

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

高梦天^{1,2}, 陆永潮², 杜学斌³, 马义权⁴, 张靖宇^{2,3}, 邓 空^{2,3}

(1. 中海石油(中国)有限公司 海南分公司, 海口 570312;

2. 中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉) 海洋学院, 武汉 430074;

4. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059)

摘要: 东海盆地西湖凹陷西次渐新统花港组上段 H3 砂组为低孔低渗—低孔特低渗致密砂岩储层, 优质储层分布成为制约开发产能的关键问题。基于岩心、测井及物性测试等资料, 对该区进行了沉积微相刻画和储层物性分析, 结合构造、沉积微相发育特征, 对储层展开精细分级评价和优质储层预测。研究表明, H3 砂组储层分布主要受构造特征、沉积微相、砂体厚度和孔渗条件四个因素影响。在综合分析各因素与含气饱和度关系的基础上, 建立了受产能约束的四因子储层精细分级评价标准, 把 H3 砂组储层划分为“甜点”储层(I类)、中等储层(II类)和无效储层(III类)三种类型。优质储层预测研究区 H3-3 小层为可能的高产能力带, H3-1、H3-2 和 H3-4 小层次之。

关键词: 储层评价; 储层分级; H3 砂组; 花港组上段; 渐新统; 西湖凹陷; 东海盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

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

GAO Mengtian^{1,2}, LU Yongchao², DU Xuebin³, MA Yiquan⁴, ZHANG Jingyu^{2,3}, DENG Kong^{2,3}

(1. Hainan Branch, CNOOC, Haikou, Hainan 570312, China;

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education,

China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

3. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

4. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The H3 sand group of the upper section of the Oligocene Huagang Formation in the western sub-sag of the Xihu Sag of the East China Sea Continental Shelf Basin is a tight sandstone reservoir with low porosity and low or ultra-low permeability. The distribution of high-quality reservoirs has become a key factor restricting productivity. Based on coring, well logging and physical property test data, the sedimentary microfacies and physical properties of the H3 sand group were studied, and a fine grading evaluation and “sweet spot” prediction were carried out. The reservoir distribution in the H3 sand group was mainly affected by four factors: structural characteristics, sedimentary microfacies, sand thickness and conditions of porosity and permeability. Moreover, on the basis of comprehensive analysis of the relationship among these factors and gas saturation, a four-factor reservoir fine grading evaluation method was proposed. The H3 sand group reservoirs were divided into three types: “sweet spot” reservoirs (type I), medium reservoirs (type II) and ineffective reservoirs (type III). The H3-3 single sand layer has a great exploration potential, followed by the H3-1, H3-2 and H3-4 single sand layers.

Key words: reservoir evaluation; reservoir grading; H3 sand group; upper section of Huagang Formation; Oligocene; Xihu Sag; East China Sea Basin

东海盆地西湖凹陷渐新统花港组发育大量河道砂体储层,迄今探明储量近 1×10^{12} m³ 油当量,具有良好的油气勘探开发前景。但是,花港组主要发育低孔渗特征的致密砂岩储层,且非均质性较强^[1],前人已经对该储层发育机制展开过大量研究^[2-5],总结认为这种致密砂岩储层主要受强压实压溶和胶结作用影响,造成储层孔隙结构的严重破坏,从而限制了该地区的油气采收率。如何有效结合宏观与微观地质要素展开综合分析、进而建立产能与储层的关系、寻找油气高产带分布区显得至关重要。

致密砂岩储层分级评价是一个由宏观到微观、由定性到定量的过程。近年来已经有大量专家与学者对不同地区的致密砂岩储层展开过研究,并在优质储层分类评价及预测等方面取得了一定的成果。目前已受到广泛认可的储层分级评价方法可总结为 4 类:(1)将油气产能与储层物性参数统计相结合进行分级评价^[6-7];(2)利用压汞法测定的孔喉结构参数与聚类分析相结合进行分级评价^[8-11];(3)依据不同级别孔隙的相对含量进行分级评价^[8-9];(4)通过研究粒间孔对储层渗透率的贡献量进行分类评价^[14]。但是,上述方法均是针对储层的微观特性展开研究,却忽视了构造、沉积等宏观地质因素对储层质量的控制,存在很大的局限性。

本文基于测井、物性测试等资料,在西湖凹陷西次凹 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组构造和沉积微相等宏观因素的基础上,对沉积和物性特征进行定性分析与定量刻画,厘清了构造因素、微相类型、砂岩厚度和孔渗条件与含气饱和度的关系,提出了一套受产能约束的四因子储层精细分级评价方法,并对“甜点”储层分布进行了预测。

1 区域地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部拗陷带^[15],是一个在被动大陆边缘发育的新生代弧后含油气盆地^[16-20],其南、北分别与钊北凹陷和福江凹陷相接,西邻虎皮礁隆起、海礁隆起和渔山东低隆起,东以钓鱼岛褶皱带为界^[21-25](图 1a)。

1.1 构造发育情况

西湖凹陷构造格局总体为“两凹夹一隆”,并呈现“东西分带,南北分块”的构造特征^[26-27],自西向东分为五个二级构造单元:西部斜坡带、西次凹、中央反转构造带、东次凹和东部断阶带^[28-31]。

研究区 NB-1 构造位于西次凹,断裂走向整体

呈 NE 向,受后期断裂作用加剧影响,发育大量 NEE 向次级断裂。目的层花港组上段 H3 砂组沉积主要受 NE 向东部边界断层和中部断裂带两条主断层控制,向西断层整体不发育,仅在局部发育有少量次级断层(图 1b)。

1.2 沉积地层概况

西湖凹陷花港组为辫状河—三角洲—浅水湖泊体系沉积,存在 3 个主物源区(图 1a):(1)北部虎皮礁隆起,为主物源,以长距离搬运河道砂体为主,输砂量巨大且砂体宽而厚,单砂体最厚可超过 100 m;(2)西部海礁隆起,为点物源,砂体以近源河道和三角洲的形式聚集;(3)东部钓鱼岛褶皱带,为点物源,砂体在 4 个断层转换带中输入,对轴向物源砂体数量起到强化作用^[32-33]。

根据钻井资料,花港组共被划分为 12 个砂组(图 1c),目的层 H3 砂组砂体厚度较大,是花港组优质储集单元和重点研究层段。H3 砂组自下向上由 5 个单砂层组成,其中 H3-1 小层岩性为灰色、灰白色含砾粗砂岩、细砂岩和深灰色、灰黑色泥质粉砂岩,砂体累厚约 7~34 m;H3-2 小层岩性由灰色、灰白色含砾中砂岩、含砾细砂岩,深灰色、灰黑色粉砂岩和灰黑色泥岩组成,砂体累厚约 5~35 m;H3-3 小层岩性主要为深灰色粉砂岩和灰黑色泥岩,砂体累厚约 12~30 m;H3-4 小层岩性包括深灰色和灰黑色粉砂岩,砂体累厚约 32~45 m;H3-5 小层岩性为灰色、深灰色和灰黑色粉砂岩,砂体累厚约 13~37 m。

2 沉积特征

西湖凹陷西次凹 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组主要发育于虎皮礁隆起轴向主物源与东部钓鱼岛褶皱带点物源交会处的辫状河道(图 1a, b)。岩心和测井曲线响应特征分析表明,花港组上段 H3 砂组的沉积相类型包括辫状河相和湖泊相,辫状河相主要发育辫状河道亚相,湖泊相主要发育滨浅湖亚相。其中,辫状河道亚相包含河道滞留沉积微相、心滩微相和湖泛改造的心滩微相,滨浅湖相包含滨浅湖砂质滩坝微相和滨浅湖泥微相(图 2)。

2.1 河道滞留沉积微相

河道滞留沉积微相由灰色、灰白色中—厚层状砂砾岩、含砾粗砂岩组成,可见大量滞留砾石呈定向排列(图 2a),磨圆一般,分选较差,砾径介于 0.5~1 cm 之间,发育冲刷充填构造(图 2b),GR 曲线测井响应为中幅齿化漏斗形+箱形。

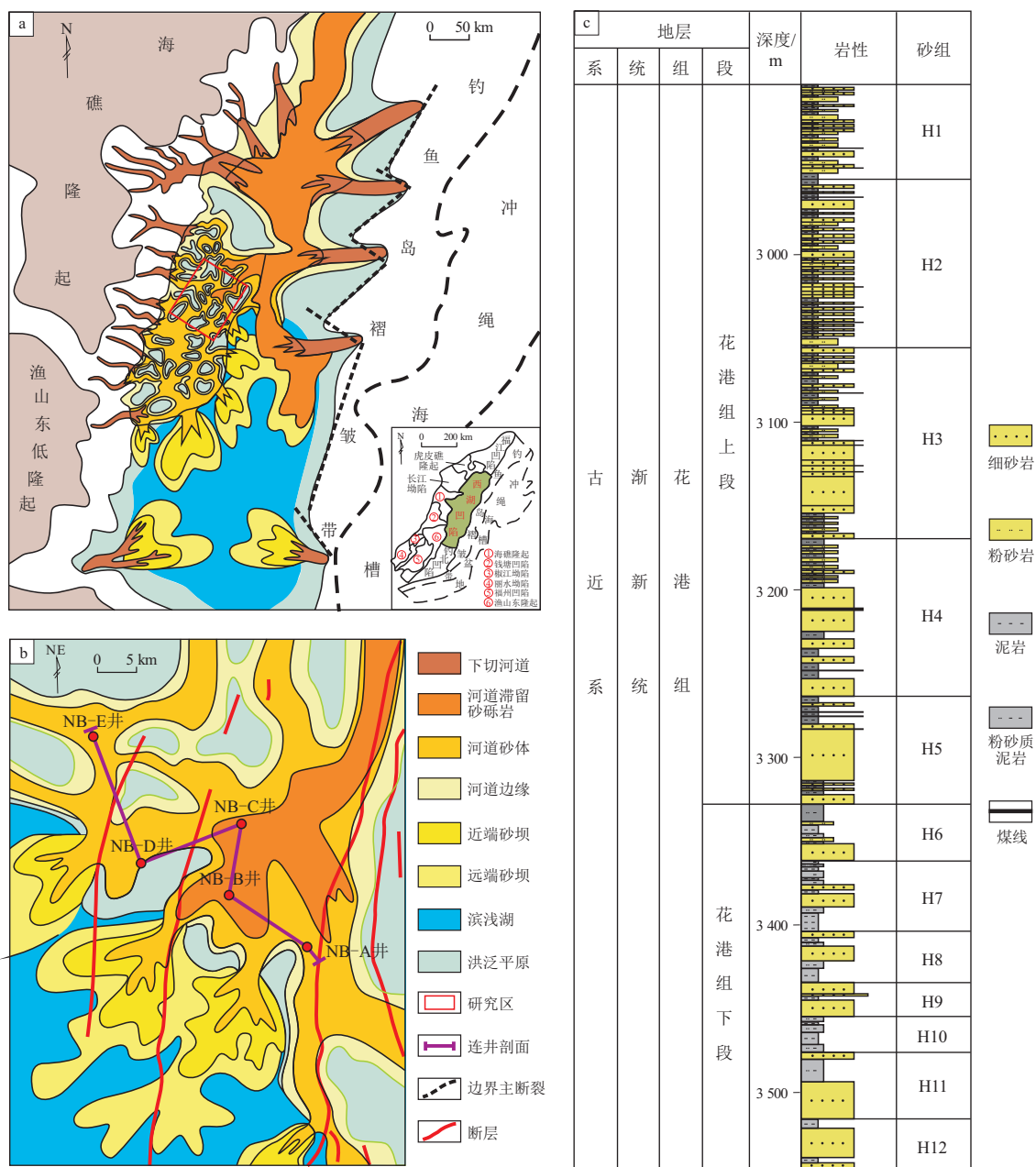


图 1 东海盆地西湖凹陷花港组构造区划(a)、古地理图(a,b)与地层柱状图(c)^[32]

Fig.1 Tectonic division (a), paleogeographic map (a, b) and stratigraphic column (c) of Huagang Formation in Xihu Sag, East China Sea Basin

2.2 心滩微相

心滩微相由灰色、灰白色中—厚层状中砂岩、细砂岩和灰黑色中—薄层状细砂岩组成,发育平行层理(图 2c)、低角度交错层理(图 2c)和板状交错层理(图 2d),GR 曲线测井响应为低幅齿化箱形+钟形。

2.3 湖泛改造的心滩微相

湖泛改造的心滩微相由灰色、灰黑色中—厚层状细砂岩、薄层状粉砂岩组成,可见大量泥质纹层,发育波纹交错层理(图 2e)和平行层理(图 2f),GR 曲线测井响应为钟形+漏斗形,该微相与一般的辫

状河道心滩砂体相比连续性较强。

2.4 滨浅湖砂质滩坝微相

滨浅湖砂质滩坝由浅灰色、灰色薄层状细砂岩、粉砂岩组成,发育波纹层理(图 2g)和平行层理,可见大量植物碎屑(图 2h),GR 曲线测井响应为指形。

2.5 滨浅湖泥微相

滨浅湖泥微相由灰黑色、黑色薄层状泥岩组成,泥岩层发育水平层理(图 2i),可见大量植物碎屑(图 2j),局部可见黄铁矿,GR 曲线测井响应为高幅齿形。

自然伽马/API	深度/m	岩性	岩性描述	测井相	沉积微相	沉积亚相	沉积相	典型照片
	4 332 4 350	NB-A井	灰色、灰白色中—厚层状砂砾岩、含砾粗砂岩，滞留砾石定向排列，磨圆一般，分选较差，粒径在0.5~1 cm，发育冲刷充填构造	漏斗形+箱形	河道滞留沉积	河道	辫状河	a 滞留沉积, NB-A井, 4 340.37 m b 冲刷充填构造, NB-B井, 4 333.25 m
	4 314 4 329	NB-A井	灰色、灰白色中—厚层状中砂岩、细砂岩和灰黑色中—薄层状细砂岩，发育平行层理、低角度交错层理和板状交错层理	箱形+钟形	心滩	河道	辫状河	c 下部发育低角度交错层理, 上部发育平行层理, NB-B井, 4 329.16 m d 板状交错层理, NB-B井, 4 329.73 m
	4 326 4 352	NB-E井	灰色、灰黑色中—厚层状细砂岩、薄层状粉砂岩，可见大量泥质纹层，发育波状交错层理、平行层理	钟形+漏斗形	湖泛改造的心滩	湖泊	滨浅湖	e 泥质纹层, 波状交错层理, NB-B井, 4 302.28 m f 平行层理, NB-B井, 4 316.28 m
	4 204 4 241	NB-A井	灰黑色薄层状泥岩夹浅灰色、灰色薄层状细砂岩、粉砂岩，砂岩层面发育波状层理，可见植物叶片	指形	滨浅湖砂质滩坝	湖泊	滨浅湖	g 波状层理, NB-A井, 4 231.13 m h 植物叶片, NB-A井, 4 231.13 m
	4 241 4 266	NB-A井	灰黑色、黑色薄层状泥岩夹浅灰色薄层状粉砂质，泥岩发育水平层理，可见大量植物碎屑，局部可见黄铁矿	高幅齿形	滨浅湖泥	湖泊	滨浅湖	i 泥岩水平层理, NB-A井, 4 223.58 m j 大量植物碎屑, NB-A井, 4 241.37 m

图 2 东海盆地西湖凹陷西次凹 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组典型沉积特征

Fig.2 Typical sedimentary characteristics of H3 sand group of Upper Huagang Formation in NB-1 structure of Xihu Sag, East China Sea Basin

3 储层物性特征

通过 5 口钻井的 16 个样品物性测试分析发现(图 3a), 西湖凹陷西次凹 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组储层孔隙度范围在 5.80%~9.05%, 平均值为 7.28%; 渗透率范围在 $(0.125 \sim 3.72) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。该储层为低孔—低渗透储层, 且孔渗呈正相关关系。

花港组上段 H3 砂组不同沉积微相储层的物性特征存在差异(图 3b)。河道滞留沉积微相和心滩微相储层的孔隙度为 7.06%~9.05%, 平均为 7.59%; 渗透率为 $(0.29 \sim 3.72) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.66 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。心滩微相储层的孔隙度为 7.21%~8.24%, 平均为 7.52%; 渗透率为 $(0.6 \sim 2.32) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此, 河道滞留沉积微相、心滩微相储层为低孔低渗透层。

湖泛改造的心滩微相和滨浅湖砂质滩坝微相的储层物性相对较差。其中, 湖泛改造的心滩微相储层的孔隙度为 5.97%~8.52%, 平均为 7.08%; 渗透率为 $(0.125 \sim 3.72) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。滨浅湖砂质滩坝微相的孔隙度为 5.80%~8.24%, 平均为 7.02%; 渗透率为 $(0.125 \sim 3.72) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此, 湖泛改造的心滩微相和滨浅湖砂质滩坝微相储层为低孔低渗透层。

湖泛改造的心滩微相和滨浅湖砂质滩坝微相的储层物性相对较差。其中, 湖泛改造的心滩微相储层的孔隙度为 5.97%~8.52%, 平均为 7.08%; 渗透率为 $(0.125 \sim 3.72) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。滨浅湖砂质滩坝微相的孔隙度为 5.80%~8.24%, 平均为 7.02%; 渗透率为 $(0.125 \sim 3.72) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $1.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。因此, 湖泛改造的心滩微相和滨浅湖砂质滩坝微相储层为低孔低渗透层。

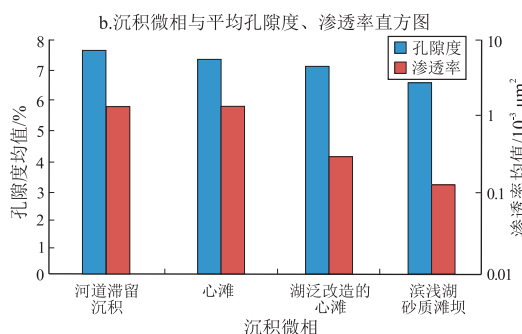
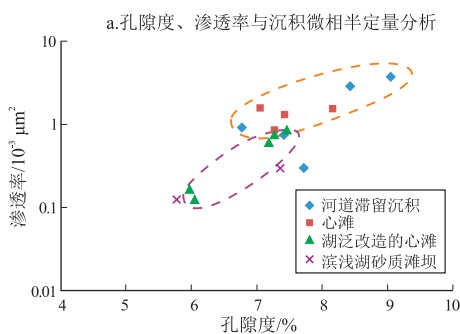


图 3 东海盆地西湖凹陷 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组储层物性特征

Fig.3 Physical properties of H3 sand group of Upper Huagang Formation in NB-1 structure of Xihu Sag, East China Sea Basin

率为 $(0.16\sim 0.91)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $0.53\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。滨浅湖砂质滩坝微相储层的孔隙度为5.8%~7.3%,平均为6.52%;渗透率为 $(0.125\sim 0.66)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $0.127\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。所以,湖泛改造的心滩微相和滨浅湖砂质滩坝微相储层为低孔特低渗储层。

4 储层精细分级评价参数

“甜点”储层的分布受多重参数共同制约。根据测井及物性测试资料,结合研究区构造、沉积微相发育特征,对西湖凹陷NB-1构造花港组上段H3砂组的构造展布、沉积微相、砂体厚度、孔渗特征与含气饱和度的相关性分别展开分析,以此来确定NB-1构造花港组上段H3砂组受产能约束的储层分级评价的参数与标准。

储层精细分级评价主要参考的指标因子包括构造特征、沉积微相、砂体厚度与孔渗条件4个影响因素,其中构造特征和沉积微相属于宏观因素,砂体厚度和孔渗条件为微观因素。在含气饱和度的约束下确定各参数边界,为建立研究区储层分级

评价标准提供依据。

4.1 构造特征

构造特征是储层分级中最为基础的宏观参数,其对储层的影响主要表现为构造裂缝对储层的改造作用。通过断层发育情况与产能关系的连井对比(图4)可知,靠近边界断层下降盘处于构造高部位,断层和构造隆升引起的张性微裂缝为油气充注提供了重要的运移通道。A区位于东部边界断层与中部断裂带之间,也是研究区构造的高部位,构造裂缝发育,区内NB-A、NB-B和NB-C井均为高产井。B区局部发育次级断层,区内构造裂缝欠发育,NB-D井产能较低,以水层或干层为主。C区位于构造低部位,构造解释表明区内几乎无断层发育,NB-E井测井解释全部为干层。总体上,A区储层优于B区,C区最差。

4.2 沉积微相

沉积微相类型是勘探评价中储层分级的重要宏观指示参数,制约了砂体发育的规模和物性,决定了储层的孔渗条件,具有可预测性。图3a显示,河道滞留沉积与心滩微相的孔渗性最好,孔隙度介

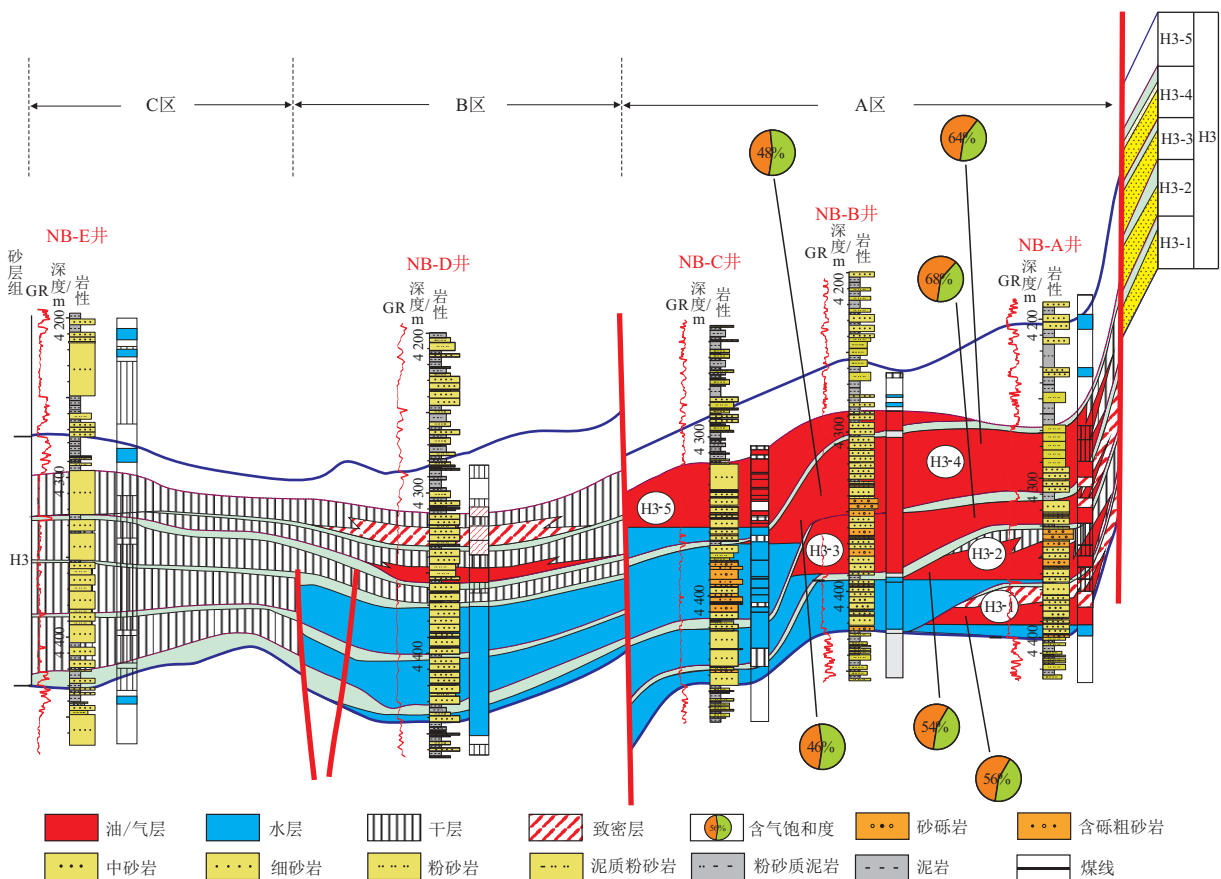


图4 东海盆地西湖凹陷NB-1构造花港组上段H3砂组断层发育情况与产能关系连井对比剖面位置见图1。

Fig.4 Well connection contrasts of the correlation of fault development and productivity in H3 sand group of Upper Huagang Formation in NB-1 structure of Xihu Sag, East China Sea Basin

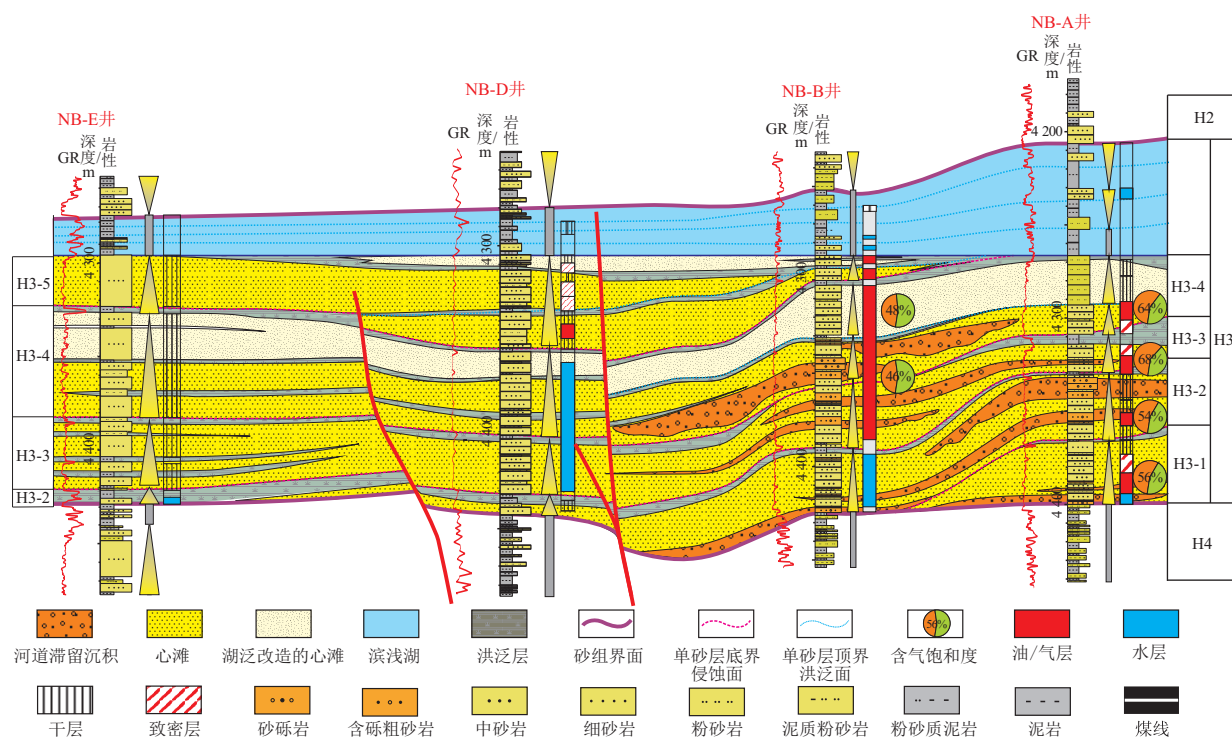


图 5 东海盆地西湖凹陷 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组沉积微相展布特征与产能关系连井对比剖面位置见图 1。

Fig.5 Well connection contrasts of the correlation of sedimentary microfacies distribution characteristics and productivity in H3 sand group of Upper Huagang Formation in NB-1 structure of Xihu Sag, East China Sea Basin

于 7.06% ~ 9.05% 之间, 渗透率均值大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于低孔低渗储层; 湖泛改造的心滩微相孔隙次之, 滨浅湖砂质滩坝微相最差, 为低孔特低渗储层。沉积微相展布特征与产能关系连井对比分析(图 5)表明, 从主河道部位向滨浅湖油气产能逐渐降低。其中, 河道滞留沉积微相与心滩微相为最优沉积相带, 地层主要充注油气和水, 是高产井主要分布的相带, NB-B 井和 NB-A 井分布于该相带, 具有最高的含气饱和度, 介于 46% ~ 68% 之间。湖泛改造的心滩微相以水层和干层为主, 含气饱和度次之, NB-B 井位于该沉积相带, 含气饱和度较低, 主要为 48%。滨浅湖砂质滩坝微相含气饱和度最低, 主要为干层。综上所述, 河道滞留沉积微相和心滩微相储层优于湖泛改造的心滩微相, 滨浅湖砂质滩坝微相储层较差。

4.3 砂体厚度

砂岩厚度是储层分级的又一重要因子, 与沉积微相之间具有一定的关系(图 6)。通过定量统计西湖凹陷花港组上段 H3 砂组单井砂岩厚度, 发现心滩与河道滞留沉积微相的累计厚度介于 15 ~ 20 m 之间, 单层厚度一般大于 2 m; 滨浅湖砂质滩坝微相砂岩累计厚度小于 15 m, 单层厚度小于 1 m; 湖泛改造的心滩微相砂岩累计厚度可达 28 m, 但单层厚度介于 1 ~ 2 m。因此, 厚度与沉积相的关系既

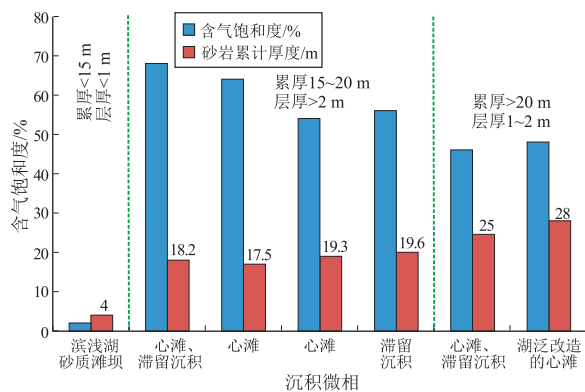


图 6 东海盆地西湖凹陷 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组砂体厚度与油气产能关系

Fig.6 Relationship between sand body thickness and productivity in H3 sand group of Upper Huagang Formation in NB-1 structure of Xihu Sag, East China Sea Basin

要考虑砂岩累计厚度, 更要考虑单层厚度。从单层砂岩厚度及累计砂岩厚度与油气充注度的关系来看, 砂岩单层厚度大于 2 m, 累计厚度范围在 15 ~ 20 m, 含少量泥岩夹层(洪泛层), 含气饱和度最高, 范围在 54% ~ 68%。砂岩单层厚度小于 1 m, 累计厚度小于 15 m, 含大量泥岩夹层(洪泛层), 几乎无油气充注。砂岩累计厚度虽然可达 28 m, 但单层厚度小于 2 m, 且含大量泥岩夹层(洪泛层), 含气饱和度范围在 46% ~ 48%。上述结果表明, 砂岩

单层厚度对含气饱和度影响最大,同时砂岩累计厚度也会对含气饱和度产生较大影响,且泥岩夹层的含量尤为重要,所以储层分级过程中应综合考虑到砂岩累计厚度、单层厚度及泥岩夹层的作用。

4.4 孔渗条件

孔渗条件是控制储层分级的定量指标,受沉积微相影响较大,在开发产能预测中是制约产能的主要因素。通过对 H3 砂组的平均孔隙度、渗透率与含气饱和度综合分析发现,平均孔隙度和平均渗透率与含气饱和度均呈正相关,即孔隙度、渗透率越大,对应的含气饱和度越高。根据储层物性特征可把研究层段分为 3 类:低孔低渗型、低孔特低渗型和非储层(表 1)。物性的差异导致含气饱和度存在较大不同,低孔低渗型储层孔隙度范围在 6.5%~12%,渗透率范围在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油气充注度最高,介于 46%~68%。低孔特低渗型储层孔隙度范围在 6.5%~12%,渗透率为范围在 $(0.5 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油气充注度为 48%。物性低于以上两类的储层为非储层^[34],油气难以充注。

5 储层精细分级评价方法

本文的储层精细分级评价在开发产能预测上综合考虑了构造特征、沉积微相类型、砂体厚度及孔渗条件 4 个方面的因子参数,并以各参数与含气饱和度关系为基础,对井网较为密集的西次凹 NB-1 构造建立了受产能约束的四因子储层分级评价标准,把储层分为 3 个级别: I 级、II 级和 III 级(表 2)。其中,孔渗条件对产能影响最大,在分级评价中作为最重要的参数,其次是砂体厚度,沉积微相与构造特征所占权重相对较低,四因子参考权

重比例约为 5 : 3 : 1 : 1。I 级储层为“甜点”储层,以该类储层为目标编制了 H3 砂组 5 个单砂层的“甜点”储层预测平面图(图 7)。

I 级储层是研究区的“甜点”储层,构造位置处于 A 区,沉积微相为河道滞留沉积和心滩,砂体累计厚度为 15~20 m,单层砂体厚度大于 2 m,含少量泥质夹层,整体为低孔低渗储层,孔隙度范围在 6.5%~12%,渗透率范围在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油气充注度较高,以油气层和水层为主,是研究区的优质储层。

II 级储层属于中等储层,构造上位于 B 区,主要发育湖泛改造的心滩微相,砂体累计厚度大于 20 m,单层砂体厚度大于 1 m,具多个泥岩夹层(洪泛层),为低孔特低渗储层,孔隙度范围在 5.5%~13%,渗透率范围在 $(0.5 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,油气充注度低于 A 区。

III 级储层为无效储层,处于 C 区,主要为滨浅湖砂质滩坝沉积,砂层累计厚度小于 15 m,单层砂体厚度小于 1 m,夹大量泥岩层(洪泛层),孔渗性均较差,无油气充注,以干层为主。

西湖凹陷西次凹 NB-1 构造花港组 H3 砂组“甜点”储层分布如图 7 所示。H3-1 小层“甜点”储层主要沿东部边界断层整体呈南北向带状展布,向北可延伸至北部隆起剥蚀区,南抵研究区边界,西至 NB-A 井附近,总面积约 75.2 km²; H3-2 小层与 H3-1 小层“甜点”储层分布面积接近,约 58.6 km²; H3-3 小层“甜点”分布面积最大,沿断层西部围绕 NB-A、NB-B 和 NB-C 井呈不规则状分布,总面积约 125 km²; H3-4 小层有利储层主要分布在东边边界断层中北部,形状不规则,总面积约

表 1 东海盆地西湖凹陷 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组储层孔渗条件与产能关系分类

沉积微相	平均孔隙度/%	平均渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	含气饱和度/%	储层物性分类
河道滞留沉积	7.59	1.66	46, 54, 56	低孔低渗
心滩	7.52	1.07	64, 68	低孔低渗
湖泛改造的心滩	7.08	0.53	48	低孔特低渗
滨浅湖砂质滩坝	6.52	0.13	0	非储层

表 2 储层精细分级评价标准

Table 2 Evaluation criteria for fine classification of reservoirs

储层分级	构造因子	沉积微相因子	砂厚因子	孔渗因子
I 级(甜点储层)	A 区	河道滞留沉积、心滩	累厚 15~20 m, 单层大于 2 m, 少夹层	低孔低渗
II 级(中等储层)	B 区	湖泛改造的心滩	累厚大于 20 m, 单层大于 1 m, 多夹层(洪泛层)	低孔特低渗
III 级(无效储层)	C 区	滨浅湖砂质滩坝	累厚小于 15 m, 单层小于 1 m, 多夹层(洪泛层)	非储层

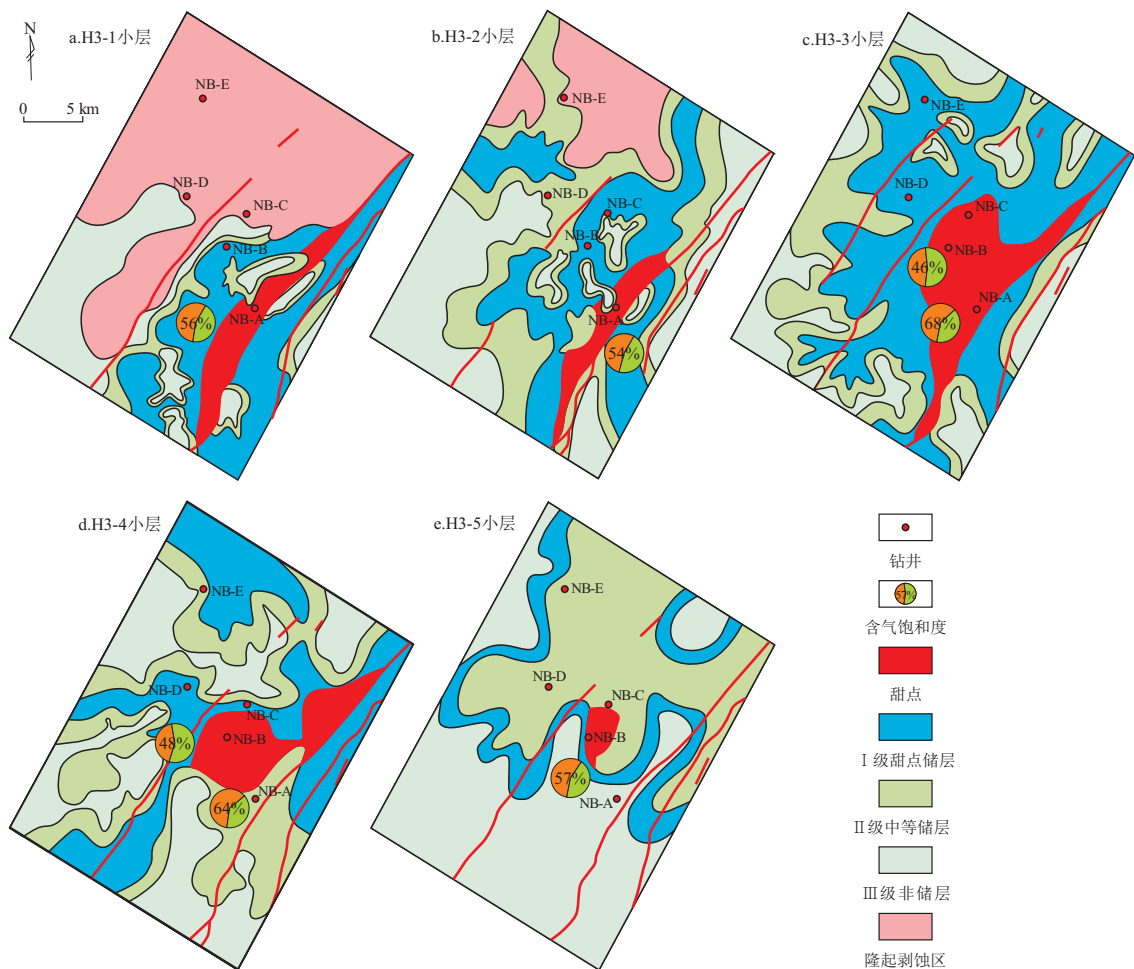


图7 东海盆地西湖凹陷 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组“甜点”储层预测

Fig.7 Prediction of “dessert” reservoir in H3 sand group of Upper Huagang Formation in NB-1 structure of Xihu Sag, East China Sea Basin

98.7 km²; H3-5 小层有利储层分布较为局限、面积最小, 仅在 A 区中部 NB-B 井附近分布, 面积约 12.3 km²。综合上述, H3-3 小层为最具勘探潜力的层段, H3-1、H3-2 和 H3-4 小层次之, 而 H3-5 小层分布范围较小, 勘探价值较低。

6 结论

(1) 西湖凹陷西次凹 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组发育 5 种典型沉积微相, 即河道滞留沉积、心滩、湖泛改造的心滩、滨岸砂质滩坝和滨浅湖泥。其中, 河道滞留沉积和心滩为低孔低渗储层, 湖泛改造的心滩和滨岸砂质滩坝为低孔特低渗储层。

(2) 根据构造特征、沉积微相、砂体厚度、孔隙条件与含气饱和度的关系, 建立了受产能约束的四因子储层精细分级评价方法, 将西湖凹陷 NB-1 构造花港组上段 H3 砂组储层分为 3 类, 即 I 类(甜点储层), II 类(中等储层), III 类(无效储层)。其中, 孔渗特征是储层分级评价中最关键的参数, 砂体

厚度是储层分级的主要指标, 沉积微相与构造特征为储层分级提供了宏观基础。对研究区各单砂层展开“甜点”储层分布预测认为, H3-3 小层“甜点”储层面积最大, 最具勘探潜力; H3-1、H3-2 和 H3-4 小层优质储层面积次之, 具有较高的勘探意义; H3-5 小层“甜点”储层面积最小, 勘探价值较低。

参考文献:

- [1] 蔡全升, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 东海盆地西湖凹陷中央隆起带古近系花港组储层特征及成岩孔隙演化[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 733-740.
CAI Quansheng, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Reservoir characteristics and evolution of diagenetic porosity of Huagang Formation of Paleogene in the central anticlinal belt of Xihu Sag, Donghai Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 733-740.
- [2] 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 & Experiment*, 2018, 40(2): 168-176.
- [3] 张武,徐发,徐国盛,等.西湖凹陷某构造花港组致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化[J].成都理工大学学报(自然科学版),2012,39(2):122-129.
ZHANG Wu, XU Fa, XU Guosheng, et al. Diagenesis and pore evolution of Huagang Formation tight sandstone reservoirs in a structure of Xihu Depression in East China Sea Basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39(2): 122-129.
- [4] 彭伟欣.中国东海西湖凹陷天然气资源及开发利用[J].天然气工业,2002,22(2):76-78.
PENG Weixin. Natural gas resources in Xihu Depression of East China Sea in China and their development and utilization [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(2): 76-78.
- [5] 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.
- [6] 王伟明,卢双舫,陈旋,等.致密砂岩气资源分级评价新方法:以吐哈盆地侏罗统水西沟群为例[J].石油勘探与开发,2015,42(1):60-67.
WANG Weiming, LU Shuangfang, CHEN Xuan, et al. A new method for grading and assessing the potential of tight sand gas resources: a case study of the Lower Jurassic Shuixigou Group in the Turpan-Hami Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 60-67.
- [7] 张安达,王成,乔睿.致密砂岩储层物性下限确定新方法及系统分类[J].岩性油气藏,2014,26(5):5-8.
ZHANG Anda, WANG Cheng, QIAO Rui. A new method for determining physical property lower limit of tight sandstone reservoir and reservoir system classification [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(5): 5-8.
- [8] 林潼,魏红兴,谢亚妮.以喉道为参数的致密砂岩气储层评价方法:以库车坳陷迪北地区致密砂岩气为例[J].沉积学报,2016,34(5):983-990.
LIN Tong, WEI Hongxing, XIE Yani. Using throat parametre to assess tight sandstone gas reservoir: a case study of Dibeitight sandstone gas in the east of Kuqa Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(5): 983-990.
- [9] 李海燕,岳大力,张秀娟.苏里格气田低渗透储层微观孔隙结构特征及其分类评价方法[J].地学前缘,2012,19(2):133-140.
LI Haiyan, YUE Dali, ZHANG Xiujian. Characteristics of pore structure and reservoir evaluation of low permeability reservoir in Sulige gas field [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2): 133-140.
- [10] 吴浩,刘锐娥,纪友亮,等.典型致密砂岩气储层孔隙结构分类及其意义:以鄂尔多斯盆地盒8段为例[J].天然气地球科学,2016,27(5):835-843.
WU Hao, LIU Ruie, JI Youliang, et al. Classification of pore structures in typical tight sandstone gas reservoir and its significance: a case study of the He8 Member of Upper Palaeozoic Shihezi Formation in Ordos Basin, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 835-843.
- [11] 陈林,李珊珊,游君君,等.文昌B凹陷古近系低渗储层物性影响因素定量评价与应用[J].地质科技情报,2019,38(3):165-173.
CHEN Lin, LI Shanshan, YOU Junjun, et al. Quantitative evaluation and application of factors affecting the properties of low permeability reservoirs from the Paleogene in Wenchang B Sag [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(3): 165-173.
- [12] 白松涛,程道解,王金彬,等.砂岩岩石核磁共振 T_2 谱定量表征[J].石油学报,2016,37(3):382-391.
BAI Songtao, CHENG Daojie, WAN Jinbin, et al. Quantitative characterization of sandstone NMR T_2 spectrum [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(3): 382-391.
- [13] 代全齐,罗群,张晨,等.基于核磁共振新参数的致密油砂岩储层孔隙结构特征:以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J].石油学报,2016,37(7):887-897.
DAI Quanqi, LUO Qun, ZHANG Chen, et al. Pore structure characteristics of tight-oil sandstone reservoir based on a new parameter measured by NMR experiment: a case study of seventh member in Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(7): 887-897.
- [14] 肖佃师,卢双舫,姜微微,等.基于粒间孔贡献量的致密砂岩储层分类:以徐家围子断陷为例[J].石油学报,2017,38(10):1123-1134.
XIAO Dianshi, LU Shuangfang, JIANG Weiwei, et al. Classification of tight sandstone reservoirs based on the contribution of intergranular pores: a case study of Xujiaweizi Fault Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10): 1123-1134.
- [15] 武法东,陆永潮,陈平,等.东海西湖凹陷渐新统花港组海绿石的发现及其意义[J].沉积学报,1997,15(3):160-163.
WU Fadong, LU Yongchao, CHEN Ping, et al. The discovery and significance of glauconites in the Huagong Formation of the Oligocene, Xihu Depression, East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(3): 160-163.
- [16] 王丽顺,陈琳琳.东海西湖凹陷下第三系层序地层学分析[J].海洋地质与第四纪地质,1994,14(3):33-42.
WANG Lishun, CHEN Linlin. Sequence stratigraphic analysis of Eocene system, Xihu Sag, East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(3): 33-42.
- [17] 刘书会,王宝言,刘成鑫.西湖凹陷平湖地区平湖组沉积相的再认识[J].油气地质与采收率,2009,16(3):1-3.
LIU Shuhui, WANG Baoyan, LIU Chengxin. The recognition about sedimentary facies in Pinghu Formation of Pinghu region [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(3): 1-3.
- [18] 苏奥,贺聪,陈红汉,等.构造反转对西湖凹陷中部油气成藏的控制作用[J].特种油气藏,2016,23(3):75-78.
SU Ao, HE Cong, CHEN Honghan, et al. Effect of tectonic inversion on hydrocarbon accumulation in the central area of Xihu Depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(3): 75-78.

- [19] 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地质厘定[J].地球科学,2018,43(2):502-513.
LI Xiangquan, LIU Jinshui, LU Yongchao, et al. Prototype basin characterization of Huagang Formation of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(2): 502-513.
- [20] 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. 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 & Experiment, 2017, 39(2): 186-194.
- [21] ABBAS A, ZHU Hongtao, ZENG Zhiwei, et al. Sedimentary facies analysis using sequence stratigraphy and seismic sedimentology in the Paleogene Pinghu Formation, Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 93: 287-297.
- [22] 侯志强,于浩,刘云,等.西湖凹陷 M 气田区块低孔渗致密砂岩储层高精度三维孔隙压力场地震预测[J].地质科技情报,2019,38(2):267-274.
HOU Zhiqiang, YU Hao, LIU Yun, et al. High-precision seismic prediction of 3D pore-pressure in tight sandstone gas reservoirs with low porosity and permeability at M gas field in Xihu Sag[J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(2): 267-274.
- [23] 陈哲,张昌民,侯国伟,等.东海陆架盆地西湖凹陷平湖组断层组合样式及其控砂机制[J].石油与天然气地质,2020,41(4):824-837.
CHEN Zhe, ZHANG Changmin, HOU Guowei, et al. Fault distribution patterns and their control on sand bodies in Pinghu Formation of Xihu Sag in East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 824-837.
- [24] 王健伟,吕鹏,曾联波,等.西湖凹陷 X 气藏花港组 H3 段储层特征及影响因素[J].断块油气田,2020,27(1):22-27.
WANG Jianwei, LYU Peng, ZENG Lianbo, et al. Characteristics and influencing factors of reservoir in H3 section of Huagang Formation, X gas reservoir, Xihu Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(1): 22-27.
- [25] 朱毅秀,黄导武,王欢,等.东海西湖凹陷 A 气田渐新统花港组三段厚层砂岩沉积环境[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1226-1235.
ZHU Yixiu, HUANG Daowu, WANG Huan, et al. Sedimentary setting of thick sandstone in the 3rd member of the Oligocene Huagang Formation in A gas field in the Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1226-1235.
- [26] 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. Study of burial and thermal history of Huagang Formation tight sandstone reservoir in central reversal structural belt, Xihu Depression, East China Sea [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(4): 405-414.
- [27] 蒋玉波.东海陆架盆地南部中生代地层展布及油气远景探讨[D].青岛:中国海洋大学,2013.
JIANG Yubo. Discussion on the distribution characteristics and its hydrocarbon potential of Mesozoic stratum in southern East China Sea Shelf Basin [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [28] 于兴河,李顺利,曹冰,等.西湖凹陷渐新世层序地层格架与沉积充填响应[J].沉积学报,2017,35(2):299-314.
YU Xinghe, LI Shunli, CAO Bing, et al. Oligocene sequence framework and depositional response in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(2): 299-314.
- [29] 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.
- [30] 张建培,徐发,钟韬,等.东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组层序地层模式及沉积演化[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(1):35-41.
ZHANG Jianpei, XU Fa, ZHONG Tao, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang formations in Xihu Trough [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 35-41.
- [31] 苏奥,陈红汉,吴悠,等.东海盆地西湖凹陷中西部低渗近致密—致密砂岩气成因、来源及运聚成藏[J].地质学报,2018,92(1):184-196.
SU Ao, CHEN Honghan, WU You, et al. Genesis, origin and migration-accumulation of low-permeable and nearly tight-tight sandstone gas in the central western part of Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(1): 184-196.
- [32] 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 Huagang Formation, central inversion belt, Xihu Depression [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 303-310.
- [33] 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.
- [34] 吴逸豪.冀中拗陷晋县凹陷中南部 Es₄-Ek₁段致密储层特征及分级评价研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
WU Yihao. Research on characteristics and grading evaluation of tight reservoir in Es₄-Ek₁ section of south-central Jinxian Sag, Jizhong Depression [J]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016.