

文章编号: 1008-2336 (2024) 04-0001-07

西湖凹陷斜坡外带隐蔽圈闭识别及潜力分析

周静毅¹, 李久娣², 董静雯¹, 刘明阳¹, 王允洪¹

(1. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司勘探开发研究院, 上海 200120;

2. 中国石油化工股份有限公司上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要: 在西湖凹陷斜坡外带勘探启示下, 斜坡外带部署了三维地震采集, 以期获得更多勘探发现。在地层发育特征分析基础上, 结合测录井和岩心资料进行了沉积相分析, 利用波阻抗反演和地震正演模拟结果进行隐蔽圈闭识别, 并结合油源疏导、物性条件等成藏条件做了地层超覆圈闭综合评价。结果表明, 研究区平湖组发育三角洲沉积、花港组发育辫状河沉积, 在平湖组和花港组共识别出4个地层超覆型隐蔽圈闭, 综合评价认为斜坡外带识别的隐蔽圈闭(地层超覆圈闭)资源规模近 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$, 拓展了西湖凹陷的勘探潜力, 为下步勘探发现奠定了基础。

关键词: 西湖凹陷; 沉积相; 地震正演; 波阻抗反演; 隐蔽圈闭

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

DOI:10.3969/j.issn.1008-2336.2024.04.001

Identification and Potential Analysis of Subtle Traps in the Outer Slope Zone of Xihu Sag

ZHOU Jingyi¹, LI Jiudi², DONG Jingwen¹, LIU Mingyang¹, WANG Yunhong¹

(1. Institute of Exploration and Development, SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China;

2. SINOPEC Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: Inspired by the exploration of the outer slope zone in Xihu Sag, 3D seismic acquisition has been deployed in the outer slope zone in order to obtain more exploration discoveries. Based on the analysis of stratigraphic development characteristics, sedimentary facies analysis was carried out by combing logging data and core data. Subtle traps identification was carried out by using wave impedance inversion and seismic forward modeling results, and a comprehensive evaluation of stratigraphic overlap traps was carried out by analyzing accumulation conditions such as oil source diversion and physical properties. The results indicate that Pinghu Formation in the study area has developed deltaic sedimentation, while Huagang Formation has developed braided river sedimentation. Four different stratigraphic overlap type subtle traps were identified in Pinghu Formation and Huagang Formation. The comprehensive evaluation suggests that the subtle traps (stratigraphic overlap traps) which are identified in the outer slope zone have a resource scale of nearly 30 billion cubic meters, these resources expand the exploration potential of Xihu Sag and lay a foundation for future exploration discoveries.

Key words: Xihu Sag; sedimentary facies; seismic forward modeling; wave impedance inversion; subtle traps

西湖凹陷作为中国东部近海最大的含油气盆地, 近年来的勘探已从传统的构造勘探发现转向构造-岩性复合勘探。而西部斜坡外带钻井已揭示斜坡外带发育岩性等隐蔽圈闭, 斜坡外带部署三维地震采集后, 尚未开展隐蔽圈闭研究。为进一步明确西湖凹陷斜坡外带的资源规模, 通过少井和新采集地震资料, 落实了多个隐蔽圈闭。

1 区域概况

西湖凹陷是一个富生烃凹陷, 从西向东分为保俶

斜坡带、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹和天屏断阶带(图1), 在斜坡带和中央背斜带已发现多个油气田^[1-3]。其中, 斜坡带以二级主断裂平湖主断裂为界分为斜坡内带和斜坡外带。从斜坡外带1井揭示的一套往斜坡外带尖灭的含油砂岩来分析, 斜坡外带具备发育隐蔽圈闭的背景。为进一步拓展斜坡外带的资源规模, 在斜坡外带部署了三维地震采集(图1中蓝色边框), 以期落实一批圈闭, 提升整个西湖凹陷的资源量和勘探潜力。从表1来看, 区块纵向主要发育古新统、始新统、渐新统、中新统和上新统地层。为此

收稿日期: 2024-05-29; 改回日期: 2024-09-27

第一作者简介: 周静毅, 男, 1980年生, 硕士, 高级工程师, 2005年毕业于中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业, 主要从事地震资料综合解释与海洋油气勘探工作。E-mail: zhoujingyi.shhy@sinopec.com。

从斜坡外带已钻井的单井相分析开展沉积体系的分析明确了研究区砂体的沉积相特征，通过岩石物理分析确定波阻抗属性可以区分砂泥岩，利用三维地震资料解释和地震正演分析落实了多个隐蔽圈闭目标，利用

地震波阻抗属性开展了储盖组合分析，结合油源疏导、物性等开展成藏条件分析，并对目标做了综合评价，认为斜坡外带的地层超覆尖灭型隐蔽圈闭具备一定的资源规模，提升了西湖凹陷斜坡外带的勘探潜力。

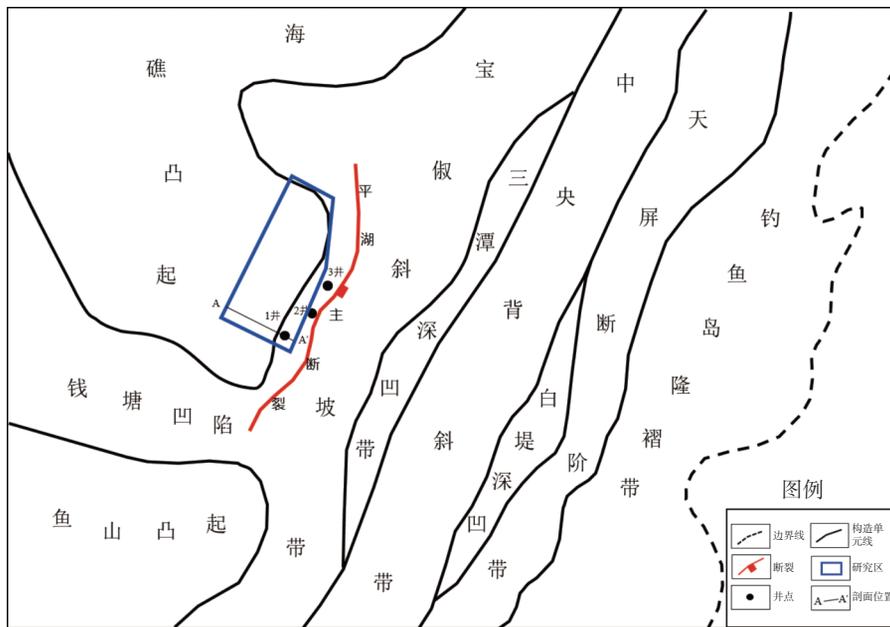


图1 西湖凹陷斜坡外带三维区位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the three-dimensional area in the outer slope zone of Xihu Sag

表1 西湖凹陷斜坡带地层发育情况

Table 1 Stratigraphic development of slope zone in Xihu sag

系	统	组	代号	地震反射界面	构造运动	地层层序			
						一级	二级	三级	
第四系	全新统	东海群	Qd	T ₁ ¹	龙井运动	A	I		
	更新统								
新近系	上新统	三潭组	N ₂ s	T ₂ ⁰		B	II	II ₁	
	中新统	柳浪组	N ₁ l	T ₂ ²				II ₂	
		玉泉组	N ₁ y	T ₂ ³				III ₁	
		龙井组	N ₁ l	T ₂ ⁴				III ₂	
古近系	渐新统	花港组	上	E ₃ h2		T ₂ ⁵	C	IV	IV ₁
			下	E ₃ h1		T ₃ ⁰			IV ₂
	始新统	平湖组	上	E ₂ p3		T ₃ ¹	V	VI	
			中	E ₂ p2		T ₃ ²			
			下	E ₂ p1	T ₃ ⁴				
			宝石组	E ₂ b	T ₄ ⁰				
			古新统	E ₁	T _g				
前古近系									

2 沉积体系分析

2.1 斜坡外带沉积相分析

2.1.1 钻井相分析

地层划分主要利用工区内的1井及离工区较近的

2井和3井开展，对照表1西湖凹陷斜坡外带地层发育情况来看，斜坡外带不仅地层厚度减薄，纵向地层有所减少，地层主要发育有中新统龙井组、玉泉组和柳浪组、渐新统花港组和始新统平湖组上段、中段和基底，始新统平湖组下段和宝石组地层不发育。从1

井所揭示的地层来看, 斜坡外带地层主要发育有中新统龙井组、玉泉组和柳浪组、渐新统花港组和始新统平湖组上段、中段, 始新统平湖组下段和宝石组地层不发育, 其中花港组下段、平湖组地层超覆在基底上形成超覆尖灭圈闭。

据前人研究^[4-7]认为: 平湖地区主要发育三角洲及河流沉积, 平湖组主要发育三角洲沉积, 花港组主要发育河流相沉积。从岩心相的角度分析, 2 井取心位置位于 P11 层, 其砾石成分以火成岩砾石为主, 岩心中可见标志快速堆积水流的直立砾石 (图 2a), 为主河道沉积的表现; 该井以含砾砂岩、粗砂岩、粉细砂岩为主要的含油性砂岩类型 (图 2b), 是次级河道

微相; 其泥岩可见撕裂屑, 表明底部泥岩经水流冲刷搅动形成 (图 2c), 为泥坪沉积微相。从测井相特征来看 (图 2d): 从下往上, 垂向表现为向上变细的正旋回, 表现为从底部单一厚层主水道发育到后期变为泛滥平原。据此推断平湖组为三角洲平原沉积特征。

从 2 井的岩心和测井相 (2 300~2 600 m) 角度来看, 花港组河流特征明显 (图 3)。图 3b 左部图片底部以块状层理、大型槽状、板状交错理为主, 向上层理规模变小。砂岩厚度大, 粒度粗, 以垂向加积为主, 电测曲线具有箱形或钟形的特点, 为辫状河道微相。图 3b 右部岩心图片反映的岩性以泥质为主, 局部范围含粉砂, 不显层理, 属于泛滥平原沉积微相。

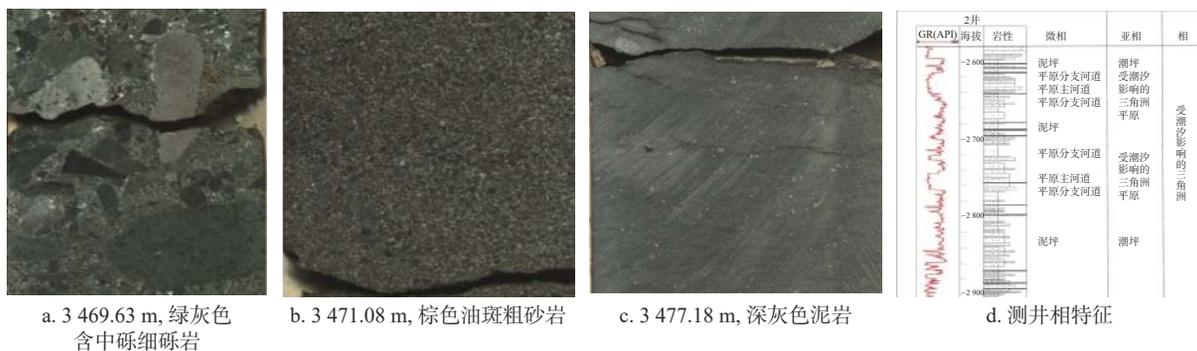


图 2 平湖组取心和沉积相特征岩心特征

Fig. 2 Core characteristics and sedimentary facies characteristics of Pinghu Formation

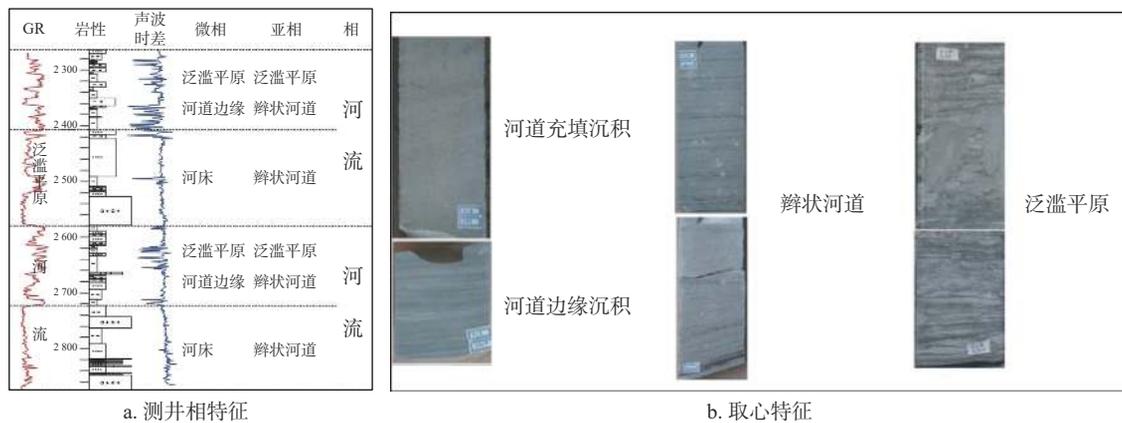


图 3 花港组取心和测井相特征

Fig. 3 Core characteristics and sedimentary facies characteristics of Huangang Formation

2.2 斜坡带外带沉积体系分析

据 1 井、2 井、3 井揭示 (位置见图 1), 在平湖组发育 3 套较好的碎屑岩储层 (图 4), 在这些砂层或砂层组之间都有 5~10 m 左右的泥岩或碳质泥岩相隔, 这些泥岩从厚度及稳定性方面来说, 可以作为局部盖层, 对于隐蔽圈闭的发育是有利的。在花港组, 特别是花上段, 发育 20~60 m 厚度较大的泥岩, 与花港组下段的储层相配合形成有利储盖组合。

根据沉积相研究认为, 研究区平湖组主要发育三

角洲平原沉积, 河道形态清晰、走向明确, 储集体类型为分流河道砂体 (图 5a); 花港组发育辫状河沉积, 河道分岔多, 频繁改道相互切割, 优势储集体类型为心滩沉积物等 (图 5b、图 5c)。

3 隐蔽圈闭识别

研究区地层超覆圈闭形成机理是始新世末期和渐新世早期处于断拗转换, 地层沉积处于填平补齐, 始

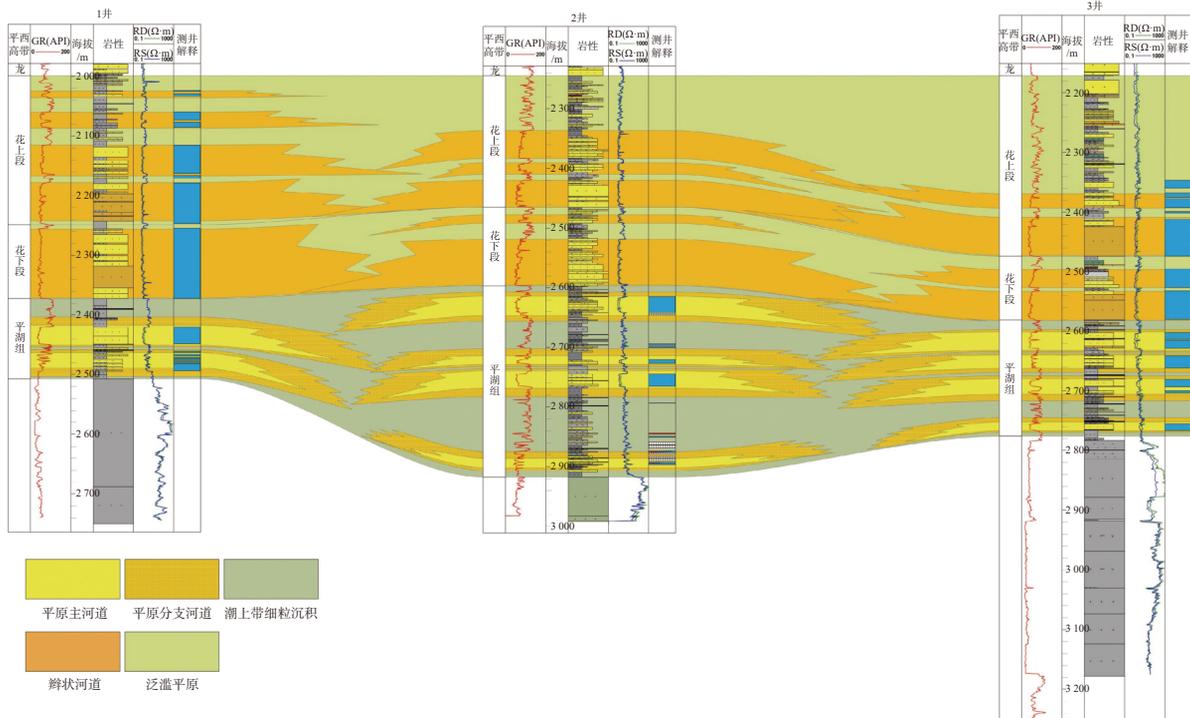


图4 连井沉积相剖面

Fig. 4 Contiguous well sedimentary facies profile

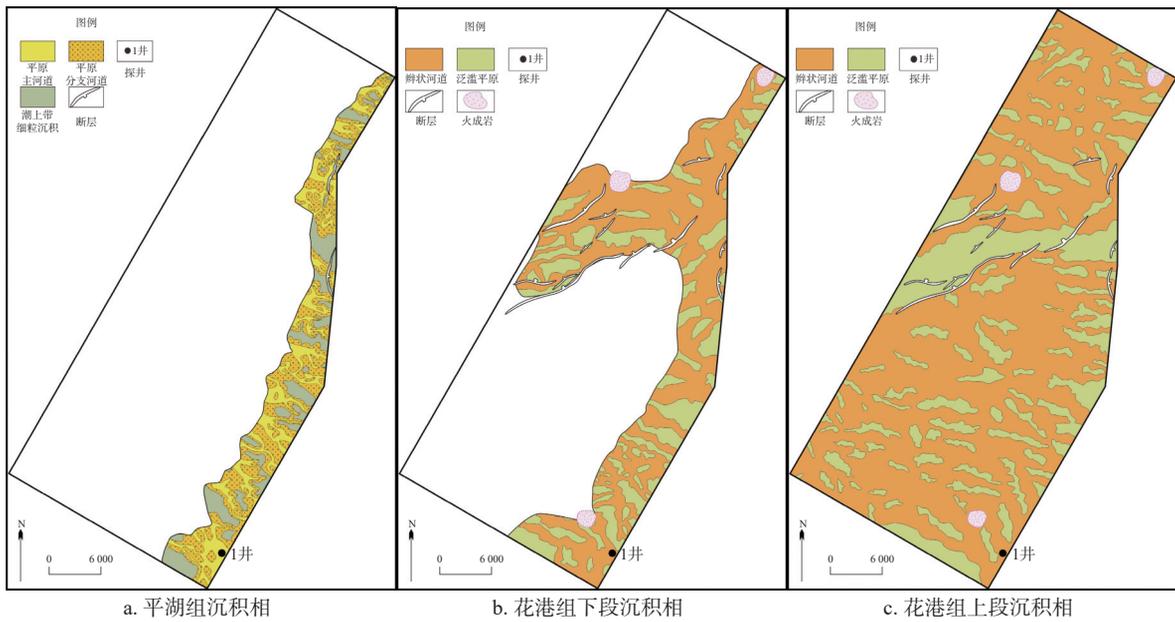


图5 三维工区沉积相图

Fig. 5 Three dimensional sedimentary facies diagram of the work area

新统晚期和渐新统晚期地层超覆于西侧的古隆起之上形成地层超覆型圈闭。在研究区利用地震资料和钻井资料开展岩石物理分析确定了波阻抗属性可以区分砂泥岩，在此基础上开展波阻抗反演、砂体厚度及储盖组合分析；通过三维解释技术确定了尖灭砂体顶底界面，利用地震正演技术明确了地震资料解释的超覆尖灭线和实际地层超覆尖灭线呈降幂关系，以此指导尖灭线的刻画，准确识别地层超覆圈闭实际地层尖灭线，据此落实圈定面积，其识别流程见图6。

3.1 波阻抗反演进行砂体预测

地层超覆尖灭圈闭是隐蔽圈闭的一种类型，它是砂体往上倾方向超覆尖灭于泥岩中形成。通过工区内钻井的岩石物理分析认为波阻抗可以有效区分砂泥岩，因此采用波阻抗反演技术进行储层预测。

3.1.1 岩石物理分析

岩石物理分析是储层物性参数和岩石弹性参数之间的桥梁，反映了储层物性参数和岩石弹性参数之间的对应关系，针对地震岩石物理学的研究有助于对油

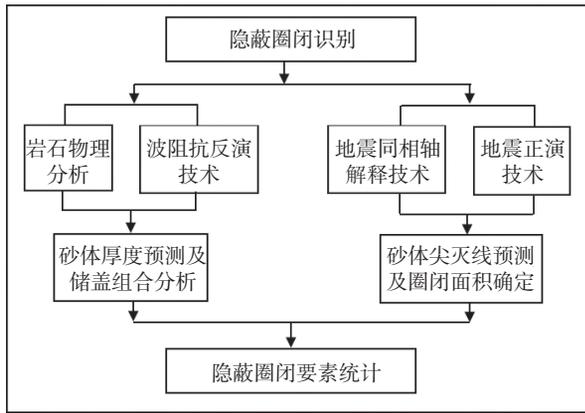


图 6 隐蔽圈闭识别流程

Fig. 6 Subtle trap identification process

气藏勘探开发过程中的地震正反演研究提供理论和实验指导。工区内已钻井 1 井、2 井井径条件相对较好, 垮塌不严重, 密度与声波时差曲线受井径影响较小。3 井曲线通过垮塌校正之后, 砂泥岩区分更明显。通

过对工区内已钻井分析知, 花港组、平湖组上段地层纵波阻抗均呈现砂低泥高的趋势。过 1 井的反演剖面见图 7, 从波阻抗反演结果分析: 从波阻抗剖面上暖色调 (黄-红) 表征砂岩, 冷色调 (绿-蓝) 表征泥岩, 波阻抗剖面所反映的砂泥岩特征与测井曲线表现的特征较为一致。

3.2 地震正演精准刻画地层超覆尖灭线

地层超覆尖灭圈闭是研究区发育的隐蔽圈闭, 它是砂体往上倾方向超覆尖灭于泥岩中形成。

对于斜坡高带而言, 已经钻井证实发育地层超覆尖灭型圈闭。根据斜坡高带西高东低的地质特点, 设计了正演模型^[8-10], 通过正演模型可以探索本地区实际地层超覆尖灭线与地震超覆尖灭线随着地层与基底的夹角、速度等参数的变化规律, 并将这一变化规律应用于斜坡外带实际地层超覆尖灭线的刻画中, 据此规律, 超覆圈闭面积根据实际地层超覆尖灭线来圈定。

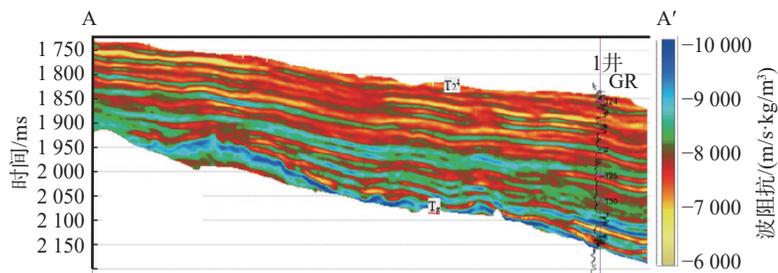


图 7 过 1 井的地震波阻抗反演剖面 (剖面位置见图 1 中的 A-A')

Fig. 7 Seismic impedance inversion profile of Well 1 (profile location shown as A-A' in Fig. 1)

3.2.1 正演模型的设计

结合斜坡高带的地质特点, 设计了一个楔状地质模型。这一模型纵向长度 1 200 m, 横向长度 10 000 m, 地层 (平湖组) 超覆于基底面 (Tg) 上。其中基底面

的倾角约为 7°, 根据地震资料的频谱分析, 其主频约为 25 Hz。根据工区内的测井资料 (1 井), 给每一地层赋予地质模型相应的速度和密度参数 (图 8)。

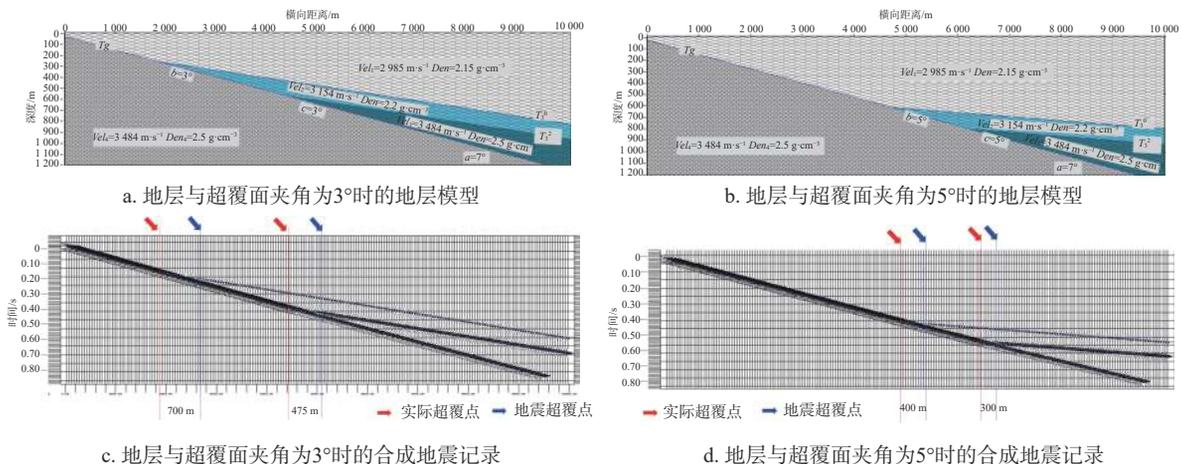


图 8 地层与超覆面不同夹角情况下的正演模型

Fig. 8 Forward modeling under different angles between strata and overlying strata

通过改变平湖组地层与基底 (超覆面) 夹角的大小, 使用自激自收原理进行正演研究, 通过改变不同

地层夹角, 探索地震同相轴尖灭点与实际地层超覆尖灭点的误差。

3.2.2 正演结果分析

据文献^[4]研究表明,地层超覆尖灭点位置受地震资料分辨率、调谐厚度、地层倾角、速度等多种因素的影响。在其它因素相同时,随着地层与基底不整合面夹角的减小,平湖组(T₃⁰和T₃²)地震反射同相轴往上倾方向尖灭点与实际地下地层尖灭点位置的距离差越来越大(表2)。

表2 地震尖灭点与地层实际尖灭点误差统计

Table 2 Statistics of error between seismic point of extinction and actual point of extinction in strata

地层界面	基底倾角(a) ^o	平湖组地层与基底面夹角(b或c) ^o	地震合成记录尖灭点与模型中地层尖灭点误差/m
T ₃ ⁰	7	3	700
T ₃ ⁰	7	4	525
T ₃ ⁰	7	5	400
T ₃ ⁰	7	6	350
T ₃ ⁰	7	7	300
T ₃ ²	7	3	475
T ₃ ²	7	4	375
T ₃ ²	7	5	300
T ₃ ²	7	6	275
T ₃ ²	7	7	250

利用地震正演模型结果拟合出尖灭点误差(实际地层尖灭点与地震同相轴尖灭点之间)与夹角的变化规律呈降幂函数关系(图9)。对于T₃⁰而言,变化规律为 $y = 2094.9x^{-1.005}$;对于T₃²而言,变化规律为 $y = 1084.9x^{-0.768}$ 。其中x为实际地层与超覆面之间的夹角,y为地震反射同相轴尖灭点与地层实际尖灭点之间距离差。

3.3 隐蔽圈闭识别

利用钻井资料开展目的层段岩石物理分析,确定

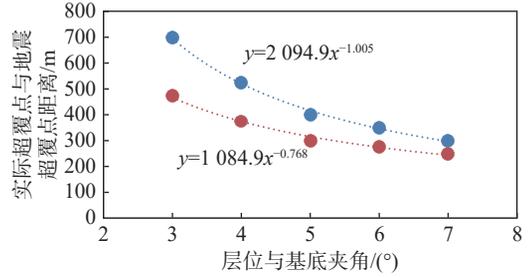


图9 实际地层超覆尖灭线的推断

Fig. 9 Inference of actual stratigraphic overlap of the pinch out line

波阻抗属性可以区分砂泥岩。根据地震波阻抗反演结果,解释出砂体的顶底界面;利用地震资料解释出的层位建立正演地质模型,制作地震正演,由于受地震资料分辨率等因素的影响确立了实际地层超覆尖灭线与地震解释的尖灭线呈降幂关系,据此可以精准刻画超覆尖灭的位置。圈闭的边界按照尖灭线来确定。综合以上方法在西湖凹陷斜坡外带在花港组下段(T₂⁵)、平湖组中段(T₃²)、上段地层(T₃⁰)识别出了1号、2号、3号和4号地层超覆尖灭型圈闭(图10a)。从地震正演结果来看,实际地层超覆尖灭线和地层与基底夹角呈现降幂关系,实际地层超覆尖灭线要比地震剖面上解释的地层超覆尖灭线向西侧推移200 m到400 m不等的距离。在平湖组中段识别出4号地层超覆圈闭,其面积为2.91 km²,幅度100 m;在平湖组上段识别出1号、2号、3号和4号共4个地层超覆圈闭;在花港组下段,识别出3号地层超覆圈闭,其面积为3.63 km²,幅度为30 m。4个圈闭的面积幅度要素统计见表3。

4 隐蔽圈闭评价

石油地质条件分析认为,研究区的油气源主要来自平湖主断裂以东平湖构造带和三潭深凹的平湖组和

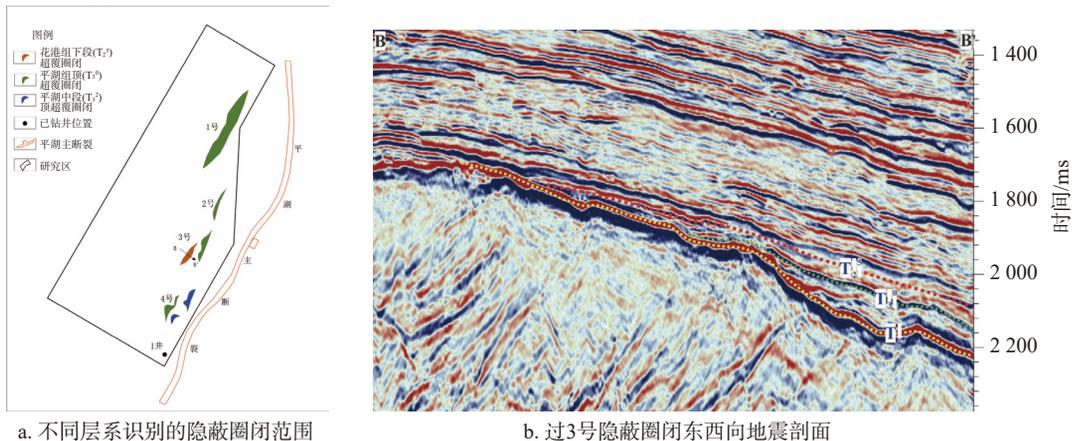


图10 研究区地层超覆圈闭平面分布图及地震剖面

Fig. 10 Plan distribution and seismic profile of stratigraphic overlap traps in the study area

表3 地层超覆尖灭型圈闭要素统计

Table 3 Statistics of key elements of overpass sharp out traps in strata

名称	圈闭类型	层位	圈闭值	
			面积/km ²	幅度/m
1号	地层超覆	T ₃ ⁰	25.25	160
2号	地层超覆	T ₃ ⁰	4.28	41
3号	地层超覆	T ₂ ⁵	3.63	30
		T ₃ ⁰	4.61	60
4号	地层超覆	T ₃ ⁰	1.11	30
		T ₃ ²	2.91	100

古新统地层。成藏条件分析认为, 斜坡高带三维工区由于上覆地层厚度小、地层埋深浅, 平湖组顶面埋深约在 2 050~2 600 m, 三维工区内平湖组基本刚达到生油门限深度, 因此本地油气源主要来自沟源主断裂以东, 纵向上依靠平湖主断裂向上运移, 横向依靠砂体进行侧向运移。由于西湖凹陷不同区块地温梯度的差异, 其生油门限在凹陷内呈起伏变化。在平湖油气田生油门限深度在 2 500~2 700 m, 渐新统及其以下地层大部分达到了生油门限。就储层条件而言, 沟源主断裂以西花港组和平湖组的埋深比平湖油气田浅; 从埋深条件分析, 储层的孔隙度、渗透率要比平湖油气田好, 孔隙度、渗透率等物性相对较好; 就盖层条件而言, 纵向上在花港组上段形成了巨厚的泥岩层, 可作为较好的区域性盖层。对识别的 4 个圈闭的含油气概率与资源规模进行圈闭优选, 综合评价认为 1 号圈闭含油气概率较高 (大于 30%), 资源量最大 (接近 $150 \times 10^8 \text{ m}^3$), 因此作为 I 类圈闭。3 号圈闭含油气性较高 (大于 35%), 且圈闭资源量规模均较大 (大于 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$), 故作为 II 类圈闭。2 号和 4 号圈闭含油气概率较小 (小于 30%), 资源量规模较小 (2 号和 4 号圈闭合计 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$), 因此将 2 号和 4 号圈闭作为备选目标 (III 类圈闭)。

5 结论

(1) 波阻抗属性是西湖凹陷斜坡外带区分砂泥岩的敏感参数, 通过地震波阻抗反演可以开展砂体预测及储盖组合分析。

(2) 地层超覆模型的地震正演明确了地层实际超覆尖灭线与地震数据上解释的地层超覆尖灭线的误差, 它们之间的差呈降幂规律, 根据这一规律, 根据实际地层超覆尖灭线圈定地层超覆圈闭的面积。

(3) 西湖凹陷斜坡外带从花港组下段到平湖组中上段识别出了 4 个地层超覆尖灭型隐蔽型圈闭, 而且具备一定的资源规模, 不仅增加了西湖凹陷的勘探目标新类型, 而且也拓展了西湖凹陷的资源规模。

参考文献:

- [1] 杨丽娜, 王丽顺. 西湖凹陷保俶斜坡断裂特征及与油气成藏的关系 [J]. 海洋石油, 2007, 27 (1): 19-24, 75.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 陈琳琳, 谢月芳. 东海西湖凹陷花港组沉积模式初探 [J]. 海洋石油, 1998, 18 (4): 15-21.
- [6] 姜雪, 肖晓光, 王宇. 多手段厘定东海西湖凹陷花港组物源体系 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39 (6): 55-64.
- [7] 刘成鑫. 东海平湖油气田平湖组沉积相研究 [J]. 海洋石油, 2010, 30 (2): 9-13.
- [8] 周静毅, 朱立新, 雷蕾. 地震正演技术在涪西探区地层超覆型隐蔽圈闭识别中的应用 [J]. 海洋石油, 2021, 41 (4): 15-21.
- [9] 白晓佳, 康永尚, 李培俊, 等. 准噶尔盆地北三台凸起西斜坡白垩系高频层序地层与油气成藏模式 [J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34 (2): 41-48.
- [10] 胡玮, 张建宁, 杨江峰, 等. 地层超覆尖灭型油气藏的储层展布与厚度精确识别技术研究 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36 (6): 2472-2478.