

娄敏, 段冬平, 何贤科, 等. 海上深层薄“甜点”储层预测——以 Z 气田 H4—H5 层为例[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(1): 57-69.

LOU Min, DUAN Dongping, HE Xianke, et al. Prediction of thin "sweet spot" reservoirs in offshore areas and its application in Z Gas Field[J].

Marine Geology Frontiers, 2025, 41(1): 57-69.

海上深层薄“甜点”储层预测

——以 Z 气田 H4—H5 层为例

娄敏, 段冬平, 何贤科, 李文俊, 汪文基, 李炳颖, 荣乘锐, 刘彬彬

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335)

摘要: 特低渗气藏的有效开发难度大, “甜点”预测及开发井位设计是低渗气藏有效开发的关键。使用梯度-90°相移技术对特低渗储集层进行了精细刻画, 得到了砂体厚度图; 在此基础上, 通过微观和测井资料分析, 明确“甜点”发育的类型及成因。在“甜点”发育模式的指导下, 采用梯度波谷和属性定性识别孔隙型“甜点”发育区, 采用最大似然属性和裂缝密度识别裂缝型“甜点”发育区。研究区 H4 层主要发育孔隙型“甜点”, 平面上位于研究区北部和东部, 纵向上位于 H4b2 和 H4b3 小层。H5 层发育裂缝型和孔隙型“甜点”, 平面上位于研究区南部, 纵向上位于 H5a3 和 H5a4 小层。孔隙型“甜点”分布受控于有利沉积相带区, 裂缝型“甜点”主要发育在靠近断裂附近和翼部构造强挤压区。基于“甜点”刻画结果, 部署 2 口多底井, 试验井大斜度段位于 H5a 层, 水平段分支部署在 H4b 层, 兼顾 H4 和 H5 “甜点”, 实现特低渗气藏的有效开发。本研究方法对深层发育薄“甜点”的特低渗气藏“甜点”预测和开发方案编制具有参考意义。

关键词: 特低渗气藏; “甜点”预测; 高效井型设计; 有效开发

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.176

0 引言

随着勘探开发的深入, 深层特低渗油气藏的有效开发成为增储上产的关键领域。东海盆地低渗油气资源丰富, 特低渗气藏的有效开发至关重要^[1-3]。“甜点”储层的预测是实现低渗气藏开发的关键, 通过对“甜点”的精细表征, 设计高效井型来增加“甜点”的钻遇长度, 可提高生产井的初期产能, 实现特低渗气藏的有效开发^[4-5]。

目前, 国内对特低渗气藏“甜点”预测的研究主

要集中在准噶尔盆地车排子地区^[4]、四川盆地上三叠统须家河组^[5]、准噶尔盆地玛湖^[6]等区块。“甜点”预测包括地质成因分析^[6-10]和地球物理预测^[11-15]两方面: “甜点”地质成因分析有助于明确“甜点”的形成机理, 指导“甜点”的有利区预测; “甜点”的地球物理预测可实现“甜点”的空间预测, 指导开发井位的部署。通常地质“甜点”预测多为定性结果; 地球物理预测“甜点”需要在地震分辨率范围内, 且“甜点”在地震上有明显响应的条件下, “甜点”预测结果才可靠。在实际研究中采用地震地质结合刻画“甜点”, 以提高“甜点”预测的可靠程度。通常“甜点”类型分为孔隙型和裂缝型^[6]。“甜点”的发育受控于储层的沉积作用、成岩作用和构造作用 3 方面。沉积作用决定了储层的物质基础, 成岩作用决定了储层的物性演变, 构造作用决定了储层裂缝的发育程度。大部分孔隙型“甜点”的发育主要受控于沉积作用, 高能水动力背景下形成的粗粒沉积物为有利的岩相, 形成有利岩相的沉

收稿日期: 2024-07-17

资助项目: 国家自然科学基金“东海深层低渗-致密气储层体系质量差异性成因机制及演化模式”(U19B2006); 中海石油(中国)有限公司重大科技项目“东海低渗大气田高效开发关键技术研究与应用”(KJZX-2024-0102)

第一作者: 娄敏(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震解释和储层方面的研究工作. E-mail: loumin2@cnooc.com.cn

积相为有利的沉积微相^[8]。因此,优势沉积相带预测是寻找“甜点”的有利方向。此外,成藏与储层致密的先后关系也决定了特低渗气藏的“甜点”发育特征^[16-17]。一般而言,先致密后成藏的特低渗气藏含气饱和度较低,“甜点”较不发育,开发价值低;先成藏后致密的特低渗气藏含气饱和度较高,受油气充注过程中有机酸的溶蚀,局部发育“甜点”,具有较高的开发价值。地球物理“甜点”预测主要是在岩石物理分析的基础上,明确“甜点”的敏感岩石物理参数,采用合适的反演预测“甜点”储层。

研究区储层埋深大,为暗点反射,储层预测难度大。“甜点”厚度薄,单期“甜点”厚度仅2 m,为千层饼式薄“甜点”。此外,海上钻井较少,研究区目前仅有5口钻井,井间储层和“甜点”的预测难度大。针对以上难题,通过地震地质综合分析,建立了一套海上少井区薄“甜点”的预测方法。首先采用梯度-90°相移技术实现特低渗储层的精细刻画。在此基础上,通过钻井分析化验和测井资料明确“甜点”的成因和预测方向,建立其发育模式。最后,

通过梯度波谷、属性及最大似然属性表征“甜点”的空间分布,指导高效井型设计,实现特低渗气藏的有效开发。

1 区域地质背景

Z气田位于西湖凹陷中北部,为中新世晚期(龙井运动)EW向挤压应力背景下形成的大型背斜构造,晚期近EW向断层不发育,对油气藏的再改造作用较弱,油气保存较好^[18]。Z气田目前有4口探井、1口开发井(图1)。研究目的层为渐新统花港组,主要发育河流-三角洲相沉积^[3]。Z气田主要开发层系为H4—H5层(花港组第4、5层)。H4砂体垂厚约120 m,H5砂体垂厚约130 m,储集层非均质强,渗透率差异大。H4层进一步可以细分为H4a、H4b、H4c小层,H5层进一步可以细分为H5a、H5b小层(图1)。主要含气层为H4b和H5a,其进一步可细分为5个砂层组。随着埋藏深度的增加,孔隙度和渗透率降低,H4、H5层特低渗储层(图2),整

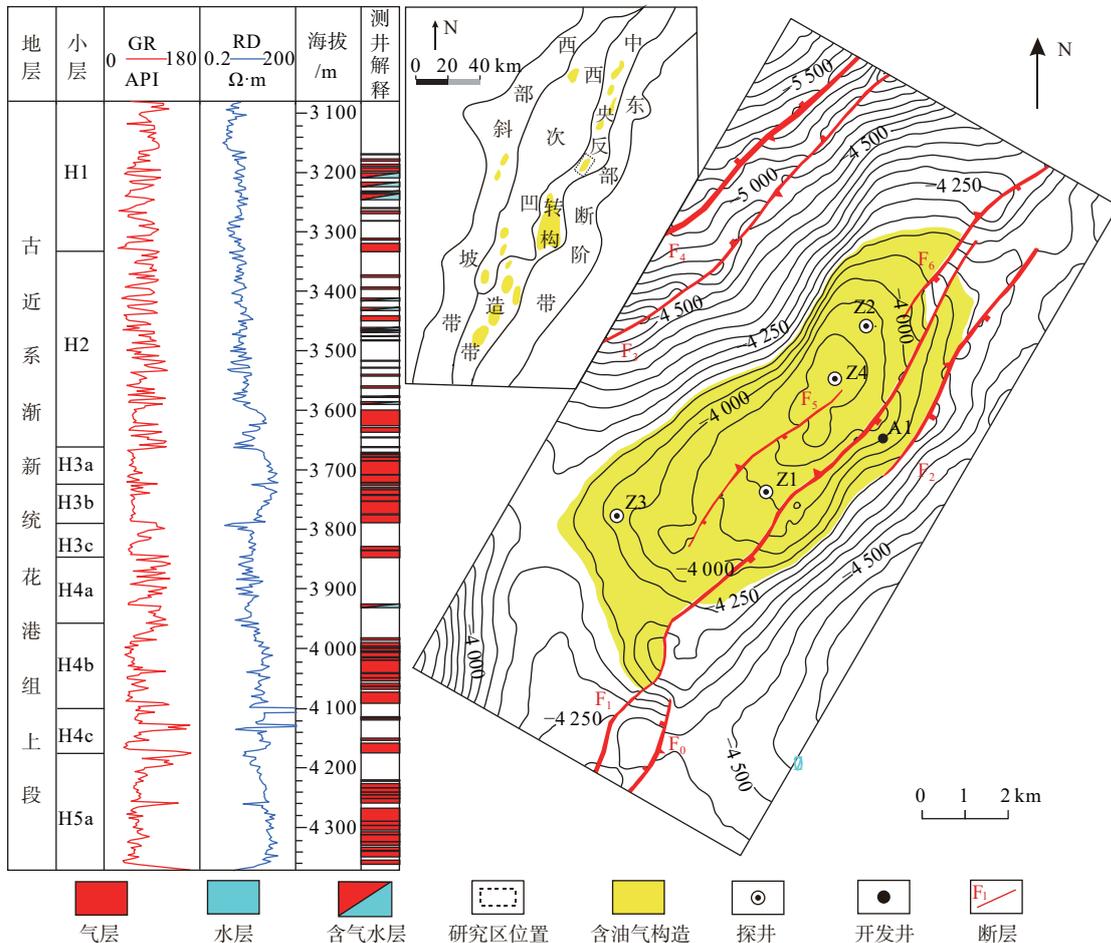


图1 研究区地层柱状图和钻井平面位置

Fig.1 Stratigraphic column and drilling location in the study area

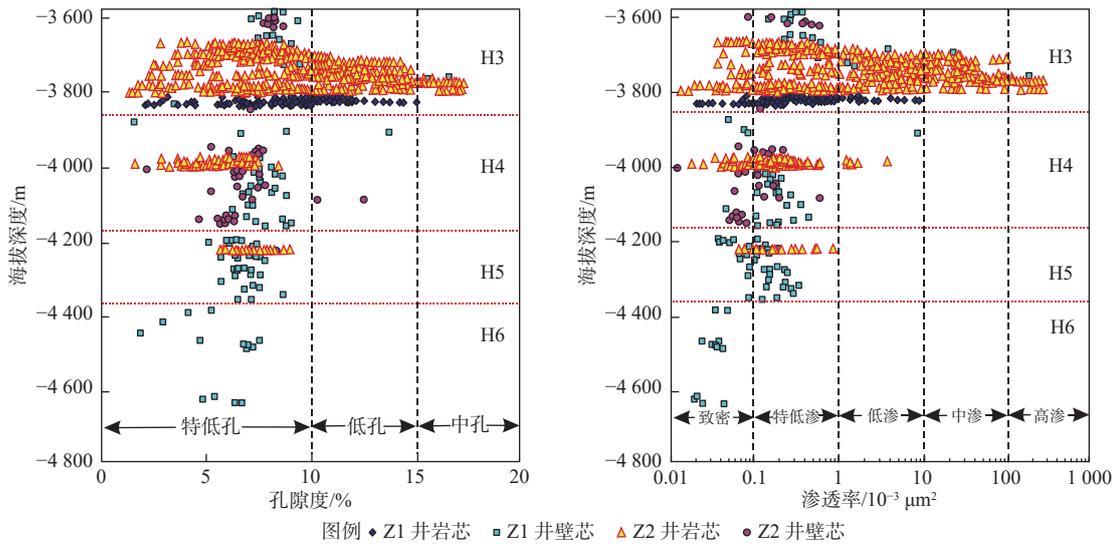


图 2 物性随深度的变化

Fig.2 Properties changes with depth

体埋深处于-4 200~-4 500 m, 平均孔隙度为 7%、渗透率为 $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储集层在常规地震上相位不稳定、连续性差, 表现为弱振幅的特征, 为“暗点”型储集层。H4—H5 是 Z 气田后续开发的重要层系, 如何有效识别深层“甜点”储集层是下一步开发方案设计的关键。

2 储层预测

储层预测是“甜点”预测的基础。随着埋深的增加, H4 和 H5 储层为高阻砂岩, 为暗点反射, 砂顶

反射不稳定, 常规地震较难识别储层(图 3)。以 H5a 层为例, 不同钻井地震相位具有差异。Z1、Z3、Z4 井砂顶标定在波峰, Z2 井砂顶标定在零相位。常规地震上, H5a 相位不稳定导致储层表征难度较大。

相比常规叠后地震, 叠前地震包含不同入射角的地震信息, 对低渗储层识别能力更强^[19]。选取已钻井井旁叠前地震道集, 开展 AVO 特征分析。结果表明, H5a 储层为 II a 类型 AVO(图 4), 其近道为波峰反射, 远道为波谷反射, 在常规全叠加地震剖面上(图 5a)表现为暗点反射, 砂体顶面不清晰。

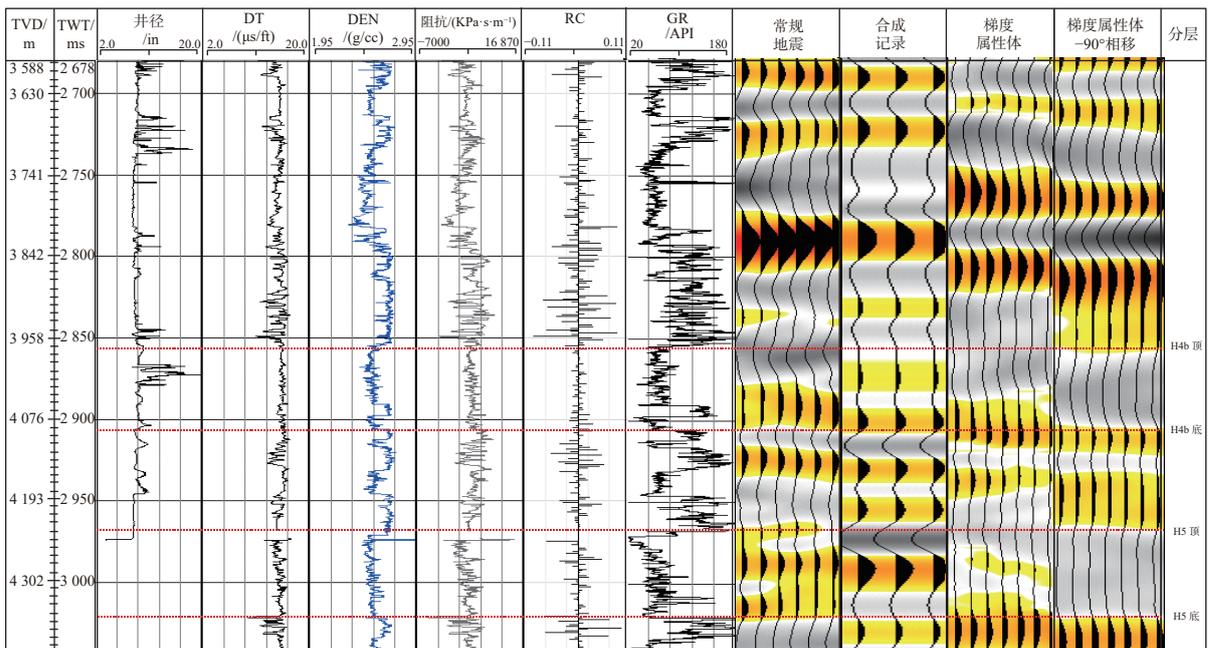


图 3 H4 和 H5 层井震标定结果

Fig.3 Seismic calibration results of H4 and H5 layers

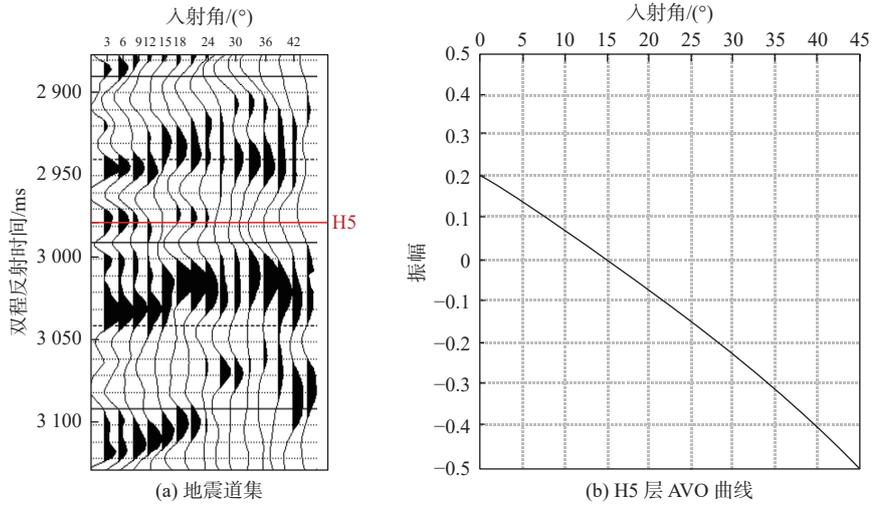


图4 H5层 AVO 特征
Fig.4 AVO features of H5 layer

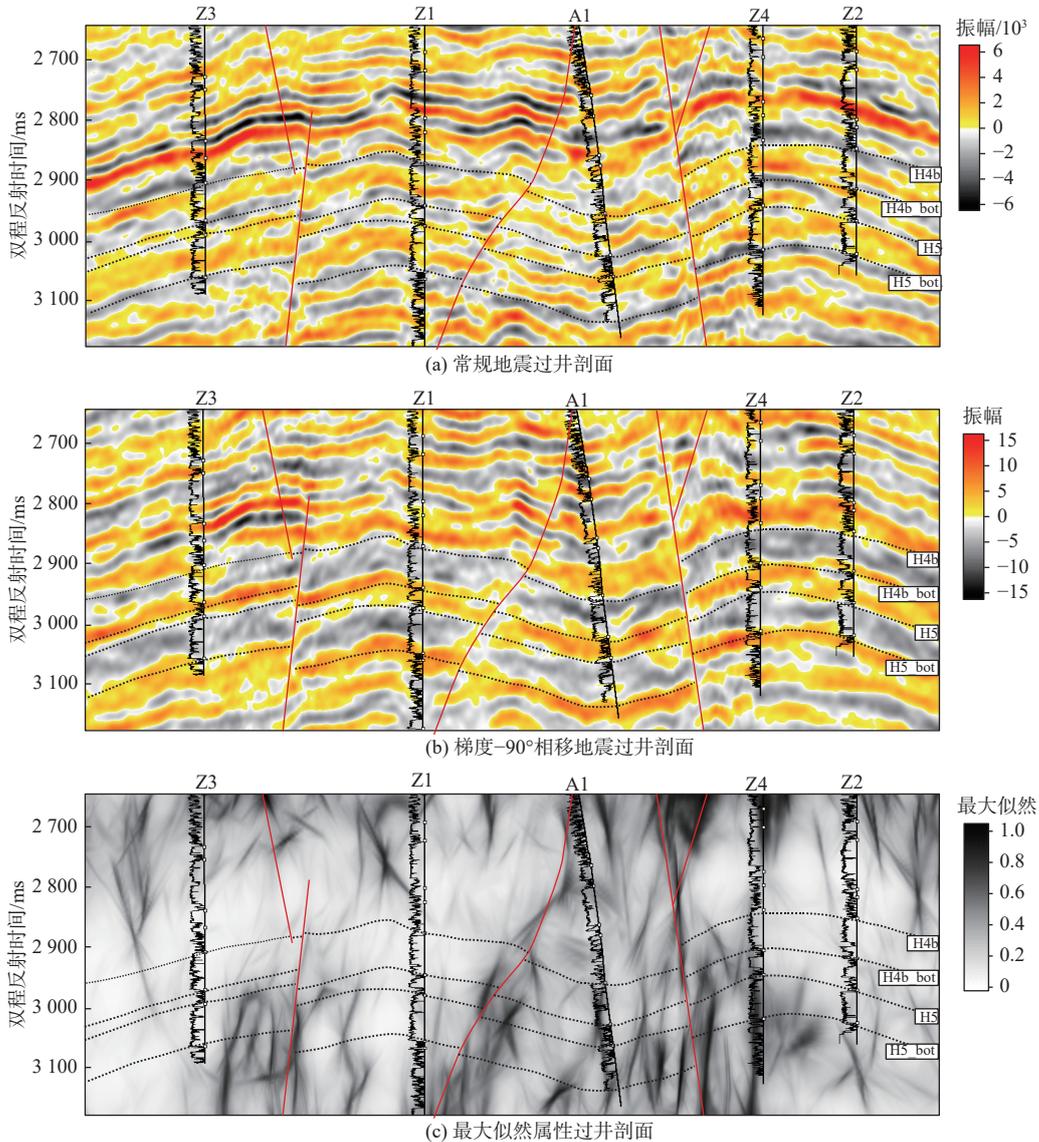


图5 过井地震剖面
Fig.5 Seismic cross-well profile

H5a 储层顶面反射的 AVO 曲线的截距为较小的正值, 斜率为负值。通常泊松比可以较好地区分深层砂泥岩储层, 而 AVO 梯度与泊松比变化率呈正相关性。因此, 可以考虑采用梯度 -90° 相移数据来表征储层。通过对 SHUEY^[20] 提出的 Zoeppritz 方程近似和推导可以得到反射系数和梯度的关系式:

$$R(\theta) \approx P + G \sin 2\theta + C(\tan 2\theta - \sin 2\theta) \quad (1)$$

式中: $R(\theta)$ 为反射系数;

θ 为入射角;

P 、 G 分别为 AVO 属性中的截距、梯度。

研究区目的层砂顶对应梯度波谷极值, 通过 -90° 相移后, 梯度波谷与砂体对应关系较好。通过常规地震(图 5a)和梯度 -90° 相移过井地震剖面(图 5b)对比发现, 梯度 -90° 相移能较好地表征目的层储层, 实现砂体顶面构造、底面构造和砂体厚度的精细表征, 为后续“甜点”的刻画奠定了基础。

3 “甜点”预测

3.1 “甜点”类型及成因分析

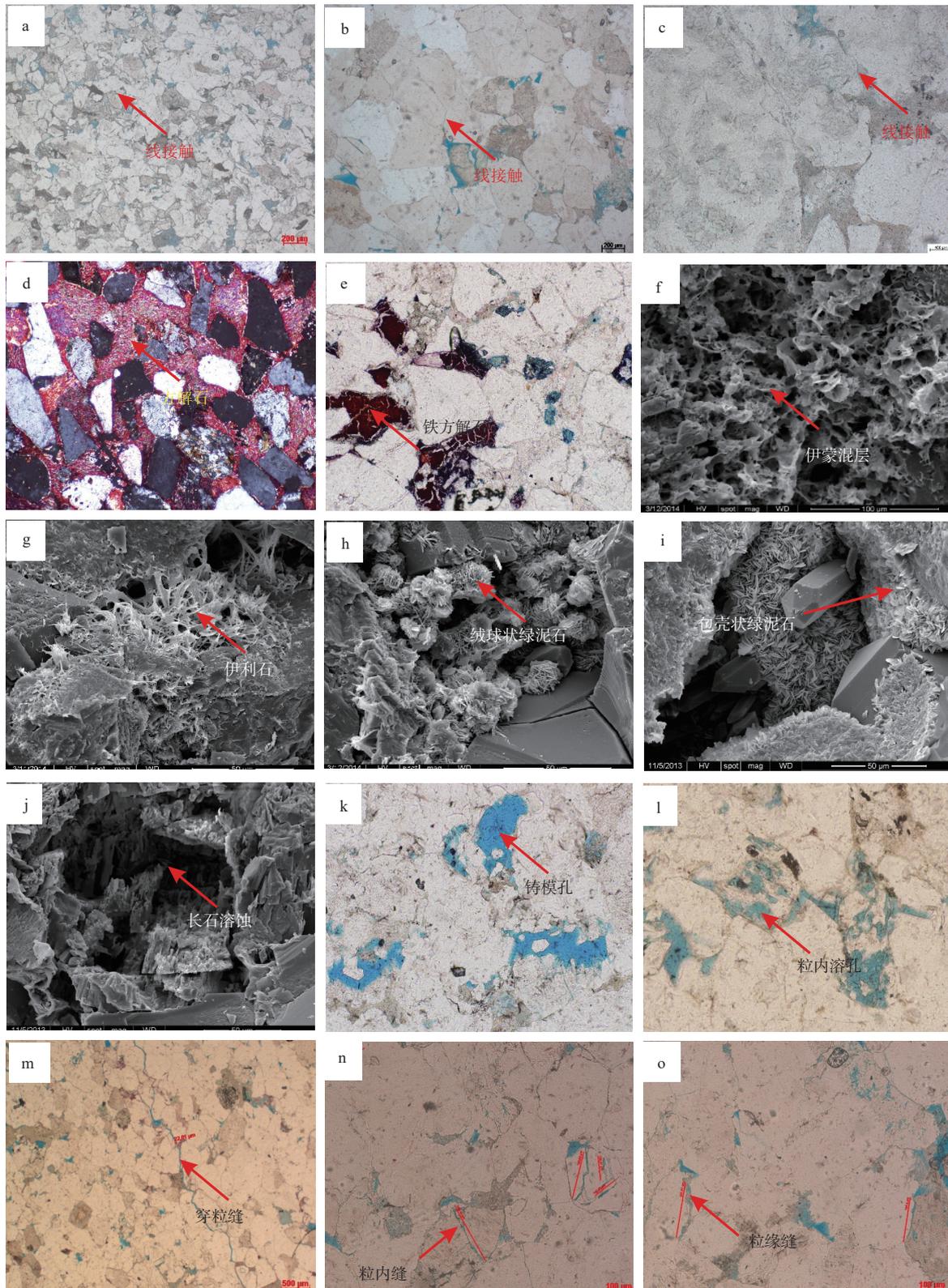
研究区发育 2 种类型的“甜点”储层, 分别为孔隙型“甜点”和裂缝型“甜点”。其中, H4b 层以孔隙型“甜点”为主, H5a 层以裂缝型“甜点”为主。H4—H5 储层埋深 $>3\ 800\text{ m}$, 整体处于中成岩 B 期, 为碱性成岩环境。由于储层埋深大, 压实作用较强。通过薄片观察, 可见岩石颗粒多为线接触(图 6a—c), 原生孔隙保存较少, 压实作用是孔隙度减小的主要因素。胶结作用较强, 胶结物类型以碳酸盐为主(图 6d、e), 发育铁方解石, 属于晚期胶结。黏土矿物类型以伊利石和伊蒙混层为主(图 6f、g), 局部可见绿泥石(图 6h、i), 多以包壳状产出, 绿泥石的存在可以抑制石英加大, 有利于原生孔隙的保存。此外, 可见长石和岩屑溶解(图 6j—l), 存在少量溶蚀孔, 对物性有一定改善。溶蚀作用多发生在粗砂岩中, 细砂岩泥质含量较高, 溶蚀作用较弱。压汞资料可以用于分析储层的孔隙结构, 识别“甜点”储层。孔隙结构决定了渗透率的差异, 孔喉分布均匀的储层, 渗透率相对较高。研究区压汞资料表明, 岩石粒度越粗, 储层的孔结构越好, 为“甜点”储层。H4 层以孔隙型“甜点”为主, 砂体厚度大, 粗粒相带为“甜点”有利发育区。

H5 层发育孔隙型“甜点”和裂缝型“甜点”。裂缝在岩芯、薄片(图 6m—o)和成像测井上均有一定响应。岩芯上, 可见裂缝带, 岩石破碎特征明显。成像测井上, 可见双余弦反射, 多为高阻缝(图 7a), 局部发育高导缝(图 7b)。研究区的裂缝为构造挤压形成。H5 层发育孔隙型和裂缝型双重“甜点”。裂缝的发育受控于两方面: ①储层的脆性矿物含量越高, 越容易发育裂缝; ②越靠近断裂带处, 裂缝发育的概率越高。Z 气田为典型的后期反转挤压形成的注中隆背斜, 受到龙井运动的挤压, 形成现今的背斜构造。构造挤压应力最强位于研究区北部, 该处构造较陡, 挤压作用最强, 为裂缝发育的有利区。此外, 在靠近东部深部油源断裂附近, 裂缝发育的概率较大。

成藏作用与致密的先后关系决定了致密储层的产能和开发价值, 依据其先后关系可分为先致密后成藏型、先成藏后致密型和边成藏边致密型 3 种情况。研究区属于边成藏边致密型^[21-22]。通过油气包裹体分析表明, 研究区存在 3 期油气充注(图 8), 第 1 期油气充注时间为 19~17 Ma, 第 2 期油气充注为 17~9 Ma, 第 3 期油气充注时间为 7~0 Ma, 其中, 研究区成藏与第 3 期油气充注有关^[21]。根据研究区各构造带花港组储层实测物性资料及成岩-孔隙演化综合分析认为, 中成岩 A2 期对应的成岩环境开始由酸性向碱性发生转变导致溶蚀作用减弱, 伴随着晚期碳酸盐、硅质等胶结作用发育以及机械压实作用强度的持续增大, 储层孔隙度逐渐降低至约 10%, 并逐渐趋于致密。因此, 进入中成岩 A2 期的地质时间即为储层逐渐趋于致密化的开始时间。研究区花港组下、上段储层致密化开始时间分别为 18~15 Ma 和 2.75~0 Ma。花上段储层在经历 7~0 Ma 第 3 期大规模油气充注的同时, 总体逐渐趋于致密(图 8), 属于边致密边成藏型特低渗油藏。

3.2 “甜点”的地球物理预测

由于研究区“甜点”厚度较薄, 远超目前地震的分辨率, 因此, 地球物理仅能预测有利的“甜点”发育区。地质分析表明, “甜点”受沉积主控, 高能水动力的厚砂区“甜点”发育的概率大。因此, 精细刻画砂体的厚度对“甜点”发育区具有一定指示作用。首先对研究区道集进行优化处理, 基于优化后的道集数据计算梯度数据, 并进行 -90° 相移相位旋转, 得到梯度 -90° 相移资料。采用该资料可以精细刻



(a)Z3井, 4 288.4 m, H5a, 细砂岩; (b)Z3井, 4 294 m, H5a, 中砂岩; (c)Z2井, 4 247 m, H5a, 含砾粗砂岩; (d)Z3井, 4 304.9 m, 方解石早期连晶式胶结; (e)Z4井, 4 297 m, 方解石、铁白云石晚期孔隙充填式胶结; (f)Z3井, 4 295.2 m, 蜂窝状伊利石、伊蒙混层; (g)ZZ3井, 4 289.4 m, 搭桥状伊利石; (h)Z3井, 4 300.0 m, H5a, 绒毛状绿泥石; (i)Z2井, 4 019.7 m, H4b, 包壳状绿泥石; (j)Z3井, 4 018.8 m, H4b, 长石溶蚀; (k)Z4井, 4 339 m, H5a, 粒间溶孔; (l)Z2井, 3 992.8 m, H4b, 粒内溶孔; (m)Z3井, 4 294.2 m, H5, 穿粒缝; (n)Z3井, 4 294.2 m, H5, 粒内缝; (o)Z3井, 4 294.2 m, H5, 粒缘缝

图6 储层微观特征

Fig.6 Microscopic characteristics of reservoir

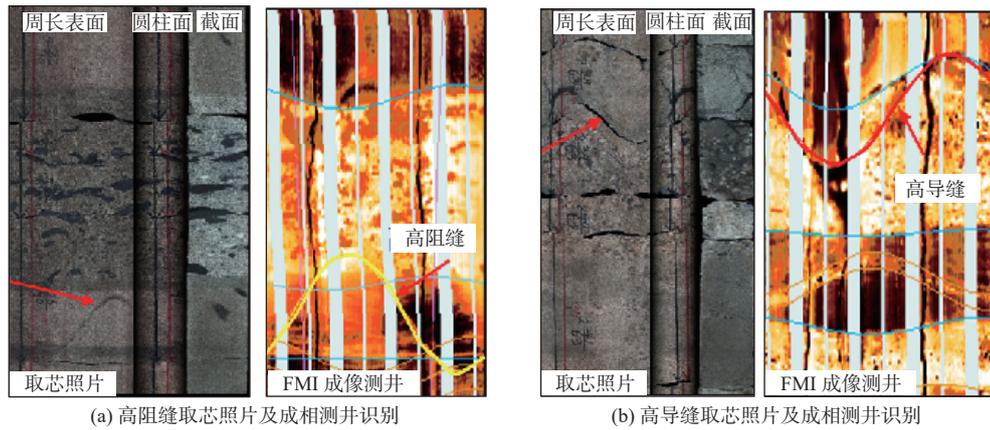


图 7 研究区 H5 层裂缝测井响应

Fig.7 Study on fracture logging response of H5 layer in the research area

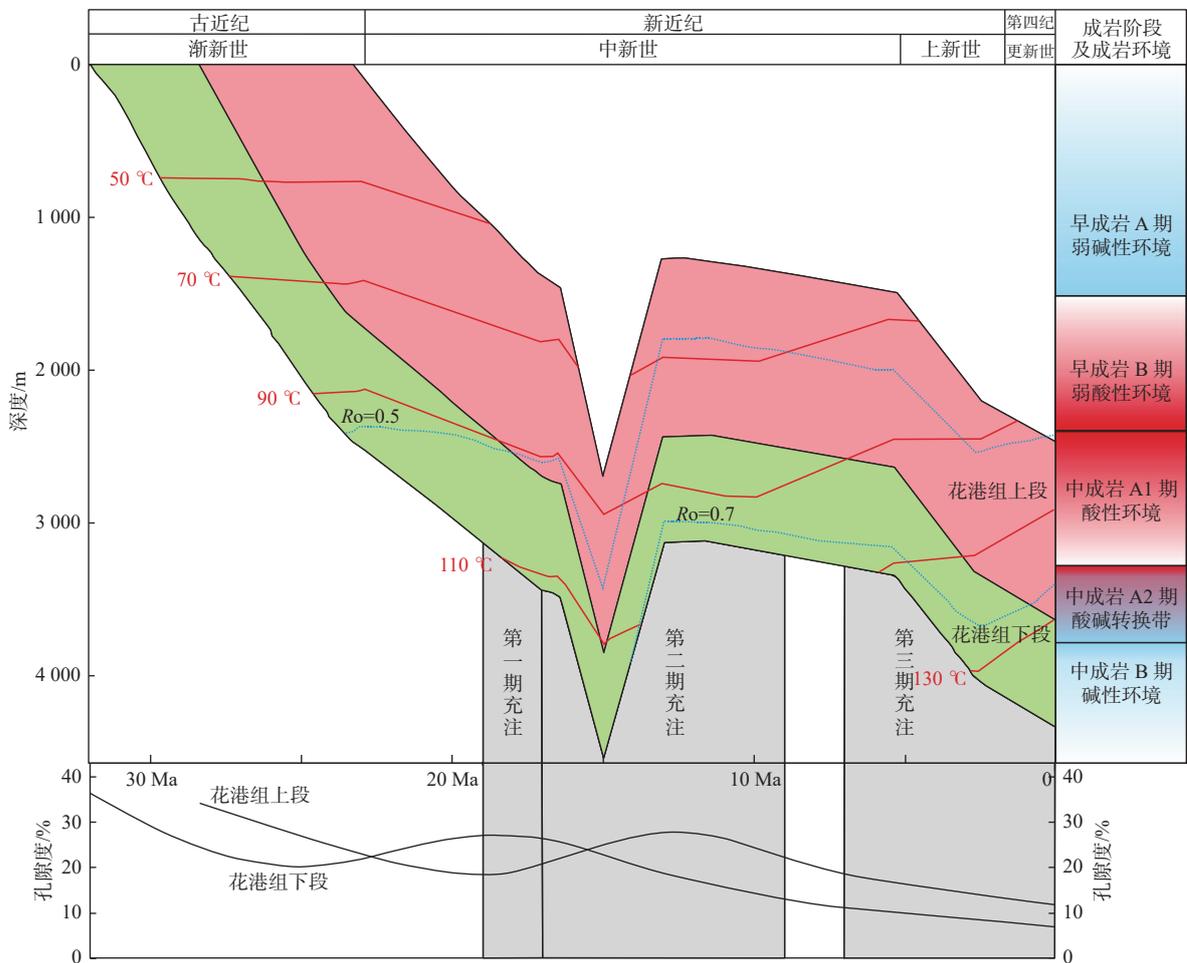
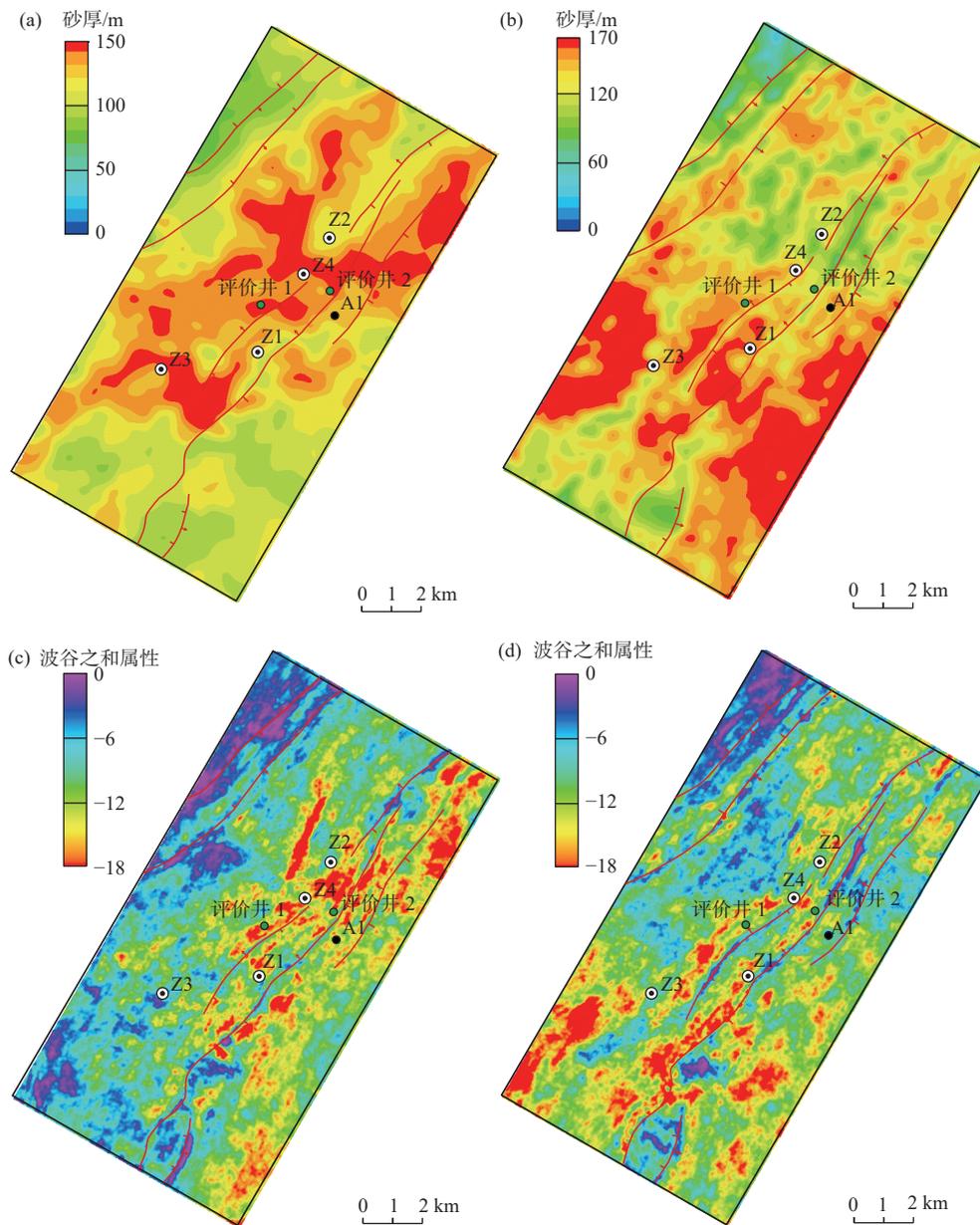


图 8 研究区油气充注和目的层埋藏史

Fig.8 Oil and gas injection and burial history of the study area

画砂体的顶面和底面构造,两者相减可以得到 H4 和 H5 的砂厚图(图 9)。H4b 砂体厚度整体为 120 m,其中,北部位砂体更厚;H5a 砂体厚度整体为 130 m,其中南部位砂体厚度更厚。厚砂区为“甜点”的有利发育区。此外,地震正演分析表明,“甜点”发育

段对应的梯度振幅属性较强。基于地震解释的砂体顶面和砂体底面层位,提取梯度波谷和属性(目的层段时窗内所有负的振幅值求和),可以定性识别“甜点”储层发育区。波谷和属性越强,“甜点”储层发育的概率越高。结合砂厚图、波谷和属性图



(a)H4b 层砂体厚度图; (b)H5a 层砂体厚度图; (c)H4b 层梯度波谷之和属性平面图; (d)H5a 层梯度波谷之和属性平面图

图9 砂厚及“甜点”平面属性

Fig.9 Sand thickness and plane attributes of sweet spot

最终确定了孔隙型“甜点”发育的平面有利区。纵向上,主要参考已钻井“甜点”发育的位置,定性预测“甜点”发育区。通过小层对比(图 10),发现 H4 “甜点”主要发育在 H4b2 和 H4b3 小层,H5 “甜点”主要发育在 H5a3 和 H5a4 小层。因此,纵向上“甜点”主要发育在河道砂体的中部和中上部。A1 井在最大波谷和平面属性(图 9c)和梯度剖面(图 5b)上振幅较强,钻前预测发育“甜点”。实钻表明,A1 井在 H4b 层钻遇气层 55 m,其中,渗透率 $>1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的“甜点”储层 16 m,该井层日产气 15 万 m^3 ,产量 20 万 m^3 ,验证了孔隙型“甜点”预测的可靠性。

通常海上钻井较少,取芯数量有限,微断裂的预测多依靠地震资料来识别,目前,地震资料预测微断裂的方法主要分为 2 大类:叠前各向异性反演微断裂检测^[23-24]和叠后几何属性类微断裂检测^[25-26]。前者不仅可以检测规模微断裂群,而且能够较准确地检测微断裂方向,但对地震资料要求较高,需宽方位地震资料才可开展;后者对地震资料要求相对较低,通过叠后地震资料就可开展,应用更广泛。断层或微断裂在地震剖面上往往表现为波形突变或不连续的特征,多种地震属性也会发生相应的变化,微断裂预测就是通过属性变化突出显

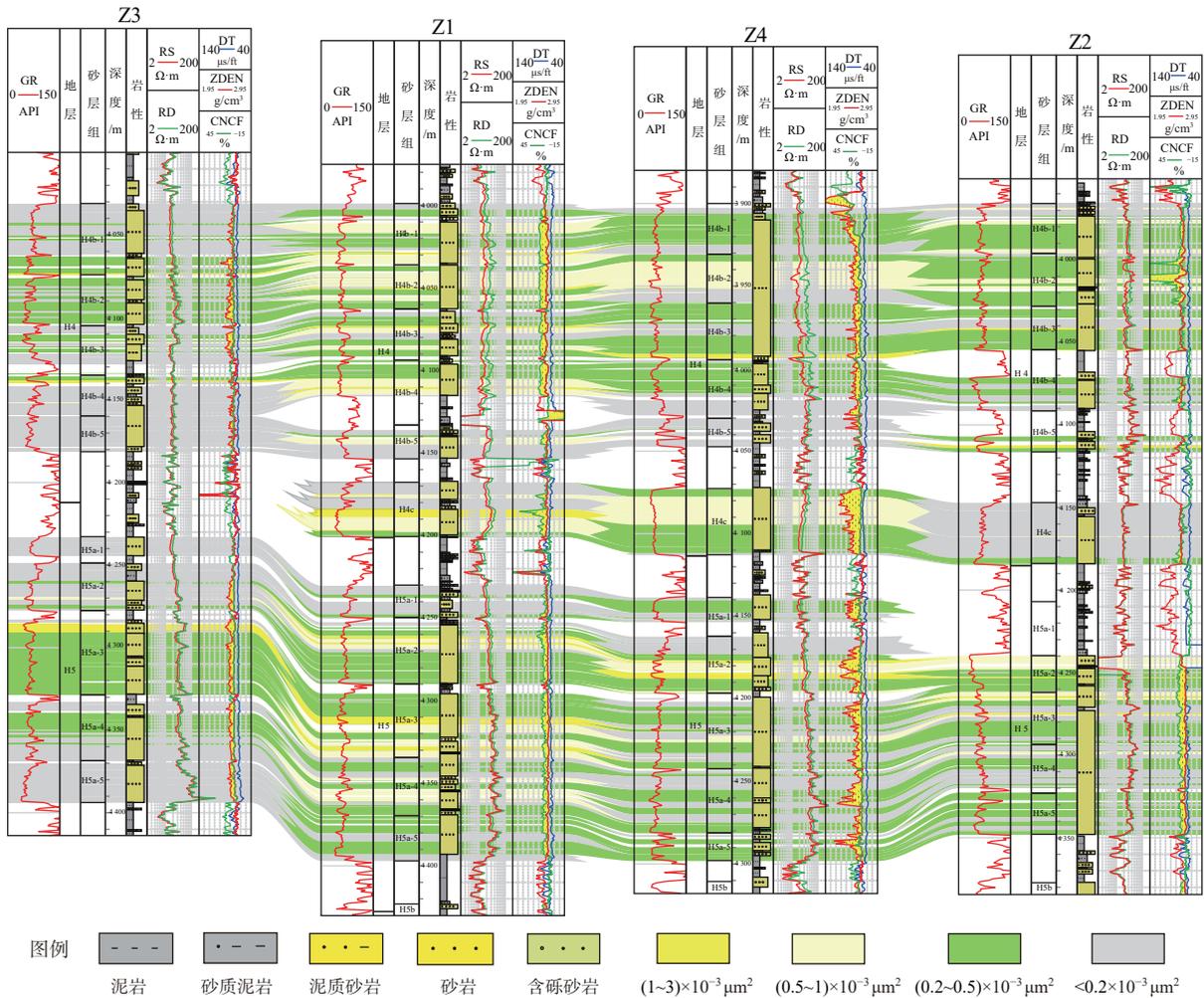


图 10 小层连井渗透率对比

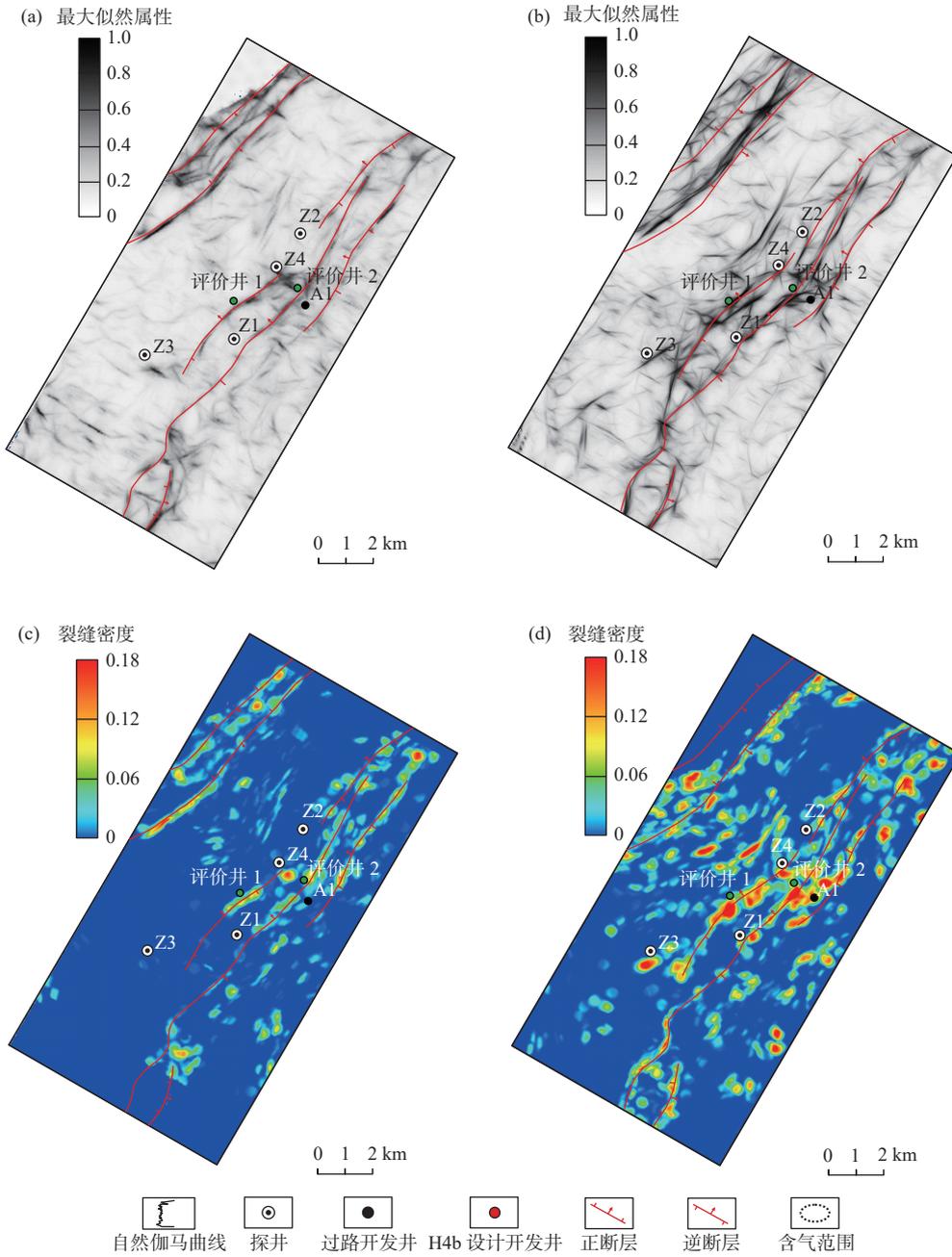
Fig.10 Comparison chart of permeability in consecutive wells

示其分布和发育情况。常见的相干体、曲率体和蚂蚁体对微断裂发育位置识别较模糊,给断裂的准确解释带来一定的不确定性,而最大似然属性通过细化算法与断裂概率体属性相结合,将属性优化后能更清晰准确地反映断裂。采用最大似然属性可以识别裂缝“甜点”发育区(图 5c)。在最大似然属性的基础上,可以计算裂缝密度,定量刻画“甜点”发育区域。最大似然属性表明(图 11),H5a 比 H4b 裂缝更发育,裂缝密度更大,最大似然属性异常更明显。裂缝呈条带状分布,主要位于裂缝附近和构造强挤压区两侧,Z4、Z2 和 A1 井附近裂缝更发育(图 5c),其中,Z1 井区北侧裂缝密度最大,Z2 井区次之。Z2 井钻井过程中,在 H5 层发生泥浆漏失,出现后效气,最大气窜速度 41 m³/h,表明发育裂缝。同时,Z2 井 H5 层特低渗储层测试日产气 4.9 万 m³,证实裂缝发育对特低渗气藏产能释放起到关键作用。

4 指导井位部署

在“甜点”分类、成因分析的基础上,采用地球物理方法预测,得到了“甜点”的分布结果。整体上,H4 层“甜点”平面上发育在研究区北部和东部,纵向上位于 H4b2 和 H4b3 小层。H5 层“甜点”平面上主要位于研究区南部,靠近断裂处“甜点”的概率高,纵向上位于 H5a3 和 H5a4 小层。在优选“甜点”发育区的基础上,针对 H4b 层,选择东部强梯度区部署先导试验井 A1 井。钻探结果表明,A1 井在 H4 层钻遇 16 m 厚的“甜点”储层,渗透率 > 1 × 10⁻³ μm²。该井生产效果较好,日产天然气 20 万 m³。

为了实现 H4—H5 层特低渗气藏的有效开发,要尽可能提高“甜点”钻遇率,综合考虑孔隙“甜点”和裂缝性“甜点”发育区来部署开发井。由于 H4—H5 储层厚度大, > 100 m,单期“甜点”厚度薄,仅



(a)H4b层最大似然属性平面图; (b)H5a层最大似然属性平面图; (c)H4b层裂缝密度属性平面图; (d)H5a层裂缝密度属性平面图

图 11 裂缝平面属性

Fig.11 Fracture plane attributes

1~3 m。为了提高“甜点”钻遇率,考虑 H4 和 H5 整体开发,选择 H4b 孔隙型“甜点”储层和 H5 裂缝型“甜点”叠合区部署先导试验井开发。综合考虑裂缝预测、储层“甜点”分布,优选 A1 井西侧和 Z4 井南部“甜点”叠合区为有利区带(图 9a、c 和图 11b、d)。在“甜点”发育区确定的基础上,设计部署 2 口多底井,试验井大斜度段位于 H5a 层,水平段分支部署在 H4b 层,兼顾 H4 和 H5 “甜点”,实现特低渗气藏的有效开发。

5 结论

(1)基于梯度-90°相移技术可以较好刻画暗点型厚储层,实现砂体顶底的精细刻画和厚度精确表征。

(2)H4—H5 发育孔隙型和裂缝型 2 种类型的“甜点”。H4 层主要发育孔隙型“甜点”,受沉积控制,粗粒相带为有利岩相,厚砂区的高能辫状水道

为有利的沉积相带,有利区主要位于研究北部和西部;H5层发育孔隙型和裂缝型“甜点”,裂缝型“甜点”在靠近断裂附近和构造强挤压区较发育。

(3)基于“甜点”发育的结果,优选孔隙“甜点”和裂缝“甜点”叠合区,部署2口多底井实现特低渗气藏的有效开发。先导实现试验井A1钻遇H4层“甜点”,日产天然气20万 m^3 ,生产效果较好。

参考文献:

- [1] 杜学斌,陆永潮,曹强,等.东海盆地西湖凹陷深部储层“相-岩-温”三元分级评价原则与效果[J].地质科技通报,2020,39(3):10-19.
- DU X B, LU Y C, CAO Q, et al. Grading evaluation of deep reservoir in Xihu Depression, East China Sea Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 10-19.
- [2] 赵仲祥,董春梅,林承焰,等.低渗-致密砂岩储层“甜点”成因机制研究:以西湖凹陷X气田花港组为例[J].中国矿业大学学报,2018,47(5):995-1007.
- ZHAO Z X, DONG C M, LIN C Y, et al. Formation mechanism of "sweet spot" in low permeability and tight gas reservoirs: a case study of Huangang Formation in X Gasfield, Xihu Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 995-1007.
- [3] 赵仲祥,董春梅,林承焰,等.西湖凹陷深层低渗-致密气藏“甜点”类型划分及成因探讨[J].石油与天然气地质,2018,39(4):778-790.
- ZHAO Z X, DONG C M, LIN C Y, et al. Classification and origin of "sweet spots" in deep low permeability tight gas reservoirs, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 778-790.
- [4] 蔡勋育,邱桂强,孙冬胜,等.中国中西部大型盆地致密砂岩油气“甜点”类型与特征[J].石油与天然气地质,2020,41(4):684-695.
- CAI X Y, QIU G Q, SUN D S, et al. Types and characteristics of tight sandstone sweet spots in large basins of central-western China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 684-695.
- [5] 刘君龙,胡宗全,刘忠群,等.四川盆地川西坳陷新场须家河组二段气藏甜点模式及形成机理[J].石油与天然气地质,2021,42(4):852-862.
- LIU J L, HU Z Q, LIU Z Q, et al. Gas pool sweet spot models and their forming mechanism in the Xu 2 Member in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4): 852-862.
- [6] 陈雪珍,曲永强,许多年,等.准噶尔盆地玛北斜坡区甜点储层分类及成因模式[J].天然气地球科学,2020,31(11):1524-1536.
- CHEN X Z, QU Y Q, XU D N, et al. Classification and genetic model of "sweet spot" reservoirs in Mabei slope area, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(11): 1524-1536.
- [7] 杨升宇,张金川,黄卫东,等.吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J].石油学报,2013,34(2):272-282.
- YANG S Y, ZHANG J C, HUANG W D, et al. "Sweet spot" types of reservoirs and genesis of tight sandstone gas in Kekeya area, Turpan-Hami Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 272-282.
- [8] 潘辉,蒋裕强,朱讯,等.河流相致密砂岩气地质甜点评价:以四川盆地川中地区侏罗系沙溪庙组二段1亚段为例[J].石油与天然气地质,2024,45(2):471-485.
- PAN H, JIANG Y Q, ZHU X, et al. Evaluation of geological sweet spots in fluvial tight sandstone gas: a case study of the first submember of the second member of the Jurassic Shaximiao Formation, Central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 471-485.
- [9] 姜敏,杨香华,姚光庆,等.自生黏土矿物与甜点储层的关系:以涪西南凹陷和文昌A凹陷为例[J].中国地质调查,2021,8(1):13-23.
- LOU M, YANG X L, YAO G Q, et al. Relationship between authigenic clay mineral and dessert reservoir: a case study in Weixinan Sag and Wenchang A Sag[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(1): 13-23.
- [10] 姜敏,杨香华,姚光庆,等.涪西南凹陷流三段储层成岩相分析与甜点储层预测[J].海洋地质与第四纪地质,2020,40(3):171-184.
- LOU M, YANG X H, YAO G Q, et al. Diagenetic facies analysis and sweet point reservoir prediction for the 3rd Member of Liushagang Formation in the Weixinan Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(3): 171-184.
- [11] 许多年,尹路,瞿建华,等.低渗透砂砾岩“甜点”储层预测方法及应用:以准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡区三叠系百口泉组为例[J].天然气地球科学,2015,26(S1):154-161.
- XU D N, YIN L, QU J H, et al. Prediction method of the low permeability sandy-conglomerate "Sweet Point" reservoirs and its application: a case study of Mahu Depression northern slope area in the Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(S1): 154-161.
- [12] 车国琼,王立恩,汪轰静,等.断层对致密砂岩气藏甜点区的控制作用:以四川盆地中部蓬莱地区须二段气藏为例[J].天然气工业,2019,39(9):22-32.
- CHE G Q, WANG L E, WANG H J, et al. Control action of faults on the sweet spots of tight sandstone gas reservoir: a case study of the second Member of Xujiahe gas reservoir in the Penglai area, Central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9): 22-32.
- [13] 李国斌,张亚军,谢天峰,等.煤系地层致密砂岩气甜点区地震逐级预测:以鄂尔多斯盆地东南缘下二叠统山西组2—3亚段为例[J].天然气工业,2020,40(5):34-42.
- LI G B, ZHANG Y J, XIE T F, et al. Seismic stepped prediction technology for tight sandstone gas sweet spot in coal measure strata: A case study of the Submember 23 of the Lower Permian Shanxi Formation along the southeastern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 34-42.

- [14] 李炳颖, 涂齐催, 刘江, 等. 低渗储层岩石物理建模新方法及其在东海 Z 气田中的应用 [J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(2): 59-67.
LI B Y, TU Q C, LIU J, et al. A new method of rock physics modeling and its application in low permeability reservoirs of Z Gasfield, East Sea Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(2): 59-67.
- [15] 何贤科, 娄敏, 涂齐催, 等. 厚层低渗气藏“甜点”预测: 以东海陆架盆地西湖凹陷 Z 气田花港组为例 [J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(6): 1410-1422.
HE X K, LOU M, TU Q C, et al. Sweet spot prediction in thick gas reservoirs with low permeability in Huagang Formation of Z Gasfield in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(6): 1410-1422.
- [16] 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 Y, XU G S, ZENG B, 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.
- [17] 苏奥, 陈红汉, 王存武, 等. 低渗致密砂岩储层的致密化机理与成岩流体演化: 以东海西湖凹陷中央背斜带北部花港组为例 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 972-981.
SU A, CHEN H H, WANG C W, et al. Densification mechanism and diagenesis fluid evolution of Low-porosity and low-permeability tight sandstone reservoir: an example from Huagang Formation in the northern of the central anticlinal zone in Xihu Depression, East China Sea[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 972-981.
- [18] 蔡华, 张建培, 唐贤君. 西湖凹陷断裂系统特征及其控藏机制 [J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 18-26.
CAI H, ZHANG J P, TANG X J, et al. Characteristics of the fault systems and their control on hydrocarbon accumulation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 18-26.
- [19] 何贤科, 娄敏, 李炳颖, 等. Z 气田深层储集层地球物理预测 [J]. 物探与化探, 2024, 48(3): 609-617.
HE X K, LOU M, LI B Y, et al. Geophysical forecasting of deep reservoirs in the Z Gasfield[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(3): 609-617.
- [20] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations[J]. Geophysics, 1985, 50(9): 609-614.
- [21] 张迎朝, 陈忠云, 刁慧, 等. 东海盆地 X 凹陷油气成藏模式与勘探突破 [J]. 中国海上油气, 2024, 36(2): 1-12.
ZHANG Y Z, CHEN Z Y, DIAO H, et al. Reservoir-forming models and exploration breakthroughs in X Sag of East China Sea Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(2): 1-12.
- [22] 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.
ZHANG Y Z, ZOU W, CHEN Z Y, 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.
- [23] 刘俊州, 韩磊, 时磊, 等. 致密砂岩储层多尺度裂缝地震预测技术 [J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 747-754.
LIU J Z, HAN L, SHI L, et al. Seismic prediction of tight sandstone reservoir fractures in XC area, western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 747-754.
- [24] 范廷恩, 杜昕, 马淑芳, 等. 高角度断裂约束的方位傅里叶系数裂缝预测方法及在 M 气田的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(6): 1436-1444.
FAN T E, DU X, MA S F, et al. Application of high-angle-fault constrained azimuthal Fourier coefficient fracture prediction in M Gasfield[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(6): 1436-1444.
- [25] 甄宗玉, 陈华靖, 张鹏志, 等. 基于特定反射系数压制与最大似然属性的断层识别方法 [J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 335-339.
ZHEN Z Y, CHEN H J, ZHANG P Z, et al. The fault identification method based on specific reflection coefficient suppression and maximum likelihood attribute[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(3): 335-339.
- [26] 王腊梅, 娄敏, 李炳颖, 等. 最大似然属性在致密砂岩储层微断裂识别中的应用: 以西湖凹陷花港组为例 [J]. 石油地质与工程, 2024, 38(1): 1-5.
WANG L M, LOU M, LI B Y, et al. Maximum likelihood attribute and its application in micro-fractures identification of tight sandstone reservoirs: a case study of Huagang Formation in Xihu Sag[J]. Petroleum Geology And Engineering, 2024, 38(1): 1-5.

Prediction of thin "sweet spot" reservoirs in offshore areas and its application in Z Gas Field

LOU Min, DUAN Dongping, HE Xianke, LI Wenjun, WANG Wenji, LI Bingying, RONG Chengrui, LIU Binbin
(Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The development of extra-low permeability gas reservoirs is difficult, and "sweet spot" prediction and well location design are the key to the effective development of low-permeability gas reservoirs. First, ultra-low permeability reservoir was finely characterized and the thickness of sand body was predicted using the gradient -90° phase shift of seismic data, and the types and causes of "sweet spot" development were identified through microscopic and logging data analysis. The gradient troughs and the attributes were identified qualitatively, and the maximum likelihood attribute and fracture density were used to identify the fracture type "sweet spot" development area, such as those in the H4 layer in the northern and eastern parts of the study area in horizontal direction, and H4b2 and H4b3 sublayers in the vertical direction, while in the H5 layer developed fissure type and pore type "sweet spots" in the southern part of the study area on the plane and in the H5a3 and H5a4 sublayers in the vertical. The distribution of pore type "sweet spots" is controlled by favorable sedimentary facies zones, while fracture type "sweet spots" mainly develop near faults and the wing areas of strong compression zones. Based on the characterization of "sweet spots", two multi-bottom test wells were deployed in the H5a and the H4b layers, and achieved effective development of ultra-low permeability gas reservoirs. This study provided a reference for prediction of "sweet spots" in deep ultra-low permeability gas reservoirs and development plans.

Key words: extra-low permeability gas reservoir; "sweet spot" prediction; efficient well design; gas reservoir development