

东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组气藏“先汇后聚”机制及地质意义

张迎朝, 邹 玮, 陈忠云, 蒋一鸣, 刁 慧

[中海石油(中国)有限公司 上海分公司, 上海 200335]

摘要: 反转构造带作为圈闭发育的优势构造带在国内外诸多盆地已揭示了丰富的油气资源, 但对于海上盆地来说, 由于钻井成本较高、钻井较少, 对反转构造带油气成藏规律的研究相对薄弱。以西湖凹陷中央反转构造带为例, 重点关注烃源岩层系内部的原始汇烃能力及从源到储的动态油气富集过程, 以期揭示反转构造带油气富集规律。通过构造演化史-生烃演化史-储层演化史-油气充注史匹配关系分析认为, 西湖凹陷中央反转构造带北部地区烃源岩大量生烃期和油气充注时间早于圈闭形成时间, 早期天然气在源内层系先形成聚集气或丰度较高的“半聚集”气, 即“先汇”; 晚期构造运动伴随圈闭形成使得早期气向上运移至圈闭中聚集成藏, 即“后聚”, 成藏后表现为天然气成熟度由深向浅呈增大的趋势。因此提出“先汇后聚”成藏新机制, 该机制不仅阐释了源上古近系花港组主力勘探层系生烃期-圈闭形成期-油气充注期时间不匹配的问题, 而且揭示了源内古构造背景对源上现今油气成藏富集的控制作用。在该模式指导下指出了中央构造带大型圈闭天然气成藏的关键因素, 并提出B构造具备良好的“先汇后聚”条件。“先汇后聚”成藏模式具有一定普遍性, 不仅对西湖凹陷中央反转构造带油气勘探具有指导作用, 对有类似地质条件的含油气盆地油气勘探亦具有重要借鉴意义。

关键词: 先汇后聚; 成藏机制; 动态成藏过程; 天然气藏; 花港组; 西湖凹陷; 东海陆架盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

The mechanism of “convergence ahead of accumulation” and its geological significance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin

ZHANG Yingzhao, ZOU Wei, CHEN Zhongyun, JIANG Yiming, DIAO Hui

(Shanghai Branch, CNOOC, Shanghai 200335, China)

Abstract: Inverted structural zones in many onshore basins around the world are frequently found to be home to oil and gas traps and have been the targets for studies for years. However, offshore inverted structural zones, in the contrary, are seldom explored because of less drilling due to high cost. Taking the central inverted structural zone of Xihu Depression as an example, this paper focuses on the original capacity of hydrocarbon convergence in the source rock series and the dynamic accumulation of hydrocarbons from source to reservoir, with the aim of revealing the hydrocarbon enrichment law. The correlation of structural evolution, hydrocarbon generation and reservoir evolution as well as hydrocarbon charging history reveals that the massive hydrocarbon generation and charging of source rocks preceded the formation of traps in the northern part of the zone. The early-generated gas formed “semi accumulation” with high abundance within the series, i. e., “convergence first”; and then migrated upwards and accumulated in traps formed later during tectonic movements, i. e., “later accumulation”. The reservoirs show a trend of increasing natural gas maturity from deep to shallow. Based on these results, the paper proposes the new model of “convergence ahead of accumulation”, which not only reasonably explains the mismatch of timing among the hydrocarbon generation, trap

收稿日期:2023-02-01;修回日期:2023-05-31。

第一作者简介:张迎朝(1971—),男,教授级高级工程师,海洋油气勘探。E-mail: zhangyingzh@cnooc.com.cn。

通信作者简介:刁慧(1984—),男,高级工程师,油气成藏。E-mail: diaohui@cnooc.com.cn。

基金项目:中海油“十四五”重大科技项目(KJGG2022-0301);“十四五”全国油气资源评价项目(QGYQZYPJ2022-3)。

formation and hydrocarbon charging in the Huagang Formation in the series, but also reveals the control effect of ancient tectonic background on the current accumulation of oil and gas. Under the guidance of this model, the key factors for the formation of large-scale natural gas reservoirs in the zone are revealed, and the B structure in the zone is pinpointed to be a perfect place for “convergence ahead of accumulation”. The new model can be applied to other offshore petroliferous basins with similar geological conditions.

Key words: convergence ahead of accumulation, accumulation mechanism, dynamic accumulation process, gas reservoirs, Huagang Formation, Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin

引用格式:张迎朝,邹玮,陈忠云,等. 东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组气藏“先汇后聚”机制及地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1256–1269. DOI: 10. 11743/ogg20230514.

ZHANG Yingzhao, ZOU Wei, CHEN Zhongyun, et al. The mechanism of “convergence ahead of accumulation” and its geological significance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1256–1269. DOI: 10. 11743/ogg20230514.

东海陆架盆地西湖凹陷作为中国近海面积最大的含油气凹陷已有40年的勘探历程,其紧邻长江三角经济发达区,在保障国家能源安全中具有重要的战略地位^[1-4]。“十二五”期间在西湖凹陷中央反转构造带发现了储量丰度高的大中型气田,扭转了西湖凹陷没有大型油气田的现状,也吸引了诸多学者对该地区油气地质条件的研究^[5-11]。前人的研究主要集中在构造、烃源岩、沉积、储层等方面^[6, 12-19],而对油气成藏机制的研究较少。“十二五”之后针对西湖凹陷中央反转构造带大型圈闭进行了一系列勘探,但一直未能实现较大突破。研究认为古近系花港组背斜圈闭形成时间为龙井运动构造挤压反转时期(15~10 Ma)^[9, 20-22],下部平湖组烃源岩在25~15 Ma时早已达到了高成熟阶段^[23-24],油气生成和储层中油气充注早于圈闭形成^[14, 25-28],油气充注时间与圈闭形成时间不匹配制约了中央反转构造带油气勘探。然而国内外诸多勘探实践表明,反转构造带具有巨大的油气资源潜力,如钦敦盆地、缅甸中央盆地、苏门答腊盆地等^[29-33],尤其是苏门答腊盆地作为印度尼西亚最大的富油气区在中央反转背斜带已经发现了丰富的油气资源^[34-36]。西湖凹陷反转构造带大中型气田的发现已证实该区具备良好成藏条件,但目前从源到藏的动态成藏过程尚不清楚,这严重制约了油气勘探的进展。因此本文从中央反转构造带油气成藏过程分析入手,提出“先汇后聚”成藏机制,该机制对西湖凹陷中央反转构造带油气勘探具有重要现实价值和理论指导意义。

1 地质概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部,其东侧为钓鱼岛隆褶带,西侧为海礁隆起,北与福江凹陷相接,南与

钓北凹陷相通,南北长约440 km,东西宽约110 km,总面积 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,沉积厚度最大可达15 km^[15, 37]。西湖凹陷分为西部斜坡带、西次凹、中央反转构造带、东次凹和东部断阶带5个构造单元(图1a)^[37]。西湖凹陷自下而上发育古新统,始新统宝石组与平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组与柳浪组,上新统三潭组,以及更新统东海群等地层^[38],其中平湖组煤系烃源岩是盆地主要的烃源岩层,花港组发育的大型辫状河三角洲沉积砂体是盆地内重要的储层(图1b)。本次研究区位于中央反转构造带北部的4个构造,记为A、B、C和D构造(图1a),4个构造均位于生烃主洼内,已有钻井均钻遇花港组并在花港组上段揭示了丰富的天然气资源。

2 天然气成藏要素与“四史”的匹配

2.1 构造演化史与圈闭形成期

西湖凹陷经历断陷期—拗陷期—反转期—区域沉降期,最终形成现今构造格局^[9, 40]。为了明确中央反转构造带构造演化特征,采用平衡剖面法对典型剖面E—E' (剖面位置见图1a)进行恢复(图2)。结果表明,玉泉组沉积末期龙井运动(13~10 Ma)导致了中央反转构造带大型挤压反转背斜的形成,龙井运动之前,中央反转构造带尚未形成,为凹陷的沉降中心部位,平湖组烃源岩埋深较大。

2.2 中央反转构造带平湖组烃源岩演化史和生烃史

由于中央反转构造带未钻遇平湖组烃源岩,本次研究利用浅层泥岩样品的实测镜质体反射率(R_o)数据作为边界限制参数,对C1井平湖组烃源岩热演化史和

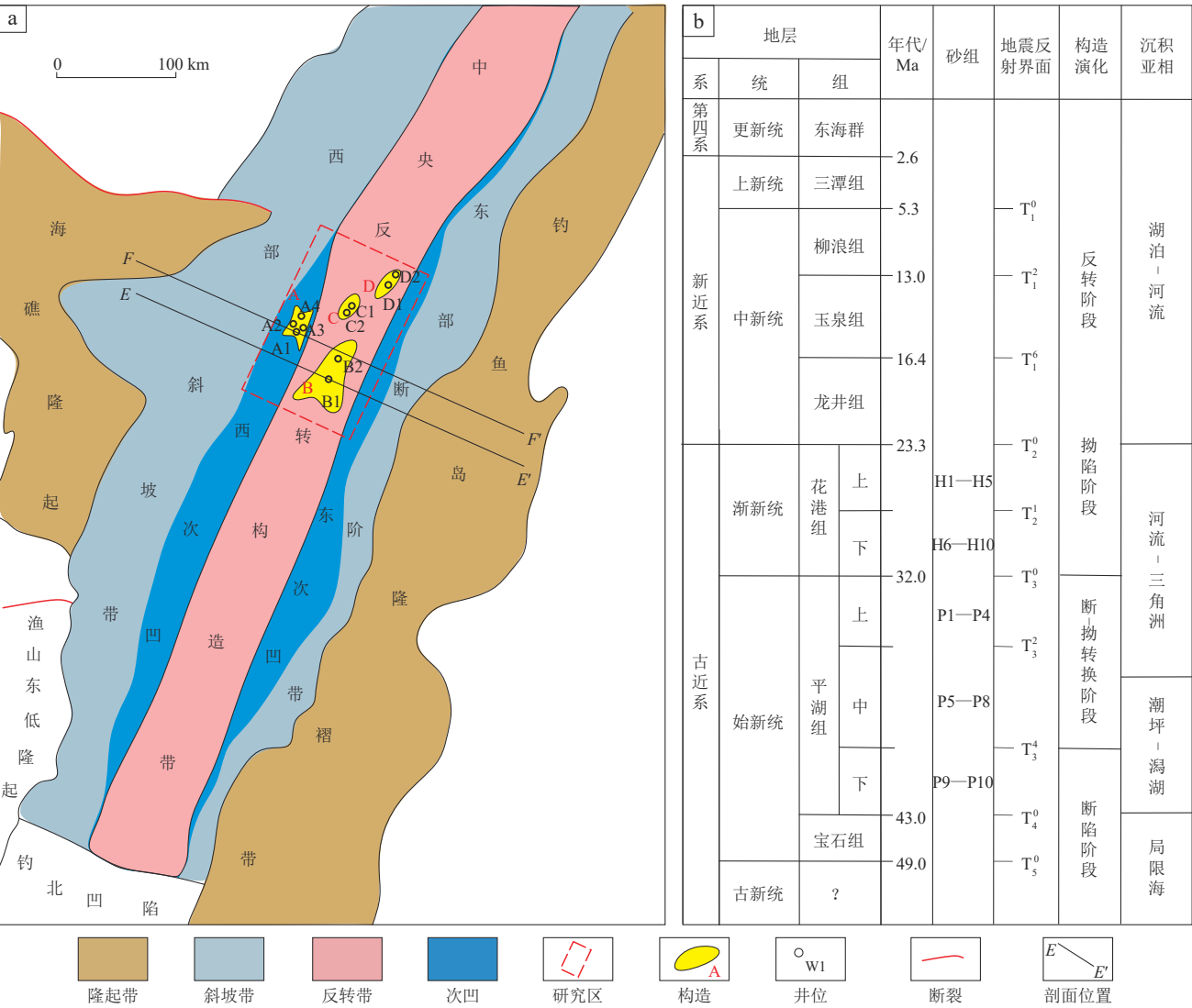


图1 西湖凹陷构造单元划分(a)及地层柱状图(b)(据文献[38-39]修改)

Fig. 1 Structural unit division and stratigraphic column, Xihu Depression (modified after [38-39])

生烃演化史进行模拟。模拟结果显示,模拟 R_o 与实测 R_o 匹配关系较好(图3a),可以反映平湖组烃源岩实际热演化过程。可以看出,平湖组烃源岩在26.5 Ma时已进入低成熟阶段,开始生成少量油气;23.0~15.0 Ma为快速生烃阶段,油气大量生成,为主要生气阶段,至8.0 Ma左右几乎完全停止生烃(图3b)。前人利用地震和热属性模拟对西湖凹陷平湖组热演化史进行了研究,研究区平湖组发育巨厚的烃源岩层,现今埋深普遍大于4 500 m,最深可达上千米,现今已普遍进入过成熟阶段($R_o>2.0\%$)^[23, 41]。前人利用斜坡带暗色泥岩进行热模拟实验恢复的生烃历史来看, $R_o<1.0\%$ 时是主要的生油时期, R_o 为1.0%~2.3%时是主要的生气期,当 $R_o>2.3\%$ 时生烃量较少(图3c)^[24],这与本次盆地模拟结果吻合。

2.3 花港组储层演化史

依据储层黏土矿物成分及物性资料,对中央反转构造带北部地区储层成岩环境进行划分。北部地区花港组储层由浅至深可划分为酸性成岩环境、酸-碱过渡环境和碱性成岩环境3个成岩带^[42-45]。3 400 m以浅的地层温度普遍小于140 ℃,发育酸性成岩环境,自生高岭石为主要的黏土矿物类型,指示对长石等铝硅酸盐矿物的强烈溶蚀作用,储层物性较好,为酸性-开放成岩带。埋深3 400~4 700 m的储层进入碱性成岩环境,自生绿泥石及自生伊利石普遍发育,其中自生绿泥石尤其发育,占比普遍大于40%;同时,晚期碳酸盐矿物等发育,储层开始致密,常规储层与致密储层共存,成岩环境逐渐封闭,为碱性-半开放成岩带。埋深大

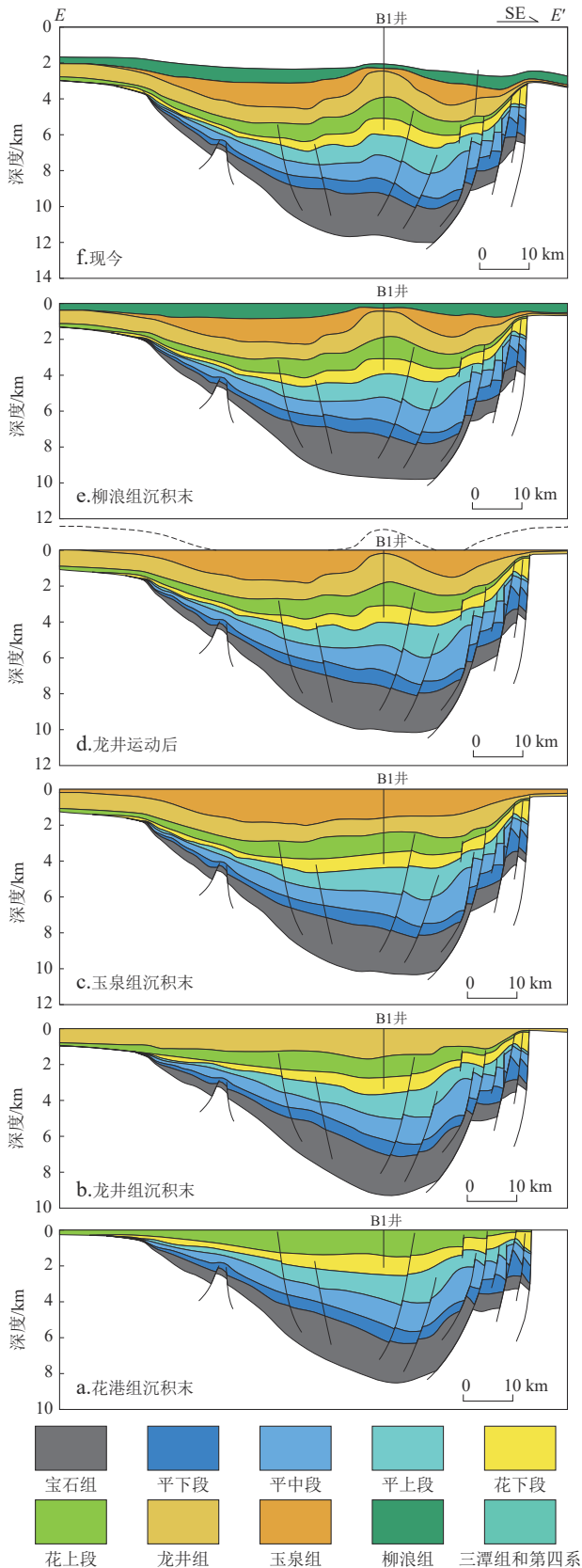


图2 西湖凹陷中北部地区过B1井构造演化史(剖面位置见图1a)

Fig. 2 Structural evolution history across Well B1 in the north central Xihu Depression (see section EE' in Fig. 1a for the location)

a. 花港组沉积末;b. 龙井组沉积末;c. 玉泉组沉积末尚未发生龙井运动时;d. 龙井运动之后;e. 柳浪组沉积末;f. 现今

于4 700 m时,地层温度普遍大于160℃,储层压实和成岩作用进一步加强,晚期碳酸盐矿物持续发育,储层普遍致密,封闭的碱性成岩环境形成,为碱性-封闭成岩带。

基于成岩环境的划分,研究区花港组砂岩储层成岩演化序列可划分为同生阶段、早成岩阶段A期、B期和中成岩阶段A期、B期3个阶段5个时期。同生阶段至早成岩阶段A期以机械压实作用为主,早期介质偏碱性,在研究区可见到少量环边绿泥石。早成岩阶段B期,平湖组煤系烃源岩进入生烃门限产生酸性流体,在酸性介质条件下,长石转变成高岭石,泥质蚀变成高岭石,同时溶解作用提供大量离子,使得早期基底式碳酸盐胶结物逐渐形成。中成岩阶段A期,压实作用继续导致原生粒间孔继续减少,烃源层中的有机质演化进入低成熟-成熟阶段,更多的与埋藏成岩条件下有机酸溶解作用有关的长石等铝硅酸盐溶解可提供更多的 K^+ ,加之成岩温度的升高,使蒙皂石向伊利石/蒙皂石混层转化速度加快,同时黏土矿物转化提供的 Ca^{2+} , Fe^{3+} 和 Mg^{2+} ,有利于含铁方解石胶结物的形成。中成岩阶段B期,压实作用的减孔作用逐渐减弱,黏土矿物开始大量向伊利石和绿泥石转化,同时次生溶孔中可见到石英的Ⅱ-Ⅲ级加大边,在该阶段后期,流体介质趋于碱性,地层水中富含钙、镁和铁离子并开始沉淀出含铁方解石和含铁白云石。

基于研究区成岩演化序列的分析,对花港组储层成岩演化与孔隙演化过程进行恢复,以A构造为例,在同生期初始孔隙度受压实作用影响减少至20%~25%。早成岩A期,早期硅质、钙质和自生黏土矿物胶结对储层起到破坏影响,使总孔隙减少5%左右;随后早成岩B期,早期烃类对储层进行改造,使总孔隙增加4%~6%;早期赋存在颗粒表面的绿泥石膜对原生孔隙起到保护作用,使总孔隙保持在20%左右。中成岩A期压实作用和硅质、晚期钙质胶结作用破坏原生孔隙和次生孔隙,使总孔隙减少10%左右。中成岩B期,压实和胶结作用使孔隙度继续减少,对于H6砂组砂岩而言,晚期减孔作用不明显,至今仍保持10.1%的孔隙度。H4及以上为常规储层,H7及以下储层普遍致密,H8砂组砂岩早在约14.8 Ma时就已经致密(图4)。由于各构造成岩环境及成岩演化序列相似,因此其他构造储层孔隙演化过程也与A构造相似,不同的是,与A构造相比,其他构造在龙井运动时期地层抬升量大,龙井运动之前地层埋深大于现今埋深,因此龙井运动之后压实减孔速率更小。

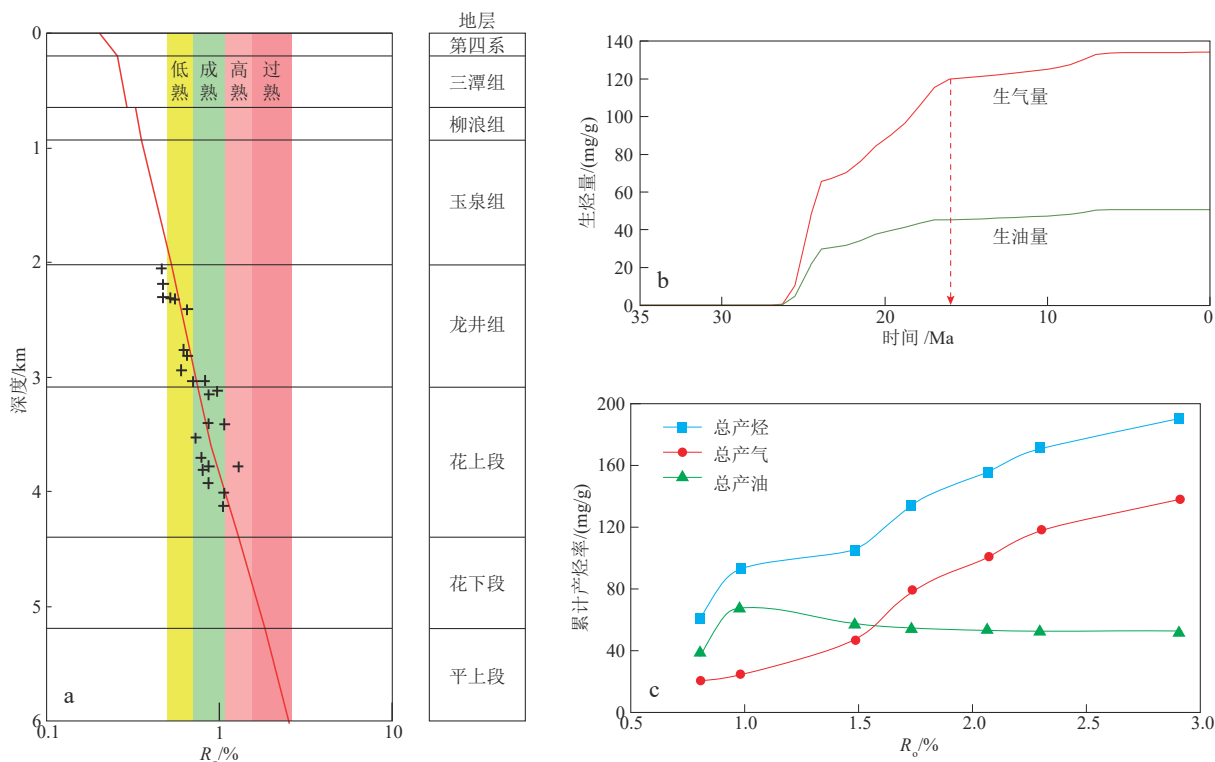


图3 西湖凹陷中北部地区C1井模拟 R_o 与实测 R_o 拟合图(a),平湖组中段顶(T_3)生烃演化史(b)和斜坡带暗色泥岩热模拟生烃量演化(c)(据文献[24]修改)

Fig. 3 Diagrams showing the matching between simulated and measured R_o for Well C1 (a), the hydrocarbon generation evolution of the top middle Pinghu Fm. (T_3) in the north central Xihu Depression (b) and the thermal simulation and hydrocarbon generation of dark mudstone in the slope zone (c) (modified after [24])

2.4 花港组成藏期和油气充注史

根据包裹体赋存特征及均一温度对研究区油气充注期次与充注时间进行分析。研究区主要存在3类赋存状态的包裹体:第一类为石英加大边微裂隙中的包裹体(图5a—c);第二类为切穿石英颗粒和加大边微裂隙中的包裹体,通常呈“X”型共轭形态分布(图5d—f),这可能与构造运动时期储层应力方向改变有关;第三类包裹体为成岩晚期碳酸盐胶结物中的包裹体(图5g, h),对应3期油气充注。由包裹体均一温度分布特征可得,不同构造包裹体主峰的温度区间有差异(图5i—l),但对应的油气充注时间大致相当(图6)。以D构造为例,第一类包裹体以油、气两相包裹体为主,伴生的盐水包裹体的均一温度峰值处于135~140℃,对应15~13 Ma,当时圈闭尚未形成,但储层记录了有烃类充注;第二类包裹体以气态烃包裹体为主,伴生的盐水包裹体的均一温度峰值处于140~150℃(图5l),对应龙井运动时期(图6d),此时圈闭开始形成,为主要成藏期;第三类包裹体以微小的气态烃包裹

体分布在成岩晚期的铁方解石中,伴生的盐水包裹体均一温度为146~150℃,对应冲绳运动时期(图6d),充注规模小,以补充为主。

3 中央反转构造带天然气“先汇后聚”动态成藏过程

3.1 “先汇后聚”的内涵

在非继承性发育的构造,大量生、排烃期烃源岩层系的先存构造中首先发生汇烃作用形成油气聚集和成藏,当烃源岩层系为低幅构造背景、平缓台阶或鼻状构造时,油气也会发生汇烃作用,形成聚集或半聚集状态的油气(包括地层水溶解气),这些聚集或半聚集状态的油气成为晚期构造运动时垂向运移的主要“油气源”,在上部圈闭中聚集成藏,这种机制或过程称为“先汇后聚”。因此,烃源岩层系的原始汇烃条件对源上晚期构造中的油气聚集起关键作用。

“先汇后聚”内涵是:①大量生烃期烃源岩层系具

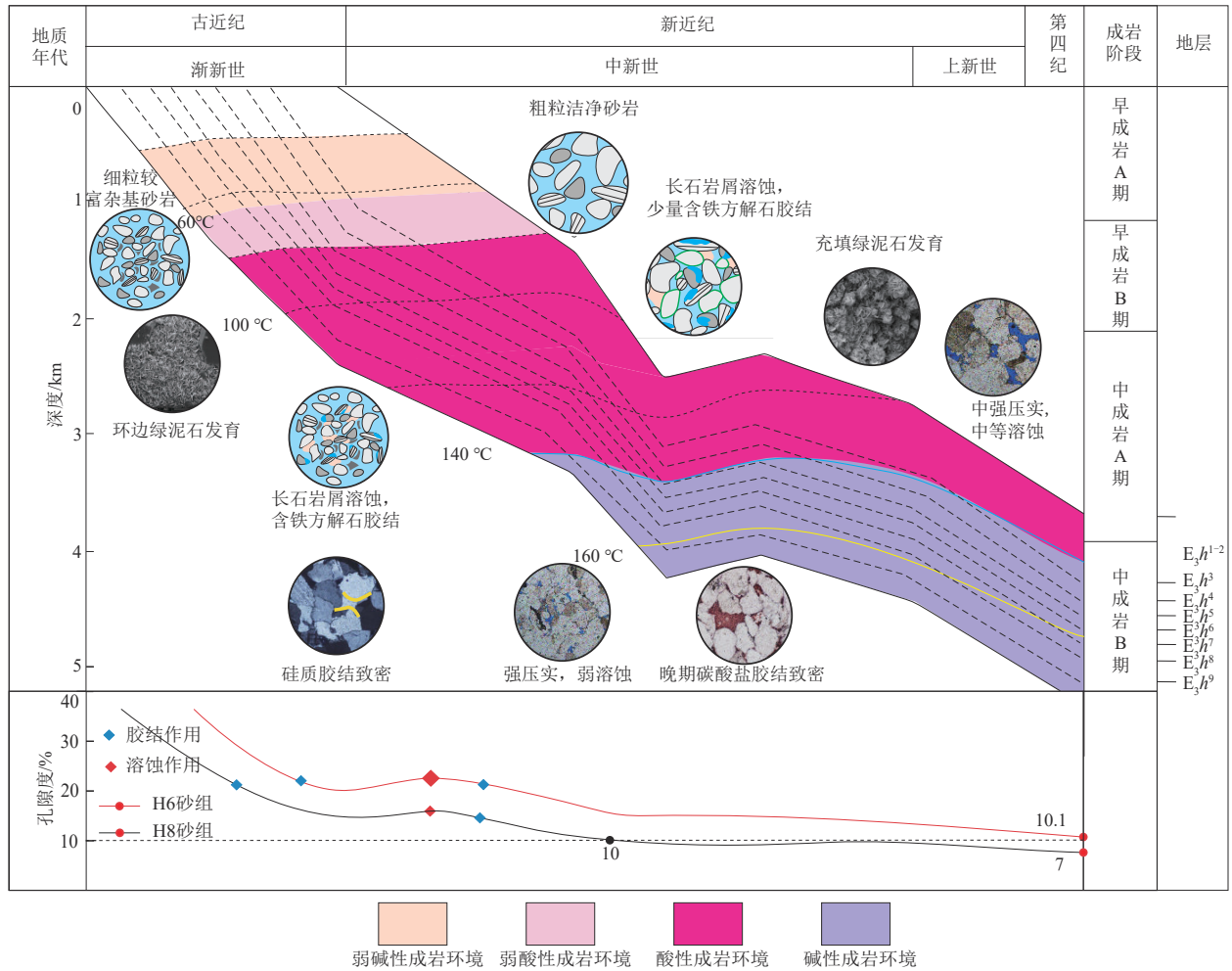


图4 西湖凹陷中北部地区A1井花港组储层演化与孔隙演化综合图

Fig. 4 Comprehensive map showing the reservoir and pore evolution in the Huagang Formation of Well A1 in the north central Xihu Depression

有正向构造背景或宽缓平台;②原始汇烃作用主要发生在烃源岩层及相邻层系,形成油气聚集或丰度较高的“半聚集”油气,即“先汇”,否则储层中分散状态油气在后期难以聚集成藏;③晚期圈闭形成,早期“半聚集”的油气通过断裂或裂缝垂向运移聚集成藏,即“后聚”;④烃源岩层系构造高点与上部地层的构造高点可能一致也可能不一致,断裂作为“先汇”和“后聚”的沟通通道至关重要。

3.2 中央反转构造带天然气“先汇后聚”及其依据

3.2.1 烃源岩生、排烃时间早,与花港组圈闭形成时间不匹配

由于研究区位于西湖凹陷埋深最大的生烃主洼内,平湖组烃源岩具有厚度大、埋深大的特点,这使得其进入成熟阶段的时间也较早,早在21.2 Ma时平湖

组 R_o 已达到1.2%,至15.8 Ma时 R_o 已达1.7%。因此生烃时间也较早,26.5 Ma时已进入低成熟阶段,26~15 Ma已经大量生烃(图3b),主要生、排烃时间为23~15 Ma,包裹体显示H3段油气充注时间的最早时间在15 Ma,说明花港组早期烃类有充注,由于圈闭未形成,无法聚集成藏。主要生、排烃时间与花港组圈闭形成时间(13~10 Ma)不匹配,推测花港组底部的砂岩应存在更早时间的油气充注。

3.2.2 气层天然气的成熟度与圈闭形成之前烃源岩的成熟度匹配

天然气甲烷碳同位素值可用于计算天然气成熟度,前人已提出了较多计算公式,但由于西湖凹陷特殊的生烃母质类型和地质条件导致这些公式并不适用^[46-49],程熊等(2019)^[50]利用天然气共生凝析油成熟度与甲烷碳同位素拟合,建立了适用于西湖凹陷

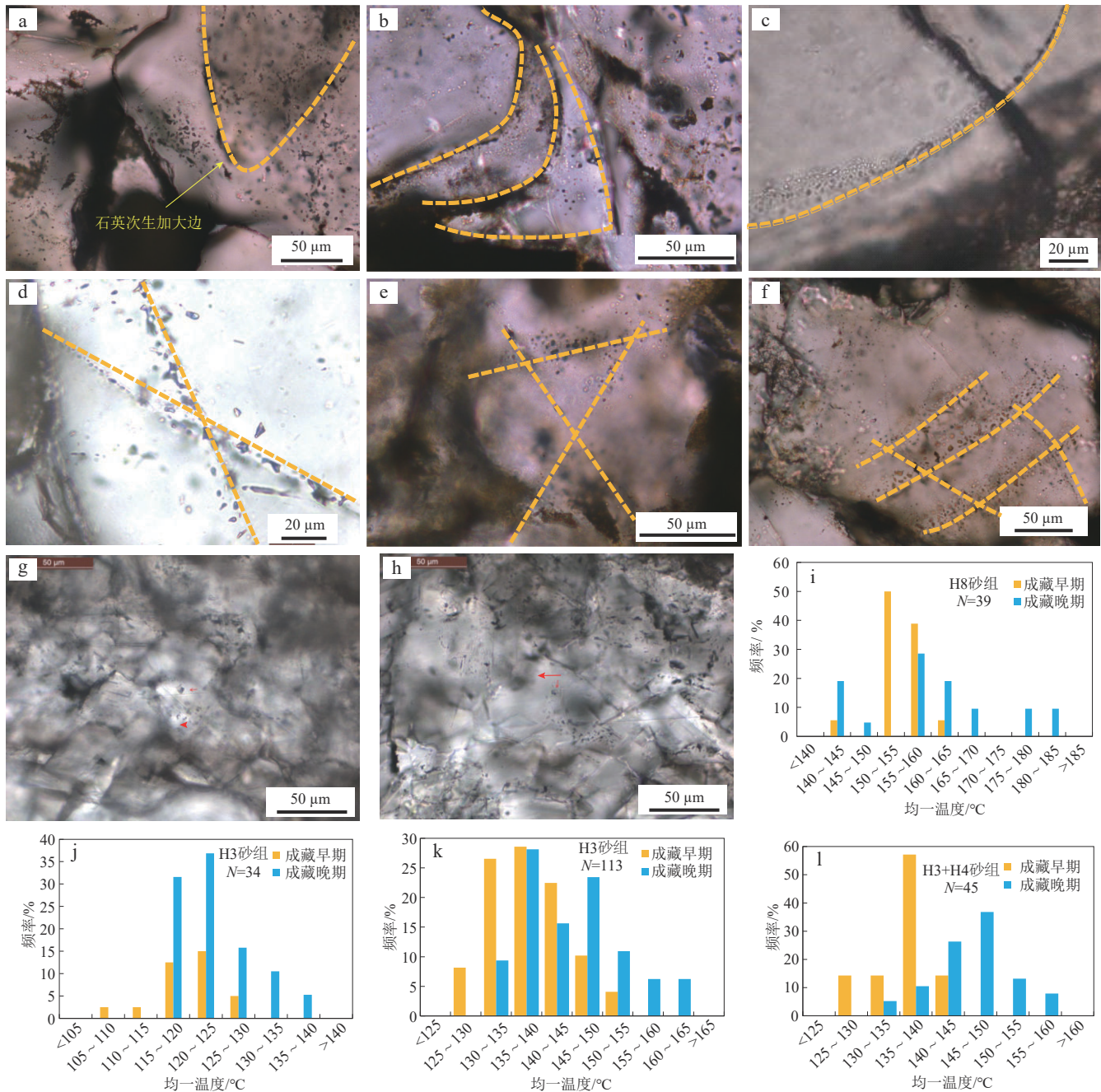


图5 西湖凹陷中北部地区包裹体显微照片和包裹体均一温度分布频率直方图

Fig. 5 Photos and homogenization temperature histograms of inclusions from the north central Xihu Depression

a. D1井,埋深3 447.3 m,H3砂组,细砂岩,石英加大边微裂隙中的包裹体;b. B2井,埋深3 134.0 m,H3砂组,细砂岩,石英加大边微裂隙中的包裹体;c. C2井,埋深3 695.0 m,H3砂组,细砂岩,石英加大边微裂隙中的包裹体;d. D1井,埋深3 465.2 m,H3砂组,细砂岩,切穿石英颗粒及加大边微裂隙中的包裹体;e. C2井,埋深3 694.7 m,H3砂组,细砂岩,切穿石英颗粒及加大边微裂隙中的包裹体;f. B1井,埋深3 974.2 m,H3砂组,细砂岩,切穿石英颗粒及加大边微裂隙中的包裹体;g. D2井,埋深4 108.9 m,H5砂组,细砂岩,晚期碳酸盐胶结物中的包裹体;h. D2井,埋深4 108.9 m,H5砂组,细砂岩,晚期碳酸盐胶结物中的包裹体;i. A构造流体包裹体均一温度分布柱状图;j. B构造流体包裹体均一温度分布柱状图;k. C构造流体包裹体均一温度分布柱状图;l. D构造流体包裹体均一温度分布柱状图

的经验公式[公式(1)]。研究区气层天然气甲烷碳同位素值分布于 -32.2% ~ -30.6% (表1),对应成熟度(R_o) 1.61% ~ 1.72% ,明显低于现今烃源岩成熟度(现今烃源岩成熟度远大于 2.00% ,达过成熟阶

段)(图7),表明天然气为成熟-高成熟阶段的产物(23~15 Ma),对应时间为花港组沉积末-龙井组沉积末。值得注意的是,主力气层H3包裹体内捕获的天然气成熟度与现今气层的天然气成熟度一致,而

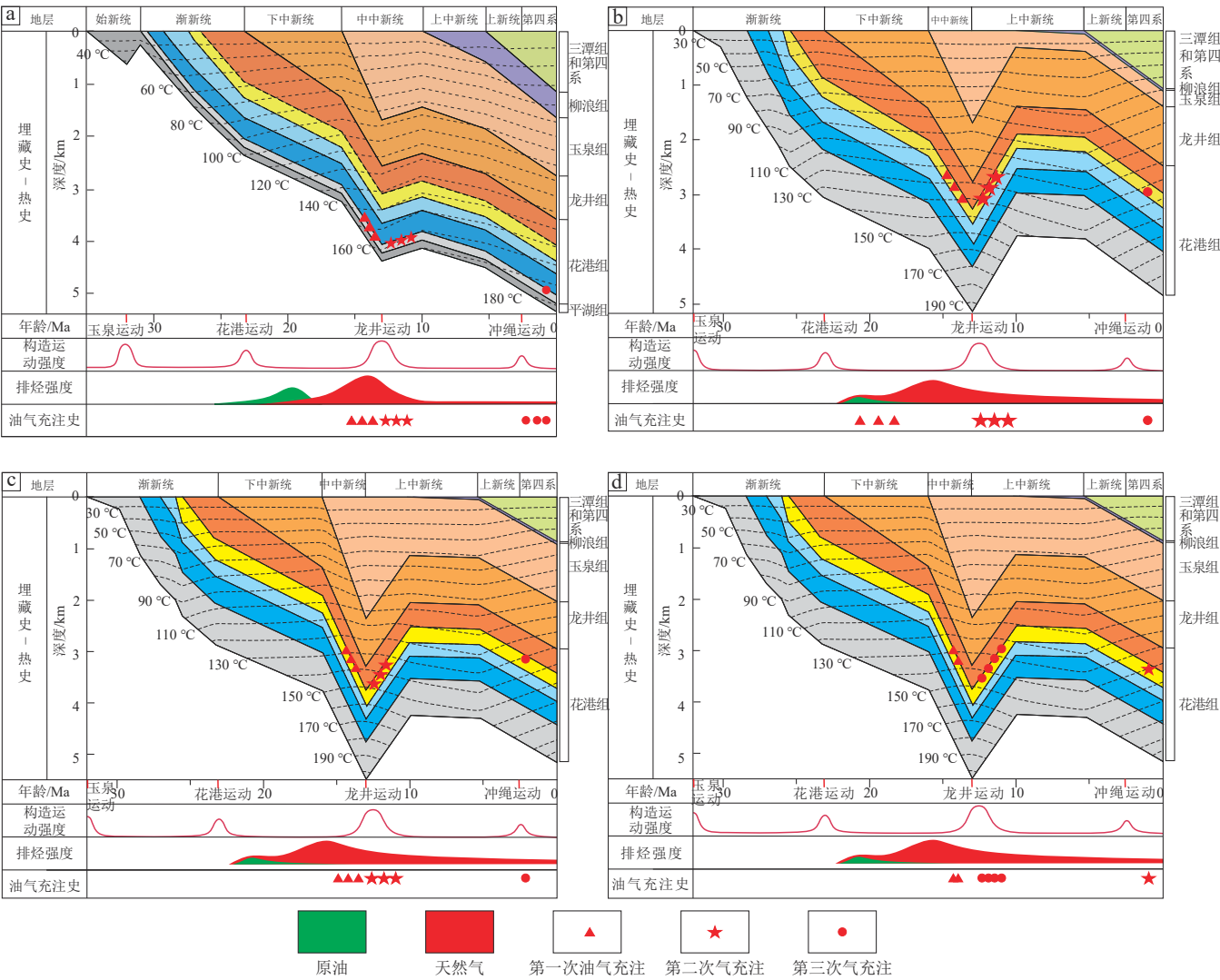


图6 西湖凹陷中北部地区A1井(a)、B1井(b)、C1井(c)和D1井(d)埋藏史、热史和H3砂组储层油气充注史

Fig. 6 Burial history, thermal history and hydrocarbon charging history of wells D1(a), B1(b), C1(c) and D1(d) in the north central Xihu Depression

表1 西湖凹陷中北部地区天然气组分碳同位素数据

Table 1 Carbon isotope data of natural gas components in the north central Xihu Depression

井号	深度/m	层位	测试方法	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			甲烷碳同位素计算 $R_0/\%$
				C_1	C_2	C_3	
D1	4 298.00	H6砂组	包裹体击碎	-43.8	—	—	1.02
A4	4 333.90	H3砂组	包裹体击碎	-30.6	—	—	1.72
C1	3 188.00	H2砂组	天然气	-30.8	-25.2	-23.5	1.70
C1	3 724.00	H3砂组	天然气	-31.5	-27.5	-26.0	1.66
C2	4 296.38	H5砂组	天然气	-32.2	-26.6	-23.8	1.61
A2	4 585.00	H5砂组	天然气	-32.1	-24.1	-22.7	1.62
A3	4 571.58	H5砂组	天然气	-31.4	-25.0	-23.2	1.66

注:“—”表示含量低,未检出。

下部近致密储层H6包裹体内捕获的天然气成熟度则远低于现今气层的成熟度(表1),表明花港组下部致密气层中充注的天然气比较早,主力气层天然气充注的时间较晚。

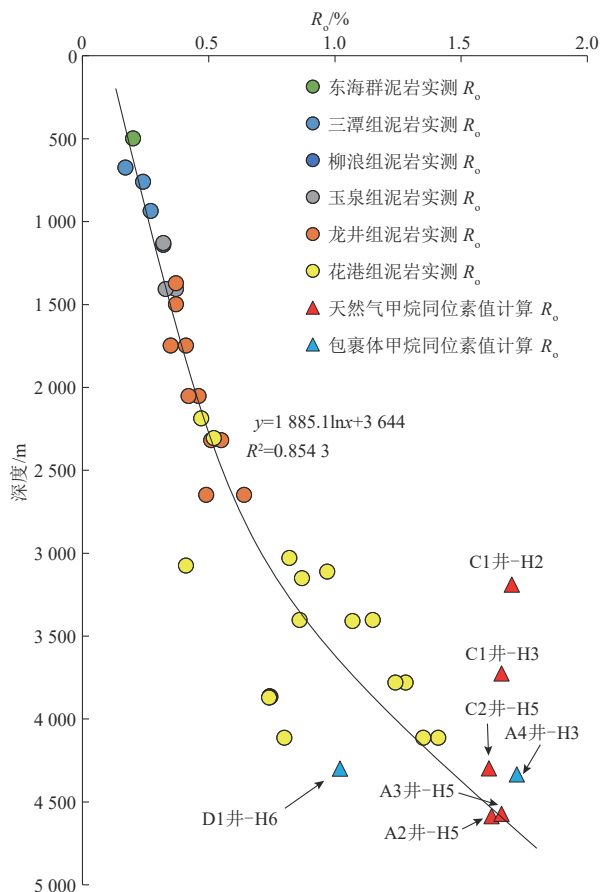


图7 西湖凹陷中北部地区天然气成熟度与烃源岩成熟度对比

Fig. 7 Diagram comparing the gas maturity and source rock maturity in the north central Xihu Depression

$$\delta^{13}\text{C}_1 \approx 58.67 \lg R_o - 44.37 \quad (1)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_1$ 为天然气甲烷碳同位素值, ‰; R_o 为天然气成熟度(计算镜质体反射率), ‰。

3.2.3 气层中天然气成熟度自下而上有增大趋势

研究区天然气成熟度具有向浅层增大趋势, 下部致密储层的天然气甲烷碳同位素较轻, 成熟度相对低, 上部常规储层的天然气甲烷碳同位素较重, 成熟度相对较高, 与正常垂向运移的分异作用相反(表1)。储层演化史表明, 花港组下部致密储层形成时间是龙井运动前, 说明与下覆平湖组烃源岩相邻的花港组底部致密储层中的天然气充注较早, 上部常规储层中的天然气充注时间较晚。进一步说明, 龙井运动的构造反转过程中, 烃源岩层系早先聚集或半聚集的天然气向上运移, 难以在致密储层中继续充注, 而主要在储层物性较好的花港组上部储层中充注和聚集, 充注的顺序是自下而上。后期平湖组形成的高-过成熟天然气在通过断裂向上运移中优先在常规储层中充注, 晚期

高-过成熟的天然气难以在致密储层中充注, 因而造成下部储层中天然气成熟度较低, 上部储层中的天然气成熟度较高。

3.3 中央构造带天然气“先汇后聚”动态成藏过程

根据平湖组生烃史可得, 平湖组中段顶(T_3^2)在龙井运动之前就已经达到生烃高峰(图3), 平湖组下段生烃时间则更早, 此时花港组圈闭未形成, 天然气优先赋存于平湖组及邻近的花港组底部致密储层中, 形成聚集或半聚集态的天然气“富集体”, 一部分天然气可以进入上部花港组储层但无法成藏。龙井运动时期, 伴随着构造运动和圈闭的形成, 原先在烃源岩层系和花港组底部赋存的聚集或半聚集的天然气沿断裂向上运移, 与分散状的天然气一起在花港组圈闭中聚集成藏; 龙井运动晚期, 部分天然气从花港组破坏调整到龙井组储层中, 形成现今天然气在龙井组、花港组和平湖组立体分布格局(图8)。由此可以看出, 平湖组烃源岩层系的原始汇烃条件和大规模反转背斜是花港组大中型气田形成的关键因素, 这种“先汇后聚”成藏模式更好地解释了生烃期-圈闭形成期-油气充注期和成藏期不匹配的问题, 揭示了油气成藏和富集的关键因素—大量生气期烃源岩层系的古构造背景, 这为下一步勘探提供了很好的思路。

4 “先汇后聚”新机制在勘探目标评价中的意义

4.1 平湖组烃源岩原始汇烃条件评价

古构造研究表明, 生气高峰的龙井组沉积末, B、C和D3个构造具备良好的汇烃条件(图9), 其中B构造为低幅构造, 平湖组生成的天然气优先在低幅构造中运移聚集, 形成气藏, 花港组底部储层已近致密可以形成致密气; C和D构造处于一个地层比较平缓的平台, 具备良好的汇烃条件, 天然气可以优先在平湖组储层中汇集, 形成半聚集态的天然气, 花港组底部储层已近致密也可以形成致密气。因此, 大量生气期的烃源岩及邻近层系的古构造背景为“先汇后聚”奠定了基础。对于液态石油而言, 所需的运聚动力比天然气更强, 因此在花港组底部致密储层也可形成早期的致密砂岩油, 晚期可随天然气一同向浅层运移, 煤系烃源岩生成的大量天然气与少量石油的混合是西湖凹陷富凝析气的重要原因。

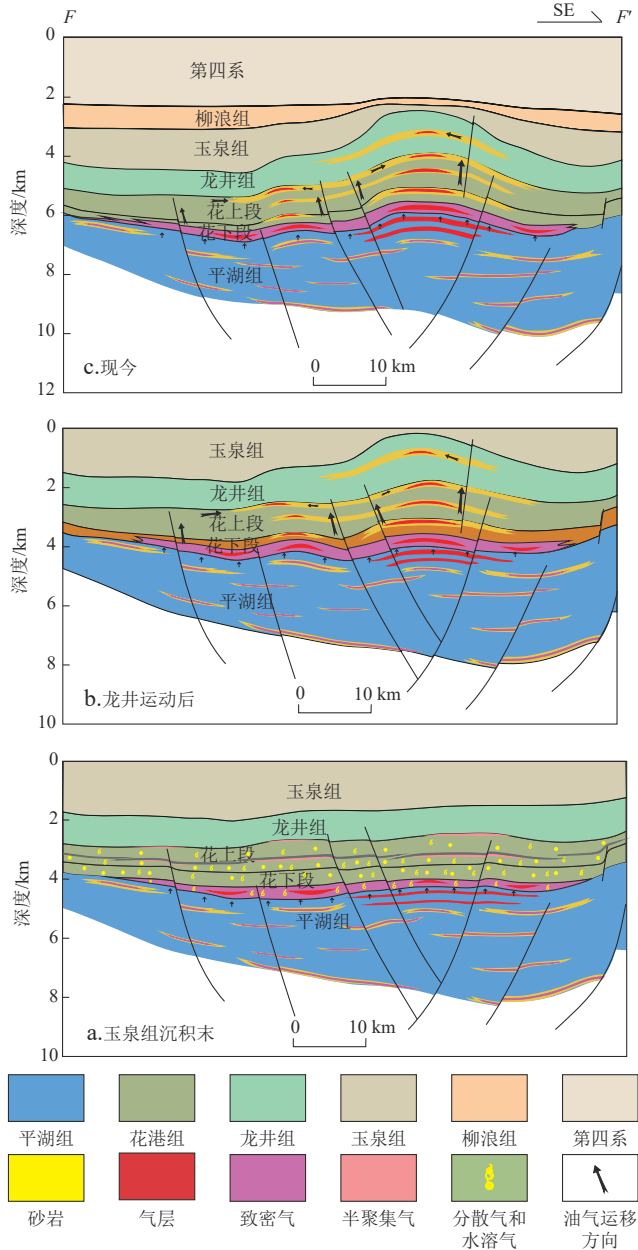


图8 西湖凹陷中央反转构造带先汇后聚成藏模式
(剖面位置见图1a)

Fig. 8 Reservoir forming model of “convergence ahead of accumulation” in the central inverted structural zone of Xihu Depression (see Fig. 1a for the location of section F—F')

a. 玉泉组沉积末期,天然气优先赋存于平湖组及邻近的花港组底部致密储层中;b. 龙井运动时期,圈闭的形成,烃源岩内分散的与花港组底部聚集的天然气沿断裂向上运移,在花港组圈闭中聚集成藏;c. 龙井运动晚期部分天然气从花港组破坏调整到龙井组储层中,形成天然气在龙井组、花港组、平湖组立体分布格局

4.2 从“先汇后聚”新机制认识B构造的勘探潜力

研究区现今烃源岩普遍达到过成熟阶段,在龙井运动之前,烃源岩达到高成熟阶段,气源充足,为中央

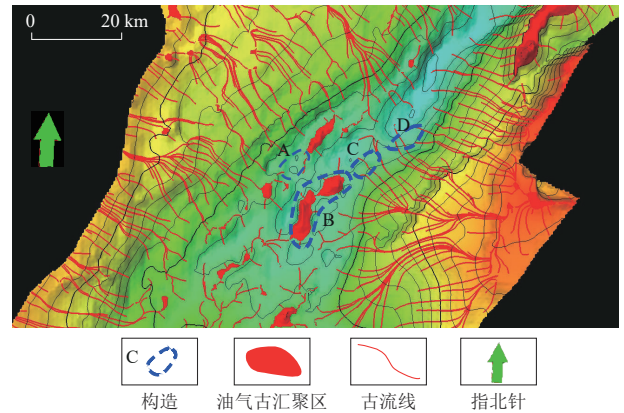


图9 西湖凹陷中北部地区平湖组顶(T_3^0)在龙井组沉积末期的古构造和油气运移态势

Fig. 9 Paleotectonic background and migration map of top Pinghu Formation (T_3^0) at the end of Longjing Formation sedimentation in the north central Xihu Depression

构造带大中型气田的形成提供了丰富的资源基础。根据古汇烃条件可得,B构造在大量生、排烃期就具备良好的汇烃条件(图9),早期“先汇”的富气区与晚期“后聚”的聚集区的匹配关系决定了现今油气的富集程度。受研究区构造规模影响,各构造的聚烃范围和聚烃量也具有差异(图10a),聚烃能力决定了气田形成的规模。经对比,与已证实为大中型气田的C和D构造相比,B构造“先汇”条件更好(图10),聚烃面积最大,可达748.23 km²,聚烃量可达3 306×10⁸ m³(图10b,c),因此,B构造勘探潜力巨大。

5 结论

1) 西湖凹陷中央构造带圈闭在玉泉组沉积末期龙井运动(13~10 Ma)形成,平湖组烃源岩在23~15 Ma为大量生、排烃期,龙井运动时期为主要成藏期,龙井运动之前存在早期油气充注,圈闭形成时间与主要生、排烃期不匹配。

2) 天然气成熟度表明,花港组气藏为23~15 Ma成熟-高成熟阶段的产物,且深层天然气成熟度低于浅层,因此本文提出“先汇后聚”成藏新机制,解决了花港组主力勘探层系生烃期-圈闭形成期-油气充注期时间不匹配的问题。

3) “先汇后聚”成藏模式对指导西湖凹陷中央反转构造带包括B构造在内一系列大型圈闭的勘探具有重要意义。该模式在其他盆地的天然气勘探中具有一定的普遍性,对其他盆地的天然气勘探具有重要借鉴意义。

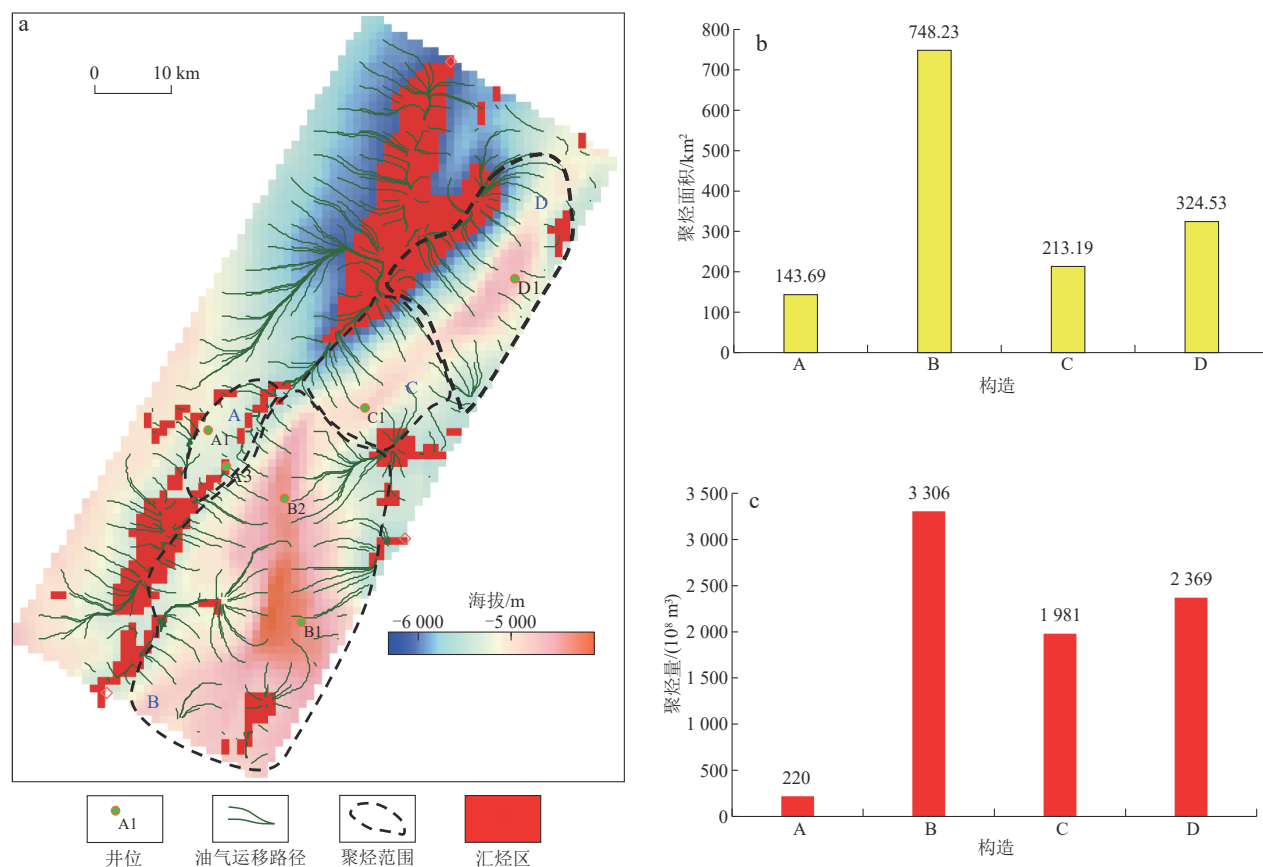


图10 西湖凹陷中北部地区各构造聚烃范围平面图(a)及聚烃面积(b)、聚烃量(c)对比柱状图

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation map (a) and bar charts of hydrocarbon accumulation areas (b) and accumulated hydrocarbon volume (c) of various structures in the north central Xihu Depression (A—D为构造名称。)

参 考 文 献

- [1] 周荔青, 江东辉, 周兴海, 等. 东海西湖凹陷西斜坡断层—岩性油气藏富集评价体系与勘探方向[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 747-754.
ZHOU Liqing, JIANG Donghui, ZHOU Xinghai, et al. Evaluation system and exploration optimization for fault-lithologic reservoir on the western slope of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 747-754.
- [2] 陈波, 程超, 李文俊. 东海西湖凹陷少井区中深层薄砂体识别及潜力分析[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(2): 11-16.
CHEN Bo, CHENG Chao, LI Wenjun. Identification and potential analysis of thin sand bodies in middle and deep layers of few well blocks in Xihu Sag, East China Sea [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(2): 11-16.
- [3] 孙思尧, 范昌育, 蒲仁海, 等. 西湖凹陷平湖构造带断裂垂向封闭性研究[J]. 断块油气田, 2022, 29(3): 353-359.
SUN Siyao, FAN Changyu, PU Renhai, et al. Research on vertical sealing of faults in Pinghu structural belt of Xihu Sag[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(3): 353-359.
- [4] 江东辉, 杜学斌, 李昆, 等. 东海西湖凹陷保坨斜坡带平湖组“古地貌—古水系—古坡折”特征及其对沉积体系的控制[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 771-779.
JIANG Donghui, DU Xuebin, LI Kun, et al. Distribution of sedimentary system multi-controlled by palaeo-geomorphology, water system and break during the deposition of Pinghu Formation, Baochu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 771-779.
- [5] 陈忠云, 杜学斌, 李帅. 东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组沉积体系平面分区特征及差异性展布[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 780-789.
CHEN Zhongyun, DU Xuebin, LI Shuai. Distributional signatures of depositional system of Pinghu Formation, Pinghu slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 780-789.
- [6] 张武, 肖晓光, 苗清, 等. 西湖凹陷中北部花港组优质储层主控因素及强溶蚀区预测[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 597-607.
ZHANG Wu, XIAO Xiaoguang, MIAO Qing, et al. Main controlling factor of high quality reservoir and prediction of strong dissolution area in Huagang Formation, north-central Xihu Sag,

- East China Sea[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2019, 46(5): 597-607.
- [7] 钟韬, 张武, 苗清. 东海西湖凹陷中北部花港组砂岩异常高孔带特征及成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018, 45(4): 478-486.
- ZHONG Tao, ZHANG Wu, MIAO Qing. Characteristics and Genesis of anomalously high porosity zones in the Huagang Formation sandstones in Xihu Sag, East China Sea[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2018, 45(4): 478-486.
- [8] 张武, 蒋一鸣, 肖晓光, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷中北部花港组储层致密化过程分析[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 86-95.
- ZHANG Wu, JIANG Yiming, XIAO Xiaoguang, et al. Densification process of Huagang Formation in northern and central Xihu Sag of East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(1): 86-95.
- [9] 刘欢, 许长海, 申雯龙, 等. 东海陆架盆地丽水凹陷构造演化特征[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 949-957.
- LIU Huan, XU Changhai, SHEN Wenlong, et al. Tectonic evolution characteristics of Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 949-957.
- [10] 高梦天, 陆永潮, 杜学斌, 等. 致密砂岩多因子储层精细分级评价方法——以东海盆地西湖凹陷渐新统花港组上段H3砂组为例[J]. 石油实验地质, 2021, 43(6): 1097-1106.
- GAO Mengtian, LU Yongchao, DU Xuebin, et al. Multi-factor evaluation for fine grading of tight sandstone reservoirs: a case study from H3 sand group in the upper section of Oligocene Huagang Formation, Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(6): 1097-1106.
- [11] 周荔青, 江东辉, 张尚虎, 等. 东海西湖凹陷大中型油气田形成条件及勘探方向[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 803-812.
- ZHOU Liqing, JIANG Donghui, ZHANG Shanghu, et al. Formation conditions and exploration direction of large and medium oil and gas reservoirs in Xihu Sag, East China Sea[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 803-812.
- [12] 张国华, 张建培. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 260-270.
- ZHANG Guohua, ZHANG Jianpei. 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.
- [13] 徐国盛, 徐芳良, 袁海锋, 等. 西湖凹陷中央反转构造带花港组致密砂岩储层成岩环境演变与孔隙演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(4): 385-395.
- XU Guosheng, XU Fanggen, YUAN Haifeng, et al. Evolution of pore and diagenetic environment for the tight sandstone reservoir of Paleogene Huagang Formation in the central reversal structural belt in Xihu Sag, East China Sea[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(4): 385-395.
- [14] 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 Zhiyuan, XU Zhixing, XU Guosheng, 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.
- [15] 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 Huagang Formation of the central inverted structural belt in Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 98-109.
- [16] 李顺利, 李竞, 陈彬滔, 等. 西湖凹陷渐新统花港组大型沿岸砂坝沉积特征及主控因素[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 493-503.
- LI Shunli, LI Jing, CHEN Bintaotao, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of large-scale longshore bar in the Oligocene Huagang Formation, Xihu Sag[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(3): 493-503.
- [17] ZHANG Jingyu, LU Yongchao, KRIJGSMAN W, et al. Source to sink transport in the Oligocene Huagang Formation of the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 733-745.
- [18] 刘贤, 葛家旺, 赵晓明, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷渐新统花港组年代标尺及层序界面定量识别[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 990-1004.
- LIU Xian, GE Jiawang, ZHAO Xiaoming, et al. Time scale and quantitative identification of sequence boundaries for the Oligocene Huagang Formation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 990-1004.
- [19] 李天军, 黄志龙, 郭小波, 等. 东海盆地西湖凹陷平北斜坡带平湖组煤系原油地球化学特征与油-源精细对比[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 432-444.
- LI Tianjun, HUANG Zhilong, GUO Xiaobo, et al. Geochemical characteristics of crude oil from coal measure source rocks and fine oil-source correlation in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 432-444.
- [20] 蒋一鸣, 邹玮, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷中新世末反转背斜构造成因机制: 来自基底结构差异的新认识[J]. 地球科学, 2020, 45(3): 968-979.
- JIANG Yiming, ZOU Wei, LIU Jinshui, et al. Genetic mechanism of inversion anticline structure at the end of Miocene in Xihu Sag, East China Sea: A new understanding of basement structure difference[J]. Earth Science, 2020, 45(3): 968-979.

- [21] 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, 16(1): 86-93.
SONG Xiaoyong, CHU Chenglin, RUI Zhifeng. Structural framework and evolution of Xihu Sag in East China Sea Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1): 86-93.
- [22] LI Chunfeng, ZHOU Zuyi, GE Heping, et al. Rifting process of the Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Tectonophysics, 2009, 472(1/4): 135-147.
- [23] 沈伟锋, 于仲坤, 刁慧, 等. 西湖凹陷热流演化史模拟及成藏意义[J]. 中国海上油气, 2020, 32(1): 42-53.
SHEN Weifeng, YU Zhongkun, DIAO Hui, et al. Simulation of heat flow evolution history in Xihu Sag and its significance for hydrocarbon accumulation [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(1): 42-53.
- [24] 徐陈杰, 叶加仁, 刘金水, 等. 东海西湖凹陷平湖组Ⅲ型干酪根暗色泥岩生排烃模拟[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(2): 359-366.
XU Chenjie, YE Jiaren, LIU Jinshui, et al. Simulation of hydrocarbon generation and expulsion for the dark mudstone with type-Ⅲ kerogen in the Pinghu Formation of Xihu Sag in East China Sea Shelf Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 359-366.
- [25] 徐国盛, 崔恒远, 刘勇, 等. 东海盆地西湖凹陷古近系花港组砂岩储层致密化与油气充注关系[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 20-29.
XU Guosheng, CUI Hengyuan, LIU Yong, et al. Relationship between sandstone reservoirs densification and hydrocarbon charging in the Paleogene Huagang Formation of Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 20-29.
- [26] 刘勇, 徐国盛, 曾兵, 等. 东海盆地西湖凹陷花港组储层孔隙演化与油气充注关系[J]. 石油实验地质, 2018, 40(2): 168-176.
LIU Yong, XU Guosheng, ZENG Bing, et al. Relationship between porosity evolution and hydrocarbon charging in tight sandstone reservoirs in Oligocene Huagang Formation, Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(2): 168-176.
- [27] 周心怀, 徐国盛, 崔恒远, 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裂缝发育特征与油气成藏关系[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 462-475.
ZHOU Xinhui, XU Guosheng, CUI Hengyuan, et al. Fracture development and hydrocarbon accumulation in tight sandstone reservoirs of the Paleogene Huagang Formation in the central reversal tectonic belt of the Xihu Sag, East China Sea [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 462-475.
- [28] 陈智远, 徐志星, 陈飞, 等. 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, CHEN Fei, et al. Coupling of abnormal overpressure and hydrocarbon charging: A case from the Huagang and Pinghu formations of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(2): 186-194.
- [29] 赖生华, 麻建明, 廖林. 缅甸中央沉降带Chindwin盆地油气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2005, 25(11): 21-24.
LAI Shenghua, MA Jianming, LIAO Lin. The oil-gas exploration potential of Chindwin Sag in the central basin in Burma [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(11): 21-24.
- [30] 杨磊. 缅甸D区块油气成藏条件分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 14-64.
YANG Lei. Analysis of hydrocarbon accumulation conditions in D areas of Myanmar [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 14-64.
- [31] 王营, 辛仁臣. 缅甸含油气盆地群形成演化及其地球动力学背景[J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 27-35, 48.
WANG Ying, XIN Renchen. Evolution and geodynamic background of Myanmar petroliferous basin group [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(1): 27-35, 48.
- [32] 黄众, 胡孝林, 郭刚, 等. 苏门答腊裂谷盆地构造分带及其成藏模式[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 61-67.
HUANG Zhong, HU Xiaolin, GUO Gang, et al. Structural zonation and hydrocarbon accumulation model of the Sumatra back arc rift basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(8): 61-67.
- [33] 田鑫. 印尼南苏门答腊盆地油气成藏规律研究及油气藏精细勘探[D]. 成都: 成都理工大学, 2016: 10-56.
TIAN Xin. Study of the hydrocarbon accumulation rules and fine exploration of hydrocarbon reservoirs of South Sumatra Basin, Indonesia [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016: 10-56.
- [34] 杨磊. 中苏门答腊盆地石油地质特征与油气勘探潜力[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 329-331.
YANG Lei. Petroleum geology and exploration potential analysis in central Sumatra Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(3): 329-331.
- [35] RODRIGUEZ N D, PAUL PHILIP R. Productivity and paleoclimatic controls on source rock character in the Aman Trough, north central Sumatra, Indonesia [J]. Organic Geochemistry, 2012, 45: 18-28.
- [36] LUNT P. Partitioned transtensional Cenozoic stratigraphic development of North Sumatra [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 106: 1-16.
- [37] 张国华, 刘金水, 秦兰芝, 等. 西湖凹陷渐新统花港组大型辫状河沉积体系特征[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 10-18.
ZHANG Guohua, LIU Jinshui, QIN Lanzhi, et al. Characteristics of the large braided river depositional system of the Oligocene Huagang Formation in the Xihu Sag [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(3): 10-18.
- [38] 蒋一鸣, 邵龙义, 李帅, 等. 西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积

- 体系及层序地层研究[J]. 现代地质, 2020, 34(1): 141-153.
- JIANG Yiming, SHAO Longyi, LI Shuai, et al. Deposition system and stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu tectonic belt, Xihu Sag[J]. Geoscience, 2020, 34(1): 141-153.
- [39] 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 Xinhuai, 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.
- [40] 杨风丽, 王敏雪, 庄建建, 等. 西湖凹陷反转构造定量运动学过程及对油气的控制作用[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 596-601.
- YANG Fengli, WANG Minxue, ZHUANG Jianjian, et al. Kinematical processes of inversion structure and its contribution to hydrocarbon accumulation in Xihu Depression of East China Sea Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 596-601.
- [41] WANG Yingxun, CHEN Jianfa, PANG Xiongqi, et al. Hydrocarbon generation and expulsion of tertiary coaly source rocks and hydrocarbon accumulation in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 229: 105170.
- [42] QIAN Wendao, SUN Qiliang, JONES S J, et al. Diagenesis and controlling factors of Oligocene Huagang Formation tight sandstone reservoir in the south of Xihu Sag, the East China Sea Shelf Basin [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 215 (Part A): 110579.
- [43] XU Fanghao, XU Guosheng, LIU Yong, et al. Factors controlling the development of tight sandstone reservoirs in the Huagang Formation of the central inverted structural belt in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 101-113.
- [44] WANG Wenguang, LIN Chengyan, ZHANG Xianguo, et al. Provenance, clastic composition and their impact on diagenesis: A case study of the Oligocene sandstone in the Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 126: 104890.
- [45] 胡明毅, 沈娇, 胡蝶. 西湖凹陷平湖构造带平湖组砂岩储层特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 185-191.
- HU Mingyi, SHEN Jiao, HU Die. Reservoir characteristics and its main controlling factors of the Pinghu Formation in Pinghu structural belt, Xihu Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 185-191.
- [46] 戴金星. 各类烷烃气的鉴别[J]. 中国科学: 化学, 1992(2): 185-193.
- DAI Jinxing. Identification of various types of alkane gases [J]. Scientia Sinica (Chimica), 1992(2): 185-193.
- [47] 沈平, 申歧祥, 王先彬, 等. 气态烃同位素组成特征及煤型气判识[J]. 中国科学: 化学, 1987(6): 647-656.
- SHEN Ping, SHEN Qixiang, WANG Xianbin, et al. Isotopic composition characteristics of gaseous hydrocarbons and identification of coal type gas [J]. Scientia Sinica (Chimica), 1987(6): 647-656.
- [48] 庞雄奇. 判别混源气母质转化程度的定量模式及其应用[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 16-20.
- PANG Xiongqi. The quantitative identification model of the evolution degree of mixing natural gas source material and the application of this model [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 16-20.
- [49] 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨[J]. 石油学报, 1985, 6(2): 31-38.
- DAI Jinxing, QI Houfa, SONG Yan. Preliminary discussion on several indicators for distinguishing coal formed gas and oil formed gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 1985, 6(2): 31-38.
- [50] 程熊, 侯读杰, 赵喆, 等. 西湖凹陷天然气成因及来源分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 50-60.
- CHENG Xiong, HOU Dujie, ZHAO Zhe, et al. Analysis on the genesis and source of natural gas in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 50-60.

(编辑 张亚雄)