技项目“西湖凹陷斜坡带油气成藏条件及目标评价”(P19027-6)。

为指导^[1-3],全面重新认识东海西湖凹陷油气勘探潜力,籍此缅怀朱夏先生。

西湖凹陷是东海陆架盆地规模最大的含油气凹陷,面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,沉积厚度最大 15 km。它是受太平洋板块俯冲作用影响的弧后拉张裂陷盆地,总体上呈东断西超的箕状结构,由西往东可划分出 5 个构造单元(图 1),即保俶斜坡带、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹和天屏断阶带。垂向构造演化可划分 3 个阶段,古新世—始新世断陷期、渐新世—中新世拗陷期、上新世—第四纪区域沉降期。沉积地层自下而上为古近系宝石组、平湖组、花港组,新近系龙井组、玉泉组、柳浪组、三潭组,第

四系东海群,其中主要含油气层系为始新统平湖组与渐新统花港组(图 1)。

西湖凹陷历经 40 余年勘探,已钻探井 100 余口,证实其勘探潜力大,目前已发现的油气田主要集中在保俶斜坡带和中央背斜带。中生代末,西湖凹陷早期受太平洋板块俯冲作用,开始拉张裂陷,渐新世末太平洋板块俯冲加剧,东部开始反转。保俶斜坡带是持续性的斜坡,以断陷构造层为主,晚期挤压弱,构造定型早;中央背斜带早期断陷,后期反转,形成挤压反转背斜构造,最终形成了保俶斜坡带和中央背斜带构造差异性。由于 2 个带构造演化差异形成 2 种不同类型油气成藏体系,勘探效

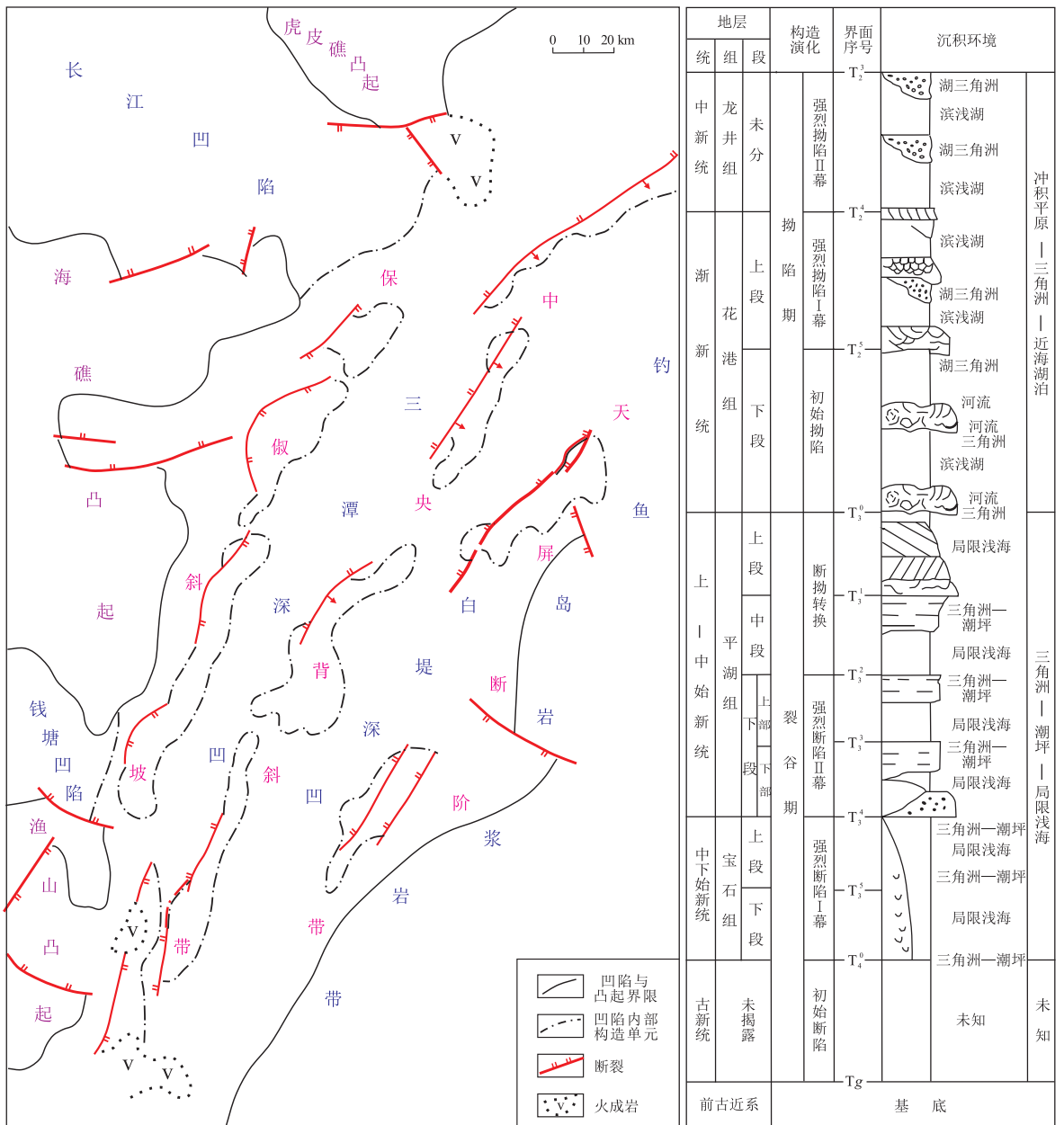


图 1 东海西湖凹陷构造区划

Fig.1 Structural division of Xihu Sag, East China Sea

果差异明显。保俶斜坡带早期以构造勘探评价思路为主,除了已发现的3 000万吨中型油气田(平湖油气田)之外,其他油气田多呈“小、断、贫、散”特征,没有发现明显的规模储量区,整体来说斜坡带的勘探潜力很大,但探明率低,说明传统占构造高点为主的勘探评价思路与斜坡带复杂成藏条件极不适应,严重束缚了保俶斜坡带的勘探潜力。而中央背斜带的问题在于勘探效果差异大,既有大—中型油气田发育,例如“古珍珠”、“花港”等千亿方大气田;也有构造规模大、油气藏规模小、圈闭充满度较低的情况,例如“玉泉构造”。因此,保俶斜坡带“如何转变思路、以新的地质理论为指导,寻找规模储量区”、中央背斜带“如何深化油气成藏地质条件,明确大中型油气田发育区”是我们急需解决的问题。本文以朱夏先生盆地构造分析理论为指导,通过构造演化与沉积演化分析,明确了主要的源汇系统,而构造演化和沉积演化也决定了烃源条件、储盖组合、圈闭类型、输导体系、保存条件等油气成藏条件。朱夏先生的盆地分析理论为源汇系统、超压封存箱等新理论的应用奠定了基础,在这些理论的指导下最终明确了西湖凹陷大中型油气田形成条件以及下一步的勘探方向。

1 保俶斜坡带大中型油气田形成条件

保俶斜坡带为发育于基底古隆起之上的继承性的东倾大型斜坡,受基底构造形态影响,断陷期发育NE和NNE向雁行排列的顺向及反向正断层,缺少背斜构造,多以断鼻、断块圈闭为主。勘探实践明确了大型生烃洼陷向斜坡抬起的断层坡折带及地貌坡折带处形成的大型潮控三角洲砂体上倾尖灭带为大中型油气田发育区。具有“紧邻富生烃洼陷、发育多期叠置的规模储集体、形成多类型构造—岩性复合圈闭、具有良好的垂向封堵条件以及发育网毯式高效输导体系”的有利成藏条件。

1.1 紧邻富生烃洼陷、发育煤系优质烃源岩

1.1.1 三潭深凹和本地次洼多源供烃,烃源岩厚度大

保俶斜坡带紧邻三潭深凹富生烃洼陷,且斜坡带自北向南发育过溪次洼、武云次洼等一系列次洼,具有三潭深凹和本地次洼多源供烃的特点。前人研究证实西湖凹陷的主力烃源岩层为始新统平湖组和宝石组的煤系地层,岩性包括暗色泥岩、碳质泥岩和煤^[4]。其中,煤和碳质泥岩主要分布在潮间带沼泽化潟湖,斜坡的中低带为煤层集中发育区,自北向南发育多个聚煤中心;暗色泥岩主要分布在潮下带及局限海的沉积环境,自斜坡向三潭深凹增厚。

三潭深凹内烃源岩整体厚度较大,宝石组、平湖组烃源岩厚度分别可达1 400 m和1 200 m;斜坡带次洼内烃源岩的厚度也有明显增大,如北部过溪次洼的宝石组、平湖组暗色泥岩厚度分别可达600 m和400 m,煤和碳质泥岩累计厚度可达30~50 m。

1.1.2 平湖组、宝石组发育煤系优质烃源岩

斜坡带烃源岩有机质丰度较高,煤和碳质泥岩为该区的优质烃源岩。平湖组煤的氢指数多大于200 mg/g,生烃潜力(S_1+S_2)多大于150 mg/g;碳质泥岩氢指数多大于150 mg/g,生烃潜力多大于50 mg/g。从有机质类型来讲,煤和碳质泥岩主要为Ⅱ₂-Ⅲ型,由于富含树脂体和富氢镜质体,煤岩的生油潜力同样较大^[5],整体具有油气共生的特点。暗色泥岩同样也是重要的烃源岩类型,TOC多大于1%, S_1+S_2 多大于2 mg/g,达到中等—好的泥质烃源岩标准,加之暗色泥岩累计厚度较大,生烃潜力同样较高。从烃源岩热演化程度来看,三潭深凹宝石组、平湖组烃源岩现今已经达到过成熟阶段($R_o>2%$),生气为主;斜坡带次洼内烃源岩达到成熟—高成熟阶段($1.0%<R_o<1.5%$),油气共生。因此,斜坡带本地的煤系烃源岩生烃潜力大。

1.1.3 斜坡带油气为三潭深凹和生烃次洼的混源

油气来源分析证实了斜坡带的油气为三潭深凹和本地生烃次洼的混源^[6-7]。具体来讲,斜坡带天然气主要为高成熟混合成因气,天然气成熟度普遍高于本地烃源岩热演化程度,根据碳同位素计算的天然气成熟度 R_c 在1.3%~1.7%,不同构造均有不同程度的高热外源气的贡献。从原油性质来讲,斜坡带原油均为成熟原油,根据甲基菲计算的原油成熟度 R_o 为0.9%~1.0%,与本地烃源岩的热演化程度相当,推测主要以近源供烃为主。根据原油较高的Pr/Ph、较高的 C_{29} 规则甾烷含量以及富含二萜类生物标志物的发育特征,推测原油主要来自煤和碳质泥岩^[8]。

1.2 大型“源—汇系统”和多期叠置的规模储集体

1.2.1 西侧海礁凸起及渔山低凸起持续提供物源

保俶斜坡带西接海礁凸起及渔山低凸起,西高东低,凸起长期遭受剥蚀,形成大型稳定物源区。两凸起基底为元古代变质岩叠加白垩纪岩石,变质岩与岩浆岩交替出现,钻井锆石定年显示斜坡南、北段母岩以岩浆岩为主,中段为岩浆岩—变质岩混合区。同时,由西向东陆源重矿物ZTR指数及岩石成分、结构成熟度的升高均指示了西部物源的持续大量供给。

1.2.2 沟谷及转换断层形成大型沉积物运输通道

斜坡带发育沟谷及转换断层带2类搬运体系。

(1) 沟谷搬运体系。从沟谷形态上可以划分为V型、W型及U型。U型及V型沟谷见于斜坡中—北段,输砂能力强,单个沟谷宽度最大可达10 km,下切深度200 ms。南段发育W型沟谷,单个沟谷宽度1~5 km,下切深度60~80 ms。

(2) 断层转换带输砂体系。断陷期,大断层可形成断槽及转换带2种物源通道。断槽物源通道平面延伸长度超过20 km,断距近千米,可形成大型沉积物搬运体系。

1.2.3 湖坪—三角洲沉积体系形成规模储集体

始新世,西湖凹陷“三面环山”,南部与广海相通,形成半封闭海湾沉积环境^[9]。沉积物受到潮汐作用改造发育湖坪—三角洲沉积体系。斜坡带自南向北形成了平南、团结亭、武云亭、孔雀亭、孔北及迎翠轩六大规模储集体发育区。

早始新世,断陷作用强烈,呈“隆洼相间”的地貌格局,控沉积作用强^[10],古地貌低势区及大型断裂坡折带之下可容空间大,发育规模储集体。例如武宝大断裂下降盘的武云亭2井在平湖组下段钻遇单层厚度超30 m,累计厚度近百米的砂岩。

中—晚始新世,断陷作用减弱,斜坡宽缓,水退背景下,进积型三角洲特征明显。发育由西向东延伸的三角洲前缘水下分支河道、河口坝等多类型砂体。垂向上砂体层数多,单层厚度多大于20 m,砂岩百分含量在40%左右。

平面上六大“源—汇”系统相互连片,纵向上多期砂体相互叠置形成规模储量发育区。同时,平下段沉积物受到潮汐水流改造作用,砂体的结构成熟度有所增高,储层物性较好,在4300 m以下仍可以达到10%以上的孔隙度及 $1.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上的渗透率,测试获得高产。

1.3 发育多类型构造—岩性复合圈闭

古构造背景及构造、沉积体系的演化直接控制构造—岩性复合圈闭的发育,形成叠合连片的规模储量区^[11]。

1.3.1 古地貌控制沉积体系类型,决定砂体发育规模

在始新世断陷—断拗转换的构造背景下,构造控沉积作用减弱,沉积相类型由大—中型潮控三角洲沉积体系逐渐演变为大型河控三角洲沉积体系,砂体连续性增强。

1.3.2 层序及体系域类型控制砂体富集的层段^[12]

始新世西湖凹陷经历了海进—海退过程,发育低位—海侵—高位体系域^[13]。整体呈“泥包砂”的特征,砂体多发育于低位及高位体系域,砂岩百分含量在30%~50%之间,有利于构造—岩性复合圈

闭发育。

1.3.3 同沉积断裂坡折带控制砂体的富集

斜坡带发育4种断裂坡折带。①平湖—团结亭地区:单条顺向大断层控制单断坡折带,大断裂下降盘为沉积物主要卸载区;②宝云亭地区:由多条正、反断层组成的垒堑坡折带,砂体主要发育于地势低洼区;③武云亭地区:反向断槽型坡折带,砂体沿大断裂展布,向翘倾端尖灭;④平南、孔雀亭及孔北地区:多个顺向断阶坡折带,断层下降盘砂体富集。

1.3.4 沉积相类型控制有利砂体的类型

钻井证实三角洲前缘水下分流河道、潮道及潮间带的砂坪单层厚度大,成熟度高,物性好,在4000 m以下多为Ⅱ类储层。

1.3.5 多类型复合圈闭平面连片、纵向叠置,形成规模储量发育区

斜坡带发育地层超覆尖灭、三角洲前缘水道砂岩侧向尖灭、砂岩上倾尖灭及孤立砂体周缘尖灭4种砂体尖灭类型。

砂岩尖灭与构造配合形成7种类型的构造—岩性复合圈闭。①主断裂上升盘古冲沟内地层超覆圈闭(图2a);②主断裂下降盘砂岩上倾尖灭—断层侧翼封堵圈闭,多见于平湖—团结亭地区平下段(图2b);③反向断层下降盘断槽—岩性圈闭,靠水道砂岩上倾尖灭和断层共同封堵,发育于武云亭地区平下段(图2c);④反向断层上升盘断层—尖灭圈闭,断层上倾封堵,侧翼砂岩尖灭,见于古隆鼻之上平湖组(图2d);⑤地层上超—断层圈闭,宝石组下段砂岩上超,两侧断层封堵(图2e);⑥潮汐沙坝岩性圈闭,斜坡外带平湖组孤立沙坝形成的砂岩透镜体(图2f);⑦基岩封堵圈闭,斜坡高带,平下段及宝石组砂体上倾方向与对盘基岩对接形成整体封堵,侧翼砂岩尖灭(图2g)。

不同类型、不同层系的复合圈闭形成了平面连片、垂向叠置的圈闭群,是千吨级规模储量发育区。这已被武云亭地区复合油气藏勘探突破证实。

1.4 区域封盖层与超压配合形成整体封堵

1.4.1 平湖组最大海泛面附近区域盖层稳定分布

从构造及沉积演化背景来看,宝石组到平湖组沉积时期处于盆地断陷期,经历了从海进到海退的完整海平面变化过程,在平下段沉积晚期海侵达到最大,从而沉积了厚度大、分布广的泥岩地层,形成了该区平湖组最重要的区域盖层。斜坡带钻井统计显示,平下段区域盖层厚250~500 m,盖地比达80%以上。该区域盖层在整个斜坡带都有分布,对其下伏地层中的油气形成了纵向上的整体封堵。

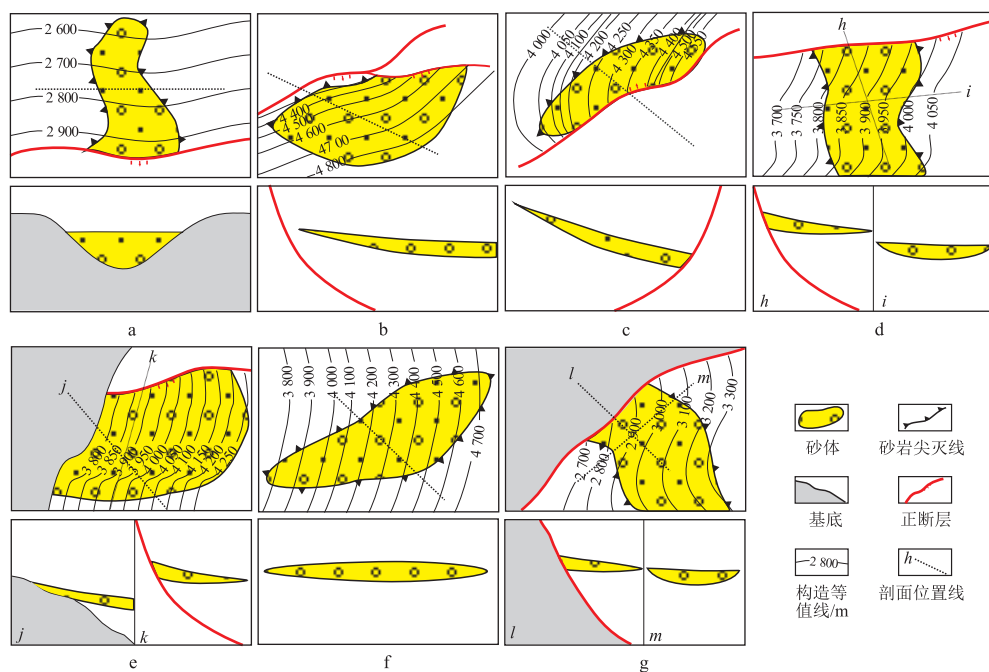


图 2 东海西湖凹陷保俶斜坡带构造—岩性复合圈闭发育模式

Fig.2 Development model of structural-lithological traps in Baochu Slope, Xihu Sag, East China Sea

1.4.2 斜坡带发育良好的超压流体封存条件

平湖组地层具有异常高压发育的地质背景,具有沉积厚度大、泥地比高、沉积速率快以及区域盖层发育的特点,且平湖组为良好的烃源岩层,具备了欠压实增压和生烃增压发育的地质条件。对于斜坡带超压的成因,研究认为主要为欠压实作用和生烃增压共同作用的结果^[14]。

异常高压在斜坡带平湖组中普遍存在,虽然不同构造超压出现的顶界面深度略有不同,但多位于平下段区域盖层内。从压力系数来看,南部平湖、团结亭压力系数较高,最高达 1.8,为强超压;平北地区压力系数则多小于 1.5,为超压或弱超压,压力系数随深度增加有增大的趋势;但武云亭地区纵向上具有明显的异常压力封存箱发育,在封存箱之下出现压力反转,重新变为常压。超压带及超压封存箱的存在形成了纵向的渗流屏障,对之下的油气层产生了有效封盖。

1.4.3 区域盖层和超压封存配合,利于油气规模富集

斜坡带勘探实践证实了在区域盖层之下的超压封存箱内往往有规模的油气富集。以平北、武云亭地区为例,区域盖层之下发育砂岩上倾尖灭型油气藏,油气藏厚度较大,中块武云亭 A 井钻遇的 P11、P12 凝析气层累计厚度达 70 m,且均位于超压封存箱内;而武南地区的钻井证实了与武云亭中块为同一个气藏,实现了武云亭地区该类型油气藏的叠合连片,是武云亭地区最具储量规模的油气藏类型。

1.5 高效输导体系

1.5.1 斜坡带低部位普遍发育大型导油断裂

斜坡带低部位普遍发育大型导油断裂,为“深气浅找”提供了保障。西湖凹陷断拗转换时期相对较早,斜坡带大多数沟源断裂向上仅断至花港组下段,这导致在油气主成藏期(中新世—现今)^[15]多数沟源断裂是不活动的,油气垂向运移不活跃,而活动时间长的大型导油断裂能将三潭深凹深层生成的油气在成藏期有效地导入中浅层,成为斜坡带油气富集的重要保障。

斜坡带不同构造均有大型导油断裂发育,在平面上均位于高成熟烃源岩发育区,延伸长度在 5~20 km,纵向上多断至中新统,断距下大上小,最大在 1 000 m 以上,断层活动时间与油气成藏期匹配较好,是三潭深凹深层油气垂向运移的主要通道。

1.5.2 断—砂配置形成高效输导体系

输导体系是连接烃源岩和储层的重要桥梁,深层油气由大型导油断裂导入中浅层之后还需要配合连续性砂体才能继续侧向运移。研究区平湖组中上段以三角洲—潮控三角洲沉积环境为主,广泛发育的水下分流河道砂体构成了油气侧向运移的输导格架;平下段以潮坪环境为主,发育潮汐砂体,构成平下段侧向运移的主要通道。斜坡带自北向南发育不同的断裂—砂体匹配样式,比如孔雀亭地区为顺向断层—断坡砂体组成的缓坡阶梯状运移格架,油气从低部位向高部位可跨层运移;武云

亭和宝云亭地区为反向断层—断坡砂/断槽砂的输导样式,平中上段的断坡砂体匹配较小的断距可以向斜坡高部位长距离侧向运移,平下段的断槽砂体主要沿着断槽方向构成优势运移通道;团结亭地区发育陡坡大断裂—断坡砂体的输导样式,油气以大断裂垂向运移为主,断坡砂侧向运移为辅。叠合连片的砂体与断层组成的网毯式高效输导体系,为斜坡带油气规模富集奠定了基础。

综上所述,斜坡中内带断层坡折带及地貌坡折带处形成的大型潮控三角洲砂体整体上倾尖灭带为大中型油气田发育区。该带靠近生烃洼陷,发育多期叠置的构造—岩性复合圈闭,断陷期发育的正断层配合砂体形成高效网毯式输导体系及海泛期形成的区域性盖层构成了优越的成藏组合。目前“下洼勘探”思路在武云亭、团结亭地区已经得到证实,初步形成了2个近5000万吨的规模储量区。

2 中央背斜反转带油气田形成条件

中央背斜带的勘探受经济门槛的限制,勘探目标为深度4500m以上中深层的次生油气藏,目前已经发现了龙井、花港、古珍珠、玉泉、湖心亭、天外天等一批油气田和含油气构造,这些构造的规模都很大,但勘探效果差异明显。研究认为中央背斜带为“古构造背景、大型复合圈闭、断砂配置关系及高效储盖组合四元控藏”,大中型气田主要发育在4个有利成藏条件叠合的部位。

2.1 花港组次生油气藏的分布与富集

2.1.1 发育3大类圈闭

中央背斜带目前发现的多为构造圈闭,包括背斜及断背斜圈闭,如古珍珠、春晓。其次为断鼻、断块圈闭,例如天外天、残雪。同时,还存在构造—岩性复合圈闭,如天外天H5、H6为受背斜回倾和岩性尖灭共同控制的背斜—岩性圈闭。

2.1.2 圈闭形成经历3个时期

中央背斜带各局部圈闭形成于始新世前,背斜构造定型于中新世末期龙井运动,改造于上新世冲绳运动^[16-17]。具有3个形成期:(1)第一期为早期圈闭——断块或古隆起背景。形成于始新统前,南部构造运动较强烈,发育断块及古潜山,如春晓和天外天;北部构造活动弱,发育于基底古隆起,如古珍珠、花港。(2)第二期为构造定型期——背斜圈闭。形成于中新世末期的龙井运动,是挤压背斜构造的最终定型期,主要发育与挤压应力场有关的挤压背斜、半背斜圈闭。(3)第三期为改造期——局部断鼻圈闭。形成于上新世冲绳运动,分割和破坏

第二期圈闭的整体性,改造成为规模较小的局部圈闭,形成现今的断背斜、断鼻和断块构造。

2.1.3 古构造背景控制次生油气藏的分布与富集

研究显示,中央背斜带古构造背景决定了花港组次生油气藏分布与富集,不同的古构造背景形成多种类型的原生油气藏。由于早期古隆起及古断垒的存在,古构造成为了油气长期运聚的指向区,在渐新世时期,平湖组形成了自生自储的原生构造—岩性油气藏,中中新世的龙井运动之后,花港组挤压圈闭最终定型,原生气藏在油源断裂的沟通下向花港组调整运移,提供了充足的油源;而古向斜背景难以形成早期油气聚集,进而影响了晚期挤压背斜的油气富集程度。

背斜带中北部四面临洼型古隆起之上继承性发育的大型背斜及断背斜圈闭是千亿方级大气田发育区,如古珍珠构造,气柱高度大,可超过200m,圈闭充满度最高100%;南部三面临洼,西侧与保俶斜坡相接的断块型潜山古构造其上主要发育断鼻、断块圈闭,气柱高度可超过百米,圈闭充满度多大于50%,如春晓及天外天气田,是千万吨级大—中型油气田发育区。古构造背景弱,后期挤压反转形成的背斜圈闭,如玉泉构造,气柱高度及圈闭充满度相对较差,但仍可以形成中等规模的油气田。

2.2 大型长轴沉积体系与背斜配合形成构造—岩性复合圈闭

2.2.1 渐新统平缓古地貌有利于大型沉积体发育

晚始新世末,伴随张性应力场转变为挤压应力场,盆地由断陷作用转入拗陷作用^[18]。凹陷总体呈南浅、北深,西缓东陡的地貌格局,内部地形较平缓。此时,背斜带沿北东向呈带状展布,为沉降中心,平缓的古地貌为大型辫状河沉积体系的发育提供了有利条件。

2.2.2 发育北西向主物源与东、西方向次级物源

凹陷西侧海礁凸起基底为中生界火山岩,西北部虎皮礁凸起基底为片岩及片麻岩,推测钓鱼岛隆褶带为晚古生代—中生代地层。背斜带钻井锆石定年为前寒武纪、古生代及中生代。重矿物ZTR指数由北向南升高,凹陷中央略高于东、西两侧。古水流方向主体呈由北向南,其次近似于由西向东,均说明渐新世存在北西向主物源与东、西向2个次级物源^[19]。其中北西向长轴物源占绝对优势,可以推进到斜坡带中南部堆积。

2.2.3 大型辫状河三角洲沉积体系形成规模储集体

渐新世,西湖凹陷整体处于水进旋回,发育2个完整的三级层序及大型辫状河—辫状河三角

洲沉积体系^[20]。

花下段低位期,湖盆面积相对较小,主要发育辫状河道沉积,河道宽度大,延伸距离长,可以推进至凹陷中部沉积,南部发育连片展布的三角洲朵叶体。水进及高位期,河道长度萎缩,宽度变窄。

花上段低位期,沉积中心向北迁移,北西向长轴物源依然处于主导地位,河道系统规模大,形成了北部大型汇砂区,钻井揭示砂体单层厚度多大于100 m。东、西两侧物源增强,在中部交汇,形成中部汇砂区。高位体系域,湖盆面积扩张,水体加深,在花港组顶部发育厚层区域性泥岩盖层。纵向上形成有利的储盖组合配置。

2.2.4 构造—岩性复合圈闭发育模式

近NS向展布的辫状河道及三角洲水下分流河道,与背斜带及局部构造走向一致,形成构造背景下河道砂岩侧翼尖灭的背斜—岩性复合圈闭。这已在湖心亭地区得到证实,且平面上单期河道数量多,垂向上多期河道相互叠置,形成规模储量区。

2.3 油源断裂晚期重新活化、断砂配置关系有利

2.3.1 油源断裂晚期重新活化,利于油气垂向运移

西湖凹陷中央背斜带经历了早期裂陷和晚期挤压的构造作用,先存的张性断裂后期受到挤压逆冲反转,形成了挤压构造与拉伸构造在垂向上叠加的复合构造,最终形成了现今规模宏大的反转构造。在构造演化过程中,断陷期形成的部分早期断裂在拗陷期之后就停止活动了,而在中央背斜带大规模反转过程中,区域挤压应力使早期张性正断裂重新活化,从而有利于平湖组、宝石组生成的高成熟天然气沿着断裂垂向运移至花港组,大大增加了花港组油气的富集程度。

另外,在中央背斜带反转定型过程中,早期形成的正断层在拗陷期挤压作用下往往反转形成逆断层,主要形成2种类型:第一种是沿着正断层原来的断面之间逆冲形成逆断层,以古珍珠构造、残雪构造为代表;还有一种为沿着与原来断面相反方向形成“弓”字型断层,以玉泉构造、花港构造为代表。除了逆断层外,油源断裂也广泛发育,主要发育在背斜带顶端,是在反转构造形成过程中,背斜顶部张性环境下形成的,主要断开花港组、龙井组,其作为油源通道主要是沟通了花下段的烃源岩。这些不同类型的断裂组合沟通了平湖组烃源与花港组的储层,且与油气大规模运聚时期相匹配^[21],构成了中央背斜带高效的油气垂向运移通道。

2.3.2 断砂配置是花港组次生油气藏富集的保障

首先油源断裂的发育程度决定油气垂向运移

的效率,比较而言,玉泉构造南部花上段油源断裂发育程度明显较低,而古珍珠构造、花港构造的油源断裂广泛发育,油气垂向运移条件好,这也是古珍珠构造、花港构造花上段油气富集程度高的原因之一。其次,油源断层与砂体的配置关系决定花港组次生油气藏的富集,两者主要有3种配置关系,砂体位于油源断层面上倾方向且与砂体充分接触的为Ⅰ类,砂体与油源断层不接触或者砂体位于油源断裂下倾方向的为Ⅱ类。勘探实践证实,Ⅰ类断砂配置关系往往形成规模的油气富集。

2.4 发育高效储盖组合,形成油气规模聚集区

中央背斜反转带花港组上段发育高效储盖组合,该套组合以H1、H2的辫状河三角洲前缘的泥岩地层为区域盖层,以H3辫状河三角洲平原规模河道砂体为储层。H1、H2沉积时期湖盆范围扩大,物源供应有所减弱,为辫状河三角洲前缘沉积,岩性以暗色泥岩为主,砂地比多小于35%,盖层在平面上分布稳定,厚度在400~500 m。H3层由于沉积时物源供应充足、沉积速率较快、物源供给持续时间长,导致砂岩厚度大,粒度粗,单层砂体为下粗上细的正韵律。该层储层受“先存高孔、高压保护、差异成岩”的综合控制作用^[22],多发育甜点储层。H3层在中央背斜带不同构造均见到良好的油气显示,是形成大中型气田的有利层系,在古珍珠构造、花港构造的H3层均见到厚度超百米的气层。

对于残雪北构造而言,除了花上段储盖组合发育之外,还发育花下段储盖组合,并且油气多聚集在花下段储盖组合之中,花上段油气富集程度低。花下段储盖组合以H4层的三角洲前缘泥岩地层为盖层,以H5三角洲平原厚层河道砂岩为储层。H4层盖层厚度在150~200 m之间,平面分布稳定,而花下段H5层厚层砂岩在30 m左右,储盖组合匹配较好。由于残雪北构造早期断层的断距在花下段上部仅10~20 m,断层与盖层匹配下的断接厚度^[23]较大,使得油气难以穿过该区域盖层,油气主要聚集在H4层之下,不利于花上段储层组合的油气富集,这是残雪北地区H3层油气富集程度低的主要原因。

在高效储盖组合和油源断裂的有效配置下,中央背斜带不同构造形成了不同的规模聚集区。中央背斜带中北部古珍珠、花港等构造在花上段储盖组合形成规模聚集,而中央背斜带南部残雪北等构造主要在花下段储盖组合中形成规模聚集。

中央背斜带4个有利成藏要素叠合的一类构造,包括龙井、花港、古珍珠、湖心亭等,可以形成千

亿方级大气田;二类构造,包括天外天、春晓、残雪、断桥、残北等,可以形成百亿方级中—大型气田;三类构造为玉泉构造,北部仍为有利区,可以形成中等规模的气田。

3 勘探潜力与方向

3.1 保俶斜坡带大型坡折带处形成的砂体上倾尖灭带为大中型油气田发育区

保俶斜坡带以断陷构造层为主,晚期挤压弱,构造定型早,具有“紧邻富生烃洼陷、发育多期叠置的规模储集体、形成多类型构造—岩性复合圈闭、具有良好的垂向封堵条件以及发育网毯式高效输导体系”的有利成藏条件。大型生烃洼陷向斜坡抬起的断层坡折带及地貌坡折带处形成的大型潮控三角洲砂体上倾尖灭带为斜坡带大中型油气田发育区。在新的地质理论指导下,平湖构造带深层构造—岩性复合油气藏勘探取得了重要突破。在反向断槽区深层探明了一个中型常规构造—岩性复合油气藏群(图 3)。以 WYT-A 井为例,该井在 4 600 m 埋深单层测试自然产能达到日产油当量超千立方米,刷新了西湖凹陷相同埋深测试产能记录。武云亭区深层常规构造—岩性复合油气藏勘探的成功实践,证实了富氢煤系烃源、控砂模式、成圈机制、优质储层发育等多项创新地质认识,展现了斜坡带下组合平湖组以复合圈闭为主要对象

的“二次勘探”巨大前景,开启了西湖凹陷斜坡带勘探的新里程。2020 年又在团结亭地区顺向大断裂下降盘初步探明一个中型油气田,揭示了一个以平下段和宝石组为主要目的层的大型断层坡折带控制的构造—岩性复合油气田。

在岩性勘探新思路指导下,保俶斜坡带勘探全面转入构造—岩性复合目标搜索评价阶段,搜索并刻画了一大批集群式勘探目标,填补了平湖斜坡带已建成油气田之间的勘探空白。例如孔雀亭—孔北和团结亭—绍兴 36-5 地区大断层和挠曲坡折控制的平下段复合圈闭群,都是下一步钻探目标。

前期的勘探成功,为斜坡南部及斜坡北部等低勘探区带来了新的希望。斜坡南部平南地区构造转换带大型挠曲坡折背景下始新统低位扇群及渐新统河流水系复合岩圈闭群,斜坡北部迎翠轩地区大断裂下降盘始新统低位扇群等潜力区带初现曙光,根据岩性勘探新思路,初步估算西湖凹陷保俶斜坡带具有 4 亿吨油当量的勘探潜力。

3.2 中央背斜带古构造、圈闭、断裂、储盖组合四要素叠合区为大中型油气田发育区

中央背斜带经历了拗陷期强烈挤压反转,形成了压扭反转断层和大型反转背斜,具有“先存古构造背景、发育大型构造—岩性复合圈闭、断砂配置关系好以及具备高效储盖组合”四元控藏的特征,大中型气田主要发育在 4 个有利成藏条件叠合的

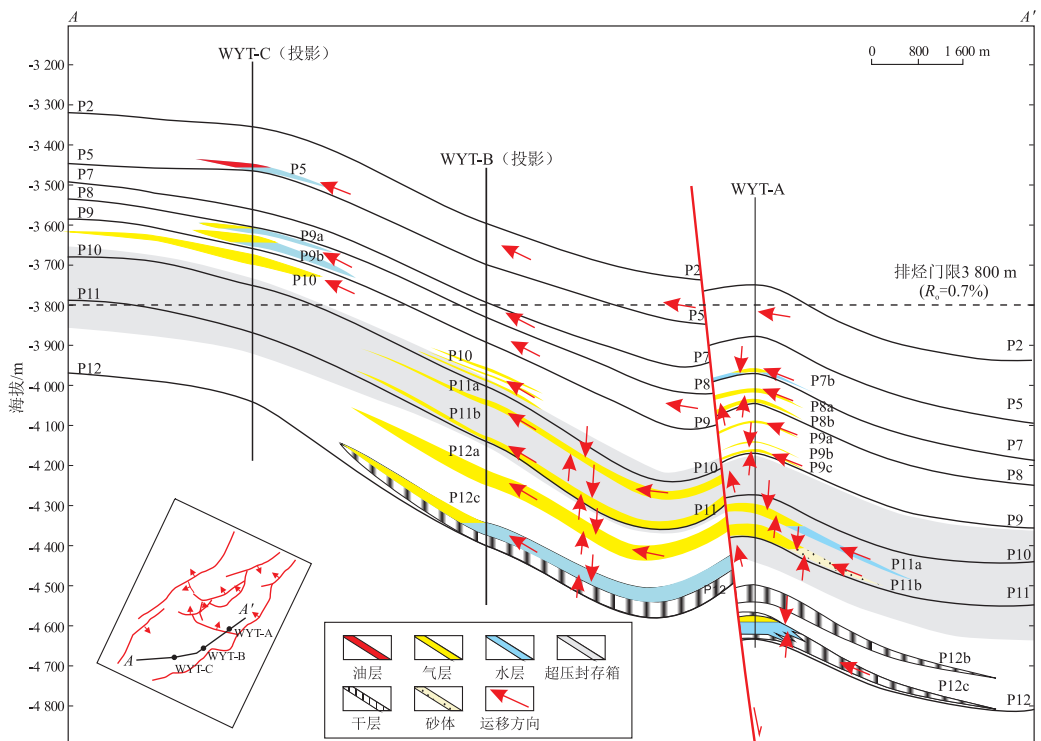


图 3 东海西湖凹陷武云亭构造—岩性复合油气藏成藏模式

Fig.3 Accumulation model of Wuyunting structural-lithological reservoir in Xihu Sag, East China Sea

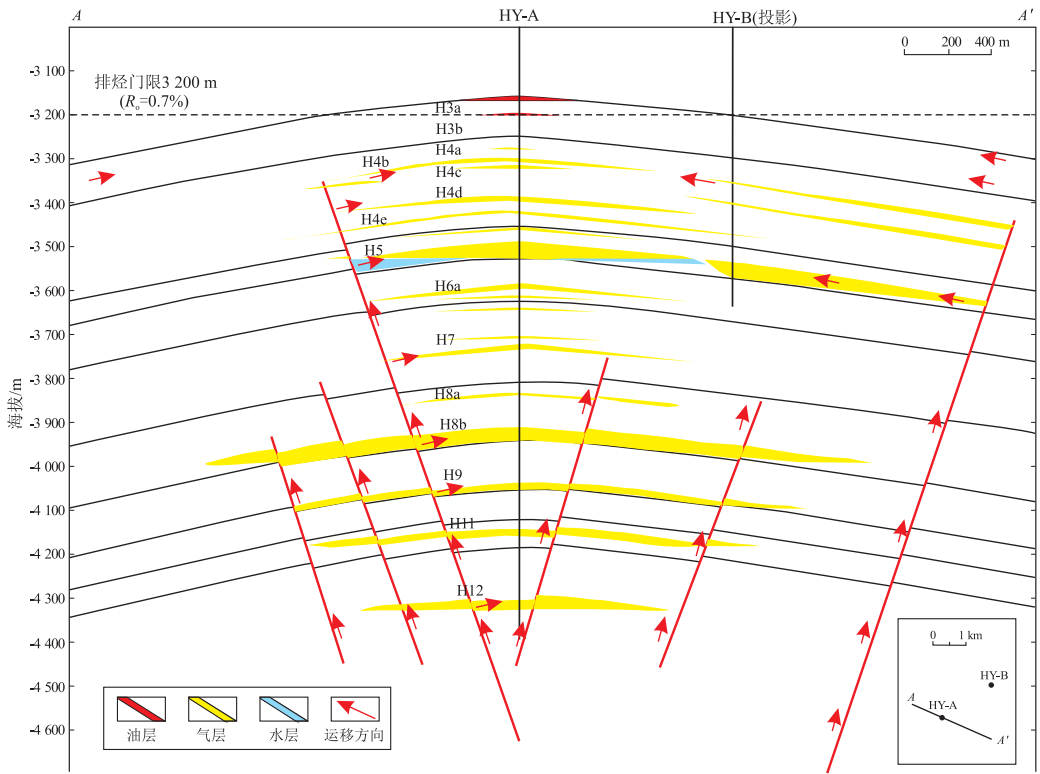


图4 东海西湖凹陷湖心亭构造—岩性复合油气藏成藏模式

Fig.4 Accumulation model of Huxinting structural-lithological reservoir in Xihu Sag, East China Sea

部位。在新的油气富集规律指导下,重新对中央背斜带已生产油气田和含油气构造进行“二次勘探”,取得了重大突破。认为在中央背斜带中北部还有与花港、古珍珠等千亿方级气田成藏条件相似的龙井构造,而在中南部以中上组合为主要目的层部署的一批开发调整井,均获得了高产油气发现,为老区挖潜增产开辟了新领域。尤其是湖心亭油气田花港组及以上的浅层系成功突破,坚定了深气浅找的信心。下一步应以构造背景—断层—储盖耦合关系为关键要素,结合花港组及以上砂体发育特征,在背斜构造侧翼,落实与通源断裂伴生的上层系构造圈闭及构造—岩性复合圈闭目标(图4)。

以中央背斜带4个有利成藏要素叠合为依据,可以优选出下步勘探一类目标有龙井、湖心亭、秋月等,可以形成千亿方级大气田;二类目标有天外天、春晓、残雪、断桥等,可以形成百亿方级中型气田;三类目标为玉泉构造北部。初步估算西湖凹陷中央背斜带还具有3万亿方气当量的勘探潜力。

参考文献:

[1] 朱夏.朱夏论中国含油气盆地构造[M].北京:石油工业出版社,1986.
ZHU Xia.ZHU Xia's discussion on China's petroleum basin[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1986.

[2] 朱夏.中国东部板块内部盆地形成机制的初步探讨[J].石油实验地质,1979,1(1):1-9.
ZHU Xia.A preliminary study on the formation mechanism of basins within the eastern plate of China[J].Petroleum Geology & Experiment, 1979,1(1):1-9.

[3] 朱夏.板块构造与中国石油地质[M].北京:石油工业出版社,1981.
ZHU Xia.Plate tectonics and petroleum geology of China[M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1981.

[4] 周心怀,高顺莉,高伟中,等.东海陆架盆地西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡型岩性油气藏形成与分布预测[J].中国石油勘探,2019,24(2):153-164.
ZHOU Xinhui,GAO Shunli,GAO Weizhong, et al. Formation and distribution of marine-continental transitional lithologic reservoirs in Pingbei Slope Belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 153-164.

[5] 郭黔杰.煤作为源岩研究时对显微组分的重新认识[J].石油勘探与开发,1993,20(2):37-40.
GUO Qianjie. Macerals reconsideration in the studies of "oil from coal" [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(2): 37-40.

[6] 杨鹏程,李浩,刘峰,等.西湖凹陷X构造凝析油与蜡质油的形成机制[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(6):177-187.
YANG Pengcheng, LI Hao, LIU Feng, et al. Formation mechanism of condensate oil and waxy oil in Structure X of Xihu Depression [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6): 177-187.

- [7] 曹倩,宋在超,周小进,等.东海盆地西湖凹陷原油地化特征及来源分析[J].石油实验地质,2019,41(2):251-259.
CAO Qian, SONG Zaichao, ZHOU Xiaojin, et al. Geochemical characteristics and source of crude oil in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(2):251-259.
- [8] 傅宁.东海盆地西湖凹陷煤系烃源岩及凝析油中的二萜化合物[J].中国海上油气(地质),1994,8(1):21-28.
FU Ning. Diterpenoid compounds in coal measures and condensates in Xihu Sag of East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8(1):21-28.
- [9] 李磊,王小刚,陈玲玲,等.东海西湖凹陷始新统复合潮汐水道三维地震表征[J].天然气地球科学,2015,26(2):352-359.
LI Lei, WANG Xiaogang, CHEN Lingling, et al. 3-D seismic characterization of the Eocene complex tidal channels in Xihu Sag, East China Sea [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2):352-359.
- [10] 李昆,周兴海,丁峰,等.西湖凹陷保斜斜坡带平北地区平湖组“多元控砂”机制分析[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(6):115-123.
LI Kun, ZHOU Xinghai, DING Feng, et al. “Multi-factor control of sandboies distribution” in the Pinghu Formation, Pingbei region of Baochu Slope, the Xihu Sag [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6):115-123.
- [11] 贾承造,池英柳.中国岩性地层油气藏资源潜力与勘探技术:隐蔽油气藏形成机理与勘探实践[M].北京:石油工业出版社,2004:15-25.
JIA Chengzao, CHI Yingliu. Resource potential and exploration techniques of stratigraphic and subtle reservoirs in China: formation mechanism and exploration practice of subtle pool [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004:15-25.
- [12] 赵贤正,金凤鸣,刘震,等.二连盆地地层岩性油藏“多元控砂四元成藏主元富集”与勘探实践(I)“多元控砂”机理[J].岩性油气藏,2007,6(2):9-15.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, LIU Zhen, et al. “Multi-factor controlling, four-factor entrapping and key-factor enrichment” of stratigraphic-lithologic reservoirs and exploration practice in Erlian Basin (I) “multi-factor controlling” mechanism [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 6(2):9-15.
- [13] 吴嘉鹏,万丽芬,张兰,等.西湖凹陷平湖组岩相类型及沉积相分析[J].岩性油气藏,2017,29(1):27-34.
WU Jiapeng, WAN Lifan, ZHANG Lan, et al. Lithofacies types and sedimentary facies of Pinghu Formation in Xihu Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(1):27-34.
- [14] 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.
- [15] 苏奥,陈红汉,雷川,等.流体包裹体 PVTx 模拟研究油气充注期和古压力恢复: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 Ao, CHEN Honghan, LEI Chuan, et al. Application of PVTx simulation of fluid inclusions to estimate petroleum charge stages and restore pressure: using Pinghu Structural Belt in Xihu Depression as an example [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(6):137-142.
- [16] 郑求根,周祖翼,蔡立国,等.东海陆架盆地中新生代构造背景及演化[J].石油与天然气地质,2005,26(2):197-201.
ZHENG Qiugen, ZHOU Zuyi, CAI Ligu, et al. Meso-Cenozoic tectonic setting and evolution of East China Sea Shelf Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2):197-201.
- [17] 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 Lixin, SONG Zaichao. 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.
- [18] 董春梅,赵仲祥,张宪国,等.西湖凹陷中北部花港组物源及沉积相分析[J].东北石油大学学报,2018,42(5):25-34.
DONG Chunmei, ZHAO Zhongxiang, ZHANG Xianguo, et al. Analysis of provenance and sedimentary facies of Huangang Formation in the North Central of Xihu Sag [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2018, 42(5):25-34.
- [19] 刘金水,陆永潮,秦兰芝.源汇系统分析方法在大型储集体研究中的应用以西湖凹陷中央反转带花港组为例[J].石油实验地质,2019,41(3):303-310.
LIU Jinshui, LU Yongchao, QIN Lanzhi. Application of source to sink system analysis in large reservoir research: a case study of Huangang Formation, Central Inversion Belt, Xihu Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3):303-310.
- [20] 蔡佳,祁鹏,宋双.东海盆地西湖凹陷花港组下段沉积相分析[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(2):56-65.
CAI Jia, QI Peng, SONG Shuang. Sedimentary facies of the lower Huangang Formation in Xihu Depression of Donghai Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(2):56-65.
- [21] 张忠民,周瑾,郭兴威.东海盆地西湖凹陷中央反斜带油气运移期次及成藏[J].石油实验地质,2006,28(1):30-33.
ZHANG Zhongmin, ZHOU Jin, WU Xingwei. Oil and gas migration periods and accumulation process in central anticlinal zone in the Xihu Sag, the East China Sea Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(1):30-33.
- [22] 徐昉昊,徐国盛,刘勇,等.东海西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组致密砂岩储集层控制因素[J].石油勘探与开发,2020,47(1):98-109.
XU Fanghao, XU Guosheng, LIU Yong, et al. Factors controlling the development of tight sandstone reservoirs in the Huangang Formation of the central inverted structural belt in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1):98-109.
- [23] 吕延防,许辰璐,付广,等.南堡凹陷中浅层盖—断组合控油模式及有利含油层位预测[J].石油与天然气地质,2014,35(1):86-97.
LV Yanfang, XU Chenlu, FU Guang, et al. Oil-controlling models of caprock-fault combination and prediction of favorable horizons for hydrocarbon accumulation in middle-shallow sequences of Nanpu Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1):86-97.