

张 宙, 赵 洪, 罗仁春, 等. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带花港组盖层特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(10): 50-56.

东海盆地西湖凹陷中央反转构造带花港组盖层特征

张 宙¹, 赵 洪¹, 罗仁春², 张 武¹, 朱虹浩¹

(1 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335; 2 中海油销售上海有限公司, 上海 200335)

摘 要:针对西湖凹陷中央反转构造带花港组盖层封闭机制及影响因素不明确现状,采用岩心观察、镜下观察、X 衍射、岩性特征分类及成岩演化等方法进行盖层有效性因素分析,并在此基础上进行了突破压力试验与分析。沉积影响因素分析表明,中央反转构造带花港组泛滥平原相盖层总厚度最大,分流间湾相次之,水道间微相最小;成岩作用研究表明,压实、胶结与交代作用为建设性成岩作用,溶蚀与泥质收缩作用为破坏性作用,不同成岩作用在不同深度下对孔隙发育的影响程度不同,直接影响了盖层的封闭能力。研究区泛滥平原相为最有利的盖层发育沉积相,胶结与压实作用为最有利的成岩作用。结合盖层岩性与突破压力的分布特征,建立了研究区盖层 4 级评价标准。

关键词:盖层; 突破压力; 沉积成岩; 西湖凹陷; 东海盆地

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.066

0 引言

西湖凹陷中央反转构造带花港组不同级别盖层的封闭机制及地质影响因素尚未完全明确,为东海油气勘探研究带来困扰。近 20 年来,针对油气盖层的研究向着沉积学、层序地层学、岩石矿物学、流体岩石相互作用理论等多学科方向发展。吕延防等^[1]、付广等^[2]进行了超压盖层定量评价的研究;黄劲松等^[3]、李建民等^[4]在多参数盖层评价方法等方面进行了系统分析;吴世祥等^[5]、张军涛等^[6]开展了盖层水岩作用方面的研究。针对西湖凹陷中央反转构造带花港组也有大量相关研究,如王存武等^[7]研究了盖层条件及其对油气藏的控制作用;赵洪等^[8]针对砂岩作为盖层的可能性进行了探索;熊斌辉、张银国、苏奥等^[9-11]对西湖凹陷盖层在成藏作用过程中的有效性进行了相关分析。前期的研究大多关注盖层的分布及封闭油气的有效性,对于

盖层的封闭机制与盖层的地质影响因素的研究略显不足。本次研究在对盖层的沉积影响因素分析的基础上开展盖层沉积与厚度的影响因素分析,通过在胜利油田地质科学研究院进行突破压力测试分析(温度精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 围压精度 $\pm 0.5\%$ FS, 流体压力精度 $\pm 0.5\%$ FS),开展了盖层类型划分及评价,探索西湖凹陷中央带花港组不同盖层的有效性。

1 区域概况

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部坳陷带(图 1),其北部与南部分别与福江凹陷和钓北凹陷相接,西部靠近海礁隆起,东部与钓鱼岛隆褶带相邻,总体呈 NNE 走向,是中国东部海域中规模最大的新生代含油气凹陷^[12]。

西湖凹陷自西向东可以划分为西部斜坡带、中央反转构造带及东部断阶带 3 个构造单元。自下向上发育始新统平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组及柳浪组,上新统三潭组及更新统东海群。

2 西湖凹陷花港组盖层特征

前人研究表明,西湖凹陷自下而上分为 3 大构

收稿日期: 2020-06-02

资助项目: “十三五”国家科技重大专项“东海深层低渗-致密天然气勘探开发技术”(2016ZX05027001)

作者简介: 张 宙(1986—),男,硕士,工程师,主要从事地质勘探综合研究

工作。E-mail: zhangzhou@cnooc.com.cn

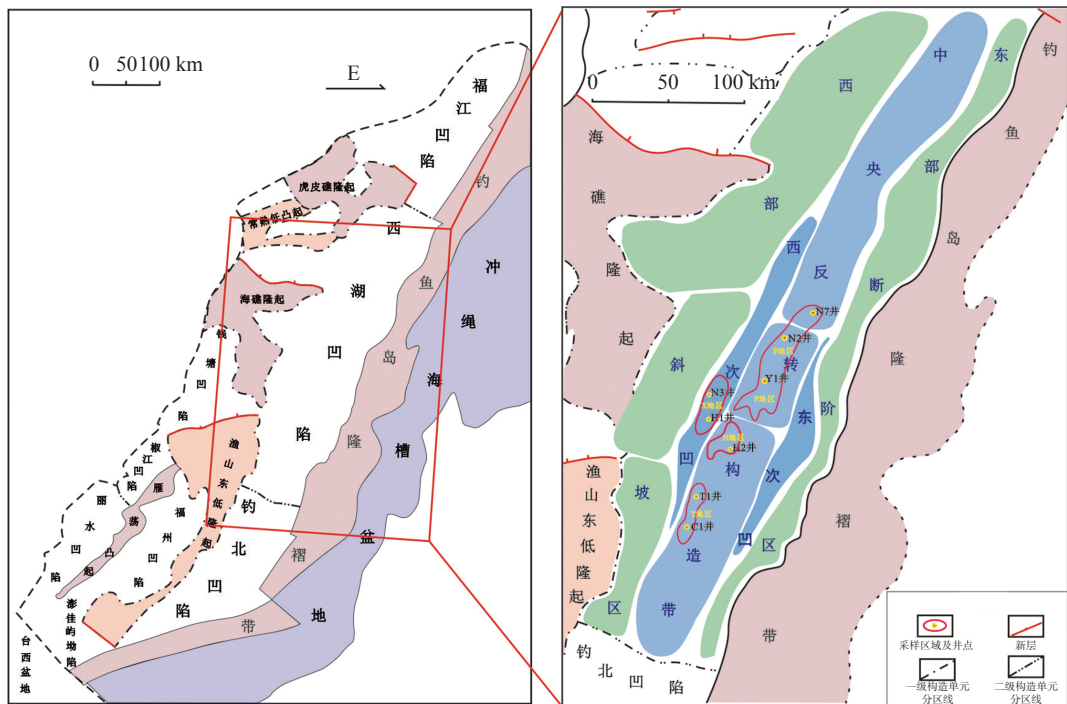


图 1 西湖凹陷区域构造格局、采样钻井位置示意图

Fig.1 Regional tectonic map with location of drilling holes and sections in the Xihu Sag

造层: 裂陷、坳陷和区域沉降构造层, 其中花港组属区域沉降构造层^[13]。花港组以 H5 砂层组底为界分为花下段和花上段 2 个三级层序。花下段层序的低位期各砂组主要填充在中央反转构造带和东、西次凹, 向东、西斜坡带具有明显的超覆减薄特征, 低位期以低辫状河沉积体系为主, 湖扩+高位期以滨岸沼泽平原和浅水洼地沉积为特征; 花上段低位期仅发育在中央反转构造带和东、西次凹中, 以低辫状河沉积体系为主。湖扩和高位期覆盖了整个凹陷, 以浅水湖泊、湖泊三角洲沉积体系为主。

西湖凹陷花港组盖层存在砂泥岩互层和纯泥岩盖层 2 种岩性组合方式, 分别对应花港组上、下 2 套储盖组合。上组合为花港组上段 H1、H2 段砂泥岩互层盖层和以 H3 段为储层的储盖组合, 此盖层以三角洲平原泛滥平原微相为主, 砂岩厚度薄, 泥质含量高; 下组合为花港组中下部纯泥岩盖层及下伏砂岩储盖组合, 此盖层主要为三角洲前缘分流间湾相, 泥质较纯, 厚度薄, 分布不均, 连续性差。根据西湖凹陷盖层覆盖范围、厚度和对油气的封盖作用的强弱, 西湖凹陷花港组盖层在分布上可以划分为区域性盖层、局部盖层和隔夹层 3 个级别。

区域性盖层为在全凹陷地区广泛连续分布的

盖层, 花港组上段顶部泥岩在中央坳陷带、西次凹分布范围广, 其泥岩累计厚度约为 200 m 以上, 钻井已证实封盖油气柱高度大, 是西湖凹陷花港组最主要的盖层(图 2)。

局部盖层主要覆盖在构造带局部或单个构造范围内, 盖层厚度不大, 主要分布于花港组 H4 及以下砂层组之间, 以纯泥岩、粉砂质泥岩为主。在中央反转构造带及西次凹普遍发育, 但厚度不均, 具有较强的油气层封盖能力。如西湖凹陷中央反转构造带中北部花港组局部盖层主要分布在花上段 H4—H5 与 H5—H6 砂层组之间, 平均地层厚度为 50~100 m, 泥岩累计厚度为 20~50 m。

隔夹层为沉积作用形成的厚度较薄的盖层, 对局部油气层起到封闭作用。西湖凹陷花港组隔夹层主要分布在 H3 以下各砂层组内, 泥质含量高, 封闭能力强, 但厚度薄, 单层泥岩厚度为 5~10 m。

3 盖层封闭能力的地质影响因素

在不考虑断层和裂缝发育的条件时, 盖层封闭能力的主要影响因素包括沉积和成岩作用 2 个方面。沉积作用主要控制了盖层的粒度、矿物组成、

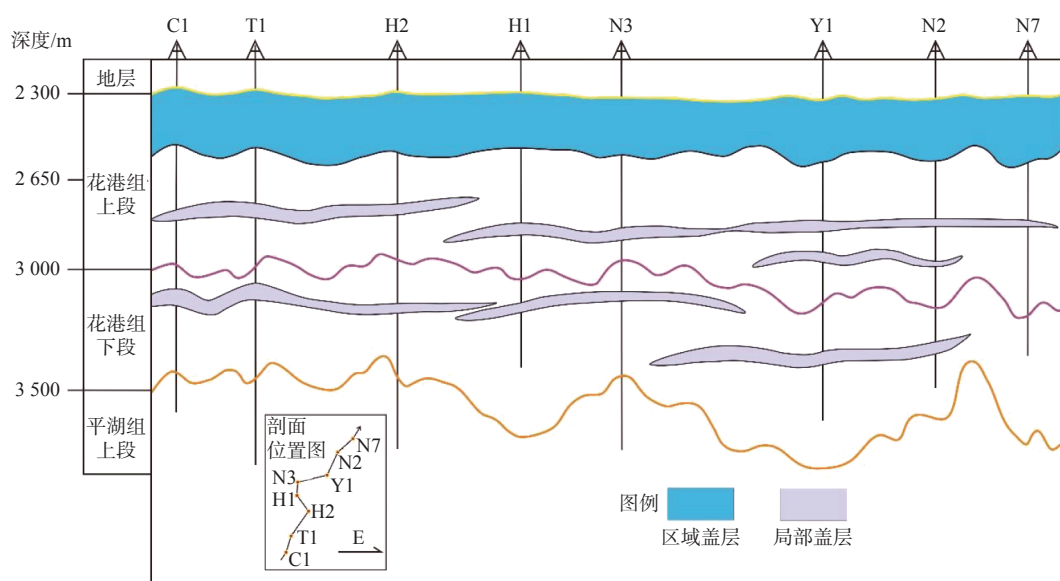


图2 西湖凹陷中央反转构造带盖层分布模式图

Fig.2 Distribution pattern of caprock in the central inverted structural belt of Xihu Sag

厚度等先天条件^[14]；而成岩作用主要通过盖层的埋深、温度、压力、成岩演化等控制盖层演化过程^[15]。

3.1 沉积影响因素

西湖凹陷中央反转构造带花港组主要为辫状河三角洲—湖泊沉积，其中花上段主要发育辫状河三角洲平原亚相和湖相泥岩，花下段主要发育辫状河三角洲前缘亚相。盖层主要为辫状河三角洲平原之上的水下分流间湾、沼泽及湖相泥岩沉积^[16]。

湖相泥岩沉积岩性较复杂，主要以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主，具少量细砂岩，砂泥互层，单层泥岩厚度较小。西湖凹陷中央反转构造带湖相泥岩盖层在 H1—H2 砂层组广泛分布，且厚度大，平均地层厚度 > 300 m，最大厚度达 500 m，泥地比为 31.88%~54.75%，平均 43.47%，是花港组最主要的一套区域盖层。

水下分流间湾—沼泽沉积岩性以泥岩为主，砂质含量较少且夹薄层细砂岩，盖层厚度较大，构造范围内连续发育。分流间湾微相盖层在花港组 H4 及以下地层均有发育，盖层厚度为 50~200 m，泥地比为 39%~85.5%，平均 61.36%，是局部盖层的主要微相类型。

不同沉积微相对盖层的厚度、岩性组合等有着明显的控制作用^[17]，相对来讲，湖相泥岩盖层总厚度大，水下分流间湾—沼泽沉积盖层总厚度较小。

3.2 成岩作用影响因素

泥质岩在成岩过程中，经历了不同于碎屑岩与碳酸盐岩的成岩演化历程。成岩作用类型与强度关系到岩石的孔隙发育和物性参数等，间接影响盖层的封闭能力。

3.2.1 建设性成岩作用

(1) 压实作用

压实作用在泥质岩中的镜下表现不如碎屑岩中明显，主要是因为泥质岩中的矿物颗粒相对更细，黏土矿物、长英质矿物等在压实作用下的变化镜下较难识别^[18]。研究区存在的压实作用的主要证据有：①条形有机质、片状云母、黏土矿物等塑性物质定向排列；②石英、长石、岩屑等刚性碎屑颗粒被压碎、破裂；③相邻颗粒之间显示很紧密的线-线或凹凸接触关系(图 3a-b)。

压实作用对孔隙发育的控制体现在 2 个方面：①压实作用的强度直接决定了粒间孔的大小，压实越强，粒间孔越小，喉道越窄；②压实过程中导致脆性矿物破裂，产生一部分新的微孔隙。然而，总体来看，前者的影响远大于后者。

(2) 胶结作用

花港组盖层的胶结作用主要包括黏土矿物脱水后向长英质矿物颗粒表面沾附，形成黏土包壳(图 3c)，或者黏土以粒间充填物形式胶结颗粒粒间孔；石英加大边的普遍发育；铁质和泥质的混合物

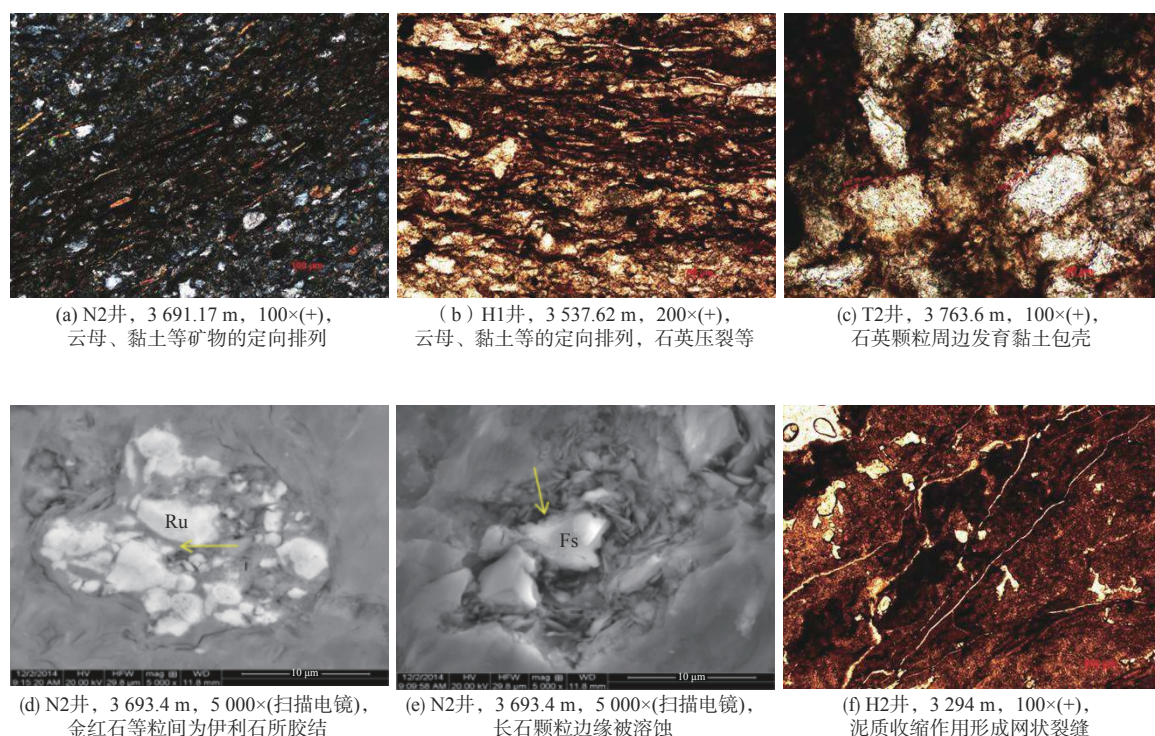


图3 盖层泥岩镜下特征

Fig.3 Microscopic characteristics of the mudstone in caprock

等对裂缝的部分充填作用(图3d);少量深处的样品有钙质胶结,但不普遍。

(3) 交代作用

研究区的交代作用多见于粉砂质含量较高的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、含泥粉砂岩中,交代类型一般为长石、岩屑被泥质、黄铁矿及碳酸盐胶结物等交代,判断标志为交代残余边或矿物假象^[19]。交代作用对岩石物性的影响通常较小,具体取决于交代物与被交代物的矿物组成占比。因此,不同类型的交代作用对孔隙发育影响机制较为复杂,总体上花港组交代作用表现为降低孔隙发育程度,但影响不大。

3.2.2 破坏性成岩作用

(1) 溶蚀作用

泥质岩中的石英、长石等碎屑颗粒、方解石、白云石等碳酸盐岩颗粒及含量较少的云母、岩屑颗粒在适宜条件下可以发生不同程度的溶蚀作用。通过薄片及扫描电镜观察,泥质岩中的溶蚀作用主要为长石、岩屑、石英等碎屑颗粒的完全—不完全溶蚀(图3e),亦具少量的碳酸盐岩颗粒以及黄铁矿与金红石等副矿物的溶蚀作用。判断标志为颗粒的港湾状边界、纤细状矿物残留等^[20]。

溶蚀作用可以形成粒内或粒间的溶蚀孔隙,提高

了岩石的孔渗性,改善了岩石物性,但对于研究区而言,盖层封闭能力随着溶蚀作用的增强而明显降低。

(2) 泥质收缩作用

根据成因、矿物成分等影响因素的不同,研究区的泥质收缩分为“纺锤形”“矩形”“卷曲型”“网状”等^[21]。泥质收缩作用属于水下泥岩收缩作用,多呈网状分布(图3f),由于收缩过程中矿物分布不均使网格边缘颜色比内部深,这也是泥质收缩作用的一种鉴别特征。泥质收缩作用主要发育在泥质含量较高的岩相中,收缩作用产生的裂缝导致盖层封盖能力变差。

西湖凹陷中央反转带不同地区之间成岩指标存在一定差异。F地区主要岩相类型为块状含粉砂泥岩、块状粉砂质泥岩和块状泥质粉砂岩,成岩作用类型主要为胶结、压实、交代、溶蚀和收缩作用等,前两者有利于盖层封闭;H地区主要岩相类型为块状粉砂质泥岩,其次为块状泥质粉砂岩、块状泥岩和纹层状泥质粉砂岩,成岩作用类型主要为胶结、压实和交代作用,溶蚀作用较少,前两者有利于盖层封闭;T地区主要岩相类型为块状泥质粉砂岩和块状粉砂质泥岩,存在的成岩作用类型主要为胶结、压实、交代和溶蚀作用等,前两者有利于盖层封闭。

4 盖层封闭机制

统计资料表明,中央反转带花港组 4 000 m 以浅的泥岩 $\text{TOC} < 0.25\%$, $R_o < 0.8\%$, 烃源岩质量较差,且尚未达到大规模生气阶段。仅花港组底部和平湖组具备生烃能力,且正处于生烃过程中,具有烃浓度封闭。因此,在西湖凹陷花港组主要盖层的封闭机制为物性封闭,本文以研究盖层物性封闭能力为主。

4.1 突破压力与深度

深度与成岩阶段基本成对应关系,随着深度增加,对应不同的成岩阶段,岩石孔渗性下降,封闭性增强^[22]。样品主要集中在 2 500~4 500 m, 4 000 m 以上样品点分布较分散,规律性不强,尤其是 F 地区,同一深度下,突破压力从小到大有分布。4 000~4 500 m 样品点集中在趋势线附近(图 4),突破压力与深度相关性较好。

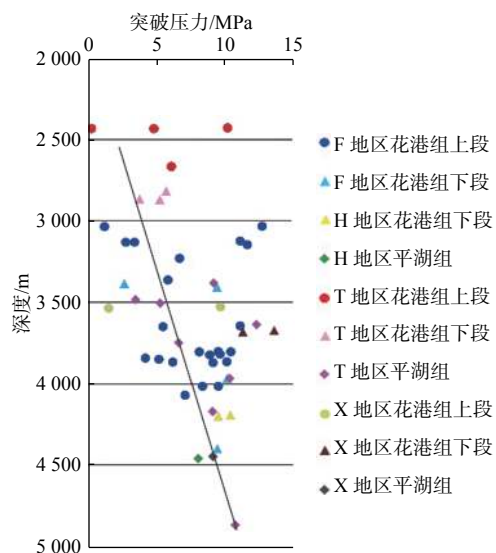


图 4 突破压力-深度-地区关系图

Fig.4 Breakthrough pressure and its relationship with depth in different regions

4.2 突破压力与岩性

突破压力受盖层的粒度的影响,粒度越粗突破压力越低,岩性是反应粒度的重要因素^[23]。通过实验分析表明,研究区泥岩和细—极细粉砂岩的突破压力底界为 8 MPa;泥质中粉砂岩的底界为 4 MPa;泥质粗粉砂岩和含泥粗粉砂岩的底界为 2 MPa。不

同岩性的突破压力存在明显的差别(图 5)。

根据突破压力、深度与岩性分布图(图 5),结合镜下观察结果得出,块状泥质细—极细粉砂岩和纹层状粉砂质泥岩突破压力普遍较高,且随深度增加变化不明显,封盖能力最好;纹层状含泥—泥质粗粉砂岩、泥质中粉砂岩随深度增加突破压力存在升高的趋势,封盖能力较好。

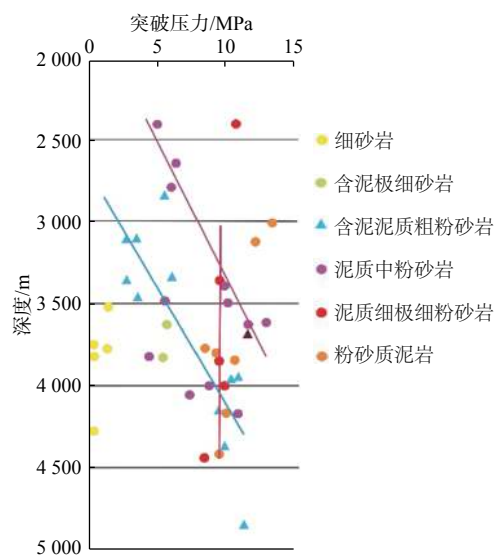


图 5 突破压力-深度-岩性关系图

Fig.5 Breakthrough pressure and its relationship with depth and lithology

4.3 突破压力与物性

突破压力、渗透率与有效孔隙有较好的相关性;突破压力与孔隙度具有较好的指数关系;突破压力与渗透率具有很好的函数关系,且突破压力与渗透率相关性更为密切;不同层位突破压力均与孔渗性存在较好相关性(图 6)。

不同地区突破压力均随渗透率和孔隙度增大而减小(图 7),X 地区和 H 地区孔渗性普遍较差,导致突破压力较高;F 地区中北部和 T 地区突破压力与渗透率和孔隙度呈函数关系,T 构造区与中央反转构造带中北部地 F 区相比,在具有相同孔隙度的条件下,突破压力普遍较高。

4.4 封闭能力分级评价

为了便于研究和后续的综合评价,根据样品突破压力分级,结合储层排替压力分布,本文建立了研究区盖层封盖性评价标准。

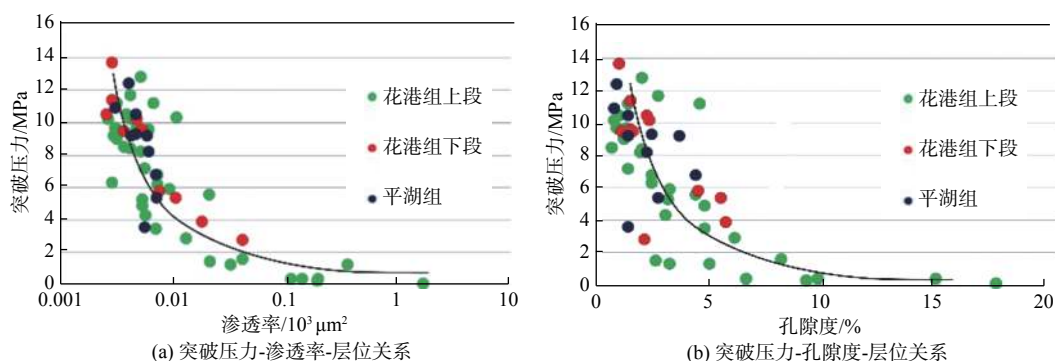


图 6 物性与突破压力关系

Fig.6 Relationship between physical properties and breakthrough pressure

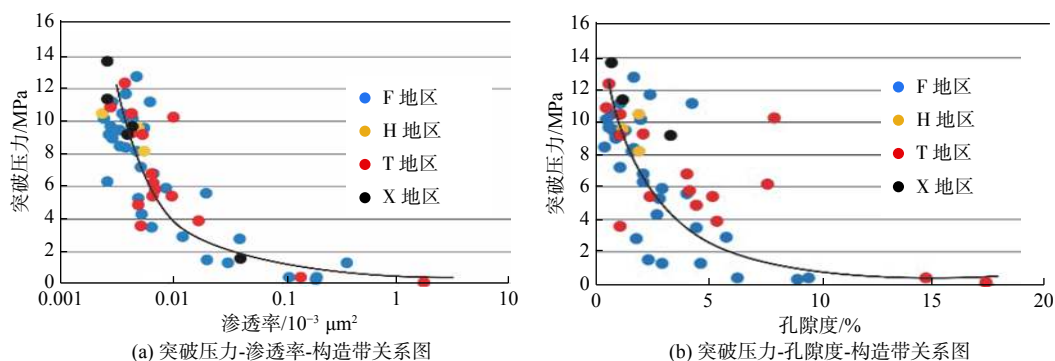


图 7 物性与突破压力关系

Fig.7 Relationship between physical properties and breakthrough pressure

储层中排替压力 $< 2 \text{ MPa}$ 频率为 80%; $< 4 \text{ MPa}$ 频率为 95%; $< 8 \text{ MPa}$ 频率为 99%。因此,具有 2 MPa 突破压力的盖层可以封住大部分油气,具有一定的封闭能力;具有 4 MPa 突破压力的盖层具备相当的封闭能力;而具有 8 MPa 突破压力的盖层可以完全封盖所有油气,在盖层不受破坏的情况下油气只能以扩散的形式逸散。

综合盖层岩性与突破压力的分布特点,将封盖性能划分为 4 个等级: I 级突破压力值 $> 8 \text{ MPa}$,为 I 类盖层; II 级突破压力值 $4 \sim 8 \text{ MPa}$,为 II 类盖层; III 级突破压力值 $2 \sim 4 \text{ MPa}$,为 III 类盖层; IV 级突破压力值 $1 \sim 2 \text{ MPa}$,为 IV 类盖层。根据突破压力的分级,并结合突破压力与物性、孔径、含油气性、电性关系认为 I 类为最好的盖层, II 类为好盖层, III 类为中等盖层, IV 类为差盖层,无法封堵油气。

5 结论

(1) 从沉积作用来看,研究区湖相泥岩岩性较

为复杂,但总厚度大,可作为区域盖层;水下分流间湾—沼泽微相泥岩含量相对较高,但厚度较小,可作为局部盖层。从成岩作用来看,盖层封闭性随埋深的增加,不同成岩类型的孔隙发育强度不同。研究区花港组盖层成岩作用类型主要为胶结、压实、交代、溶蚀和收缩作用等。不同地区成岩指标存在一定差异,但胶结与压实作用均为最有效的盖层成岩作用,交代作用的影响相对较小。

(2) 综合储层特征及盖层岩性与突破压力的分布特点,对中央反转带花港组盖层的突破压力进行分级,同时结合突破压力与物性、孔径关系,建立了适合于研究区盖层的 4 级评价标准。

参考文献:

- [1] 吕延防,付广,张发强,等. 超压盖层封烃能力的定量研究[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 465-468.
- [2] 付广,王有功,苏玉平. 超压泥岩盖层封闭性演化规律及其研究意义[J]. 矿物学报, 2006, 56(4): 453-459.
- [3] 黄劲松,刘长国,牟广山. 贝尔凹陷大一段下部旋回泥岩盖层封闭能力综合评价[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(6): 19-24.

- [4] 李建民, 王树海. 贝尔凹陷布达特群潜山盖层封闭能力综合评价[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(3): 8-10, 36.
- [5] 吴世祥, 金之钧, 汤良杰. 盖层水岩相互作用研究及其油气地质意义: 以黔中隆起及周缘为例[J]. 地质学报, 2007, 81(8): 1110-1117.
- [6] 张军涛, 吴世祥, 李宏涛, 等. 川东南志留系泥岩盖层水岩相互作用的实验模拟及其研究意义[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 96-99, 104.
- [7] 王存武, 赵志刚, 张功成, 等. 东海西湖凹陷盖层条件及对油气藏的控制作用[J]. 海洋石油, 2013, 33(2): 22-27.
- [8] 赵洪, 秦兰芝, 王辉, 等. 砂岩在西湖凹陷花港组交互式盖层中的作用初探[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 43-51.
- [9] 熊斌辉, 张喜林, 张锦伟, 等. 西湖凹陷油气成藏的主控因素[J]. 海洋石油, 2008, 28(2): 14-24.
- [10] 张银国. 东海西湖凹陷花港组油气地质条件与油气分布规律[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 223-226.
- [11] 苏奥. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带油气成藏控制因素[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2014.
- [12] 李祥权, 刘金水, 陆永潮, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷花港组原型盆地性质厘定[J]. 地球科学, 2018, 43(2): 502-513.
- [13] 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.
- [14] 秦兰芝, 刘金水, 李帅. 东海西湖凹陷中央反转带花港组储层特征及物源指示意义[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 498-504.
- [15] 周雁, 金之钧, 朱东亚, 等. 油气盖层研究现状与认识进展[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 234-251.
- [16] 刘金水, 曹冰, 徐志星, 等. 西湖凹陷某构造花港组沉积相及致密砂岩储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(2): 130-136.
- [17] 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.
- [18] 付行, 杜学斌, 徐国盛, 等. 东海宁波构造带深层花港组砂岩储层致密性特征及控制因素[J]. 海洋石油, 2018, 38(1): 1-8.
- [19] 林承焰, 孙小龙, 马存飞. 西湖凹陷中央反转构造带花港组储层物性演化[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 820-829.
- [20] 俞俊杰, 范明, 刘伟新, 等. 盖层封闭机理研究[J]. 石油实验地质, 2011, 33(1): 91-95.
- [21] 吕延防, 张绍臣, 王亚明. 盖层封闭能力与盖层厚度的定量关系[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 27-30.
- [22] 赵洪, 蒋一鸣, 沈文超. 西湖凹陷花港组物源特征及对储层的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 65-72.
- [23] 高伟中, 孙鹏, 赵洪, 等. 西湖凹陷花港组深部储层特征及控制因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(4): 396-404.

CAPROCK OF THE HUAGANG FORMATION IN THE CENTRAL INVERSED STRUCTURAL ZONE OF XIHU SAG, EAST CHINA SEA BASIN

ZHANG Zhou¹, ZHAO Hong¹, LUO Renchun², ZHANG Wu¹, ZHU Honghao¹

(1 Shanghai Branch of CNOOC China Limited, Shanghai 200335, China; 2 CNOOC Marketing Shanghai Co. Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The sealing mechanism of the Huagang Formation caprock and its influencing factors in the central inverted structural belt of the Xihu Sag remain unclear up to date. In this paper, we used various methods, such as core observation, microscopic examination, X-ray diffraction, and the methods specially designed for study of lithology and diagenesis to assess the quality of a caprock and its influencing factors in order to know more about the caprock in the region. Breakthrough pressure testing was also made. The analysis of influencing factors suggests that the total thickness of the cover of flood plain facies in the Huagang Formation of the region belt is the largest, followed by the facies of the distributary bay, while the total thickness of the cover between waterways is the smallest. The study of diagenesis suggests that the diagenesis of compaction, cementation and metasomatism is constructive, while that of dissolution and shale contraction is destructive. Diagenesis has strong effects on the development of pores at different depths, which directly effects the sealing ability of the caprock. In the study area, the facies of flood plain is the most favorable facies, and cementation and compaction are the most favorable diagenesis for caprock development. Combined with the distribution characteristics of caprock and breakthrough pressure, a four-level system for caprock assessment is established in this paper.

Key words: caprock; breakthrough pressure; sedimentary diagenesis; Xihu Sag; East China Sea Basin