

文章编号: 0253-9985(2006)06-0827-14

苏北盆地复杂小断块油气成藏特征及地震识别技术

毛凤鸣, 陈安定, 严元锋, 叶绍东, 刘启东, 陈莉琼, 唐 焰

(中国石油化工股份有限公司 江苏油田分公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 苏北盆地由小型箕状凹陷组成, 断层密度高、圈闭面积小、油气贫富不均是其复杂性的主要表现。苏北盆地的成藏特点是: 1) 成藏时间为始新世晚期; 2) 生油层单向排烃; 3) 始新世断陷和古新世坳陷两种沉积体系具不同运聚特点。断陷体系发育小型不连通砂体, 油气以断裂为通道垂向运移成藏, 分布于深凹并沿断裂纵向多层分布, 以构造-岩性复合油气藏为主。坳陷体系发育大型三角洲砂体, 油气自生自储、侧向运移活跃, 在斜坡、隆起区储集, 以构造油气藏为主, 成排、成带富集; 4) 油气富集普遍受源岩成熟度、砂岩物性、断层封闭性等因素控制, 上组合受油源通道等因素控制, 中、下组合受疏导层、圈闭发育等因素控制。为适应复杂小断块油藏的勘探, 发展并完善了一整套地震采集、处理、解释技术。

关键词: 断层封闭性; 油气运移; 油气藏; 勘探技术; 复杂小断块; 箕状凹陷; 苏北盆地

中图分类号: TE112.3 文献标识码: A

Hydrocarbon pooling features and seismic recognizing technologies of small complex fault blocks in Subei basin

Mao Fengming Chen Anding Liu Yuru; Yan Yuanfeng Ye Saodong

Liu Qidong Chen Liqiong Tan Yan

(Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009)

Abstract Subei basin is composed of small half grabens and features in closely-spaced faults, small traps and homogeneous hydrocarbon abundance. Hydrocarbon pooling in Subei basin has the following characteristics: (1) The Late Eocene is the pooling period; (2) Hydrocarbon expulsion of source rocks is unilateral; (3) The migration and accumulation styles are different in the Eocene fault depression and the Palaeocene depression. The Eocene fault depression has small and isolated sandbodies, where hydrocarbons accumulate through vertical migration along the faults, the pools are distributed in the deep depression and occur vertically in multiple layers along the faults, and are dominated by structural-lithologic reservoirs. While the depression develops large delta sandbodies, hydrocarbon generation and accumulation occurring in the same layer and hydrocarbon migration is active. The pools mainly occur in the slope and uplift zones and are dominated by structural reservoirs. (4) Hydrocarbon enrichment is mainly controlled by source rock maturity, physical properties of sandbodies and sealing of the faults. The upper source-reservoir-cap rock combination is controlled by hydrocarbon migration, and the middle and lower combinations are controlled by the development of carrier beds and traps. To deal with the exploration of small complex fault block reservoirs, a set of technologies concerning seismic acquisition, processing and interpretation, have been developed and improved.

Key words fault sealing capability, oil and gas migration, oil and gas pool, exploration technology, small complex fault block, half graben, Subei basin

收稿日期: 2006-09-27

第一作者简介: 毛凤鸣 (1955-), 男, 教授级高级工程师, 油气勘探, 地质综合研究

表 1 苏北盆地地层年龄及地质事件

Table 1 Stratigraphic scale and geological event of Subei basin

地 层							主要构造 运动	主要地质 事件					
界	系	统	组	段	代号	年龄 /Ma							
新 生 界	第四系	全新 - 更新统	东台组		Q	2.6	东台运动	东台事件					
		新近系		上新统	二	N ₂ y ²⁽³⁾	5.3	盐城运动	盐城事件				
	中新统		二	N ₁ y ²⁽¹⁺²⁾	11.0								
			一	N ₁ y ¹	23.5								
	古近系	渐新统			E ₃	33.7	三垛运动	三垛事件					
				E ₂ ³	37.0								
		始新统	三垛组	二	E ₂ ^{3s2}	41.0			真武事件				
				一	E ₂ ^{3s1}	46.0							
			戴南组	二	E ₂ ^{1d2}	50.0	真武运动	吴堡事件					
				一	E ₂ ^{1d1}	53.0							
		古新统		阜宁组	四	E ₁ ^{2f4}	54.4	吴堡运动	吴堡事件				
					三	E ₁ ^{2f3}	56.6						
					二	E ₁ ^{2f2}	59.0						
					一	E ₁ ^{1f1}	65.0						
中生界	白垩系				上统	泰州组	二			K ₂ ^{t2}	72.0	仪征运动	仪征事件
							一			K ₂ ^{t1}	83.0		
		赤山组		K ₂ ^c		88.0							
		浦口组		K ₂ ^p		96.0							
下统			葛村组		K ₁ ^g		燕山运动	燕山事件					

是油源通道,也是圈闭因素。预计两种断层形成的力学背景不同:顺向断层属同生沉积断层,是在拉张背景下受沉积负荷牵引形成的“盆倾”断层,形成于断陷沉积开始阶段;反向断层发生在结束阶段挤压转拉张的力学背景下,是抬升隆起(斜坡)上的“拱张裂隙”断层。

苏北盆地构造复杂的原因主要是变质基底软弱、燕山期强烈构造挤压^[3]形成的沉积盖层破碎和晚白垩世以后左行剪切—右行剪切交替作用的动力学背景^[4~6]。

苏北盆地前拗陷期发育泰州组、阜宁组两大沉积旋回,经 3 次湖侵,形成泰(州组)二段(K₂^t)、阜(宁组)二段(E₁^{f2})和阜四段(E₁^{f4})3套生油层,以及泰一段(K₂^{t1})、阜一段(E₁^{f1})两套低位域和阜三段高位域(E₁^{f3})砂岩储层^[7];断陷期发育两套砂泥互层、储盖兼备的戴南组(E₂^d)、三垛组(E₂^s)储层;后拗陷期(N₁₋₂^y)发育粗碎屑砂泥韵律层。从泰州组开始到盐城组结束,盆地始

终体现西高东低、西粗东细的总体面貌。

2 成烃—成藏特征

2.1 主要成藏期

据 Easy R_o%热史模拟,全区自晚白垩世以来地温梯度呈“中(K₂t—E₁f, 3.0 × 10⁻² °C/m)—高(E₂d—E₂s, 3.5 × 10⁻² ~ 4.0 × 10⁻² °C/m)—低(N₁₋₂y, 2.5 × 10⁻² °C/m)”演化。由于渐新世的抬升和新近纪的降温,致使今埋深即使大于“古埋深”,亦未能“增温增熟”。从不同凹陷的有机质成熟度指标、成岩演化指标均“与盐城组沉积前埋深关系密切,与今埋深关系混乱”的事实来看,源岩现今成熟度主要在始新世末定型。

阜宁组、泰州组生烃始于始新世,始新世末基本结束。仅海安凹陷渐新世以后继续生油,但只占总生油量的 5.8%。用恢复剥蚀厚度^[8]的埋藏史曲线(图 2)、Easy R_o%模拟的热史及烃共生盐

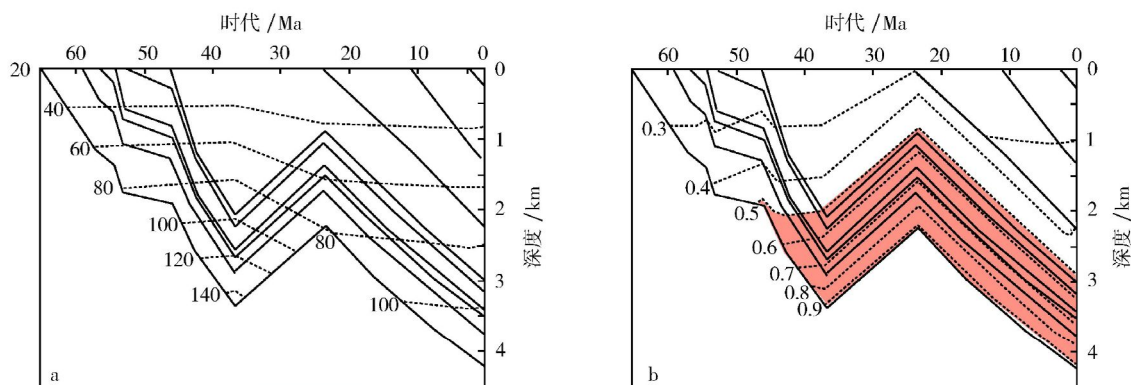


图 2 海安凹陷安 16 井埋藏史与地温史和源岩成熟史的关系

Fig. 2 Graphs showing the relationship between burial history and geothermal and mature history of Well An-16 in Haian sag

a. 地温史 ($T_{\max}$ / °C); b. 源岩成熟史 (R_o %)

水包裹体测温三者结合, 标定高邮、金湖凹陷古近系油藏的油气充注时间在 37~43 Ma 之间 (E_2s^1 晚期— E_2s^2), 不同构造单元、不同成藏组合及低熟油和成熟油均一致。

2.2 排烃与油气运移特点

单向排烃是苏北盆地油气初次运移的重要特征。盆地发育 3 套灰泥质源岩: 泰二段底部 (K_2t^2) 和阜二段 (E_2f^2)、阜四段 (E_2f^4) 上部源岩。泰二段底部受上部“非生油层”泥岩隔层阻挡, 初次运移只能进入下伏的 K_2t^1 砂岩储集; 阜二段受其顶部至阜三段底部差—非生油泥岩隔层阻挡及阜三段“异常压力”抵抗, 初次运移排烃主要进入阜二下段及阜一段砂岩、灰岩储集; 阜四上段受下段非生油泥岩隔层阻挡, 初次运移排烃主要上排至 E_2d^1 砂体, 或直接通过断层向上运移至戴南组、三垛组。由 3 套源岩为核心组成的上、中、下 3 套含油气系统或 3 套成藏组合如图 3 所示。

苏北盆地油气二次运移代表了箕状凹陷油气运移的一般规律。

1) 凹陷或次凹中的深凹是油气发散运移的中心。

2) 平面上具对称性。以高邮凹陷为例, 该凹陷为一北东箕状凹陷, 油气主要面向北斜坡运移, 凹陷两头为次要方向, 向南部断阶带的运移排第三位。斜坡两翼在构造上被分隔的次凹为低熟油自给成藏。

3) 发育两种沉积体系^[9], 存在两种运移方式。一种以上组合为代表, 储层戴南组、三垛组为典型断陷湖盆沉积, 陡坡带发育浊积扇, 缓坡侧发

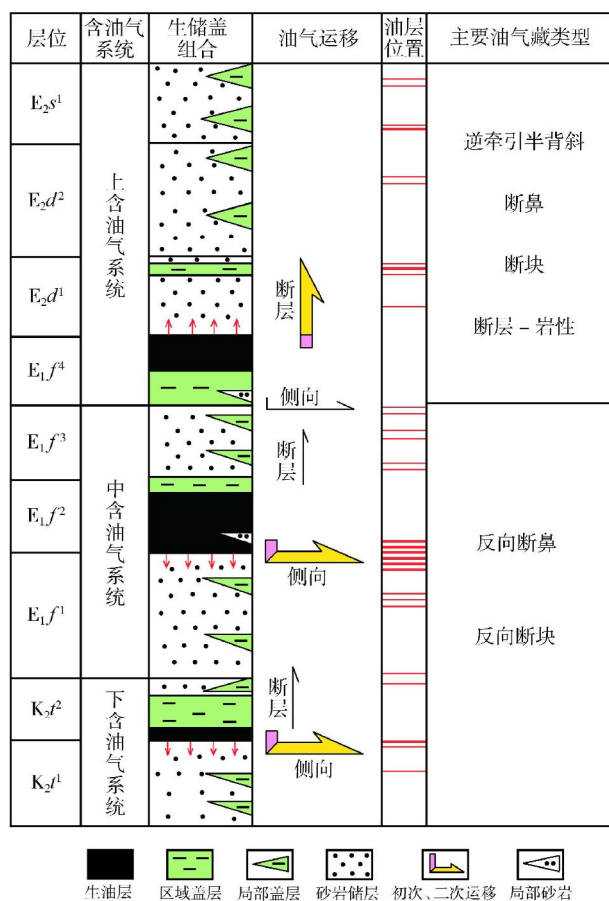


图 3 苏北盆地排烃运移方向^[12]

Fig. 3 Directions of hydrocarbon expulsion and migration in Subei basin

育小型三角洲, 砂体规模小、非均质性强, 砂体之间连通差, 油气主要依靠断层沟通, 以垂向加短距离侧向运移方式为主; 另一种以阜宁组中、下部为代表, 属典型坳陷湖盆沉积, 发育三角洲砂体, 砂体规模大、物性好 (由于埋深不同, 斜坡好而深凹差) 连通也好, 利于油气长距离运移, 加上特定的

箕状凹陷构造背景, 来自深凹的成熟油气往往可以一直运移到凹陷边缘, 侧向运移十分活跃^[10]。图 3 示意了 3 套生油层初次、二次运移的方向和方式。

4) 断层调整作用。在中组合油气的侧向运移过程中, 特别是斜坡部位经常有顺向或反向断层, 如果断距足够大, 将引起油气窜层, 顺向断层向老地层调整, 反向断层向新地层调整。

排烃和侧向运移研究对追踪油气储层有意义。如海安凹陷下组合油气主要储集在泰一段; 金湖凹陷中组合油气主要储集于阜二段下部及阜一段, 经断层垂向沟通或侧向调整进入阜三段及以上地层储集。

2.3 油气分布

2.3.1 油气分布特点

苏北盆地油气分布具三大特点。①断层控制。所有圈闭均离不开断层, 断层有弊、更有利。②小而分散。统计 269 个含油断块的探明储量, 大于 500×10^4 t 的油藏有 6 个, 储量占 18.8%; $300 \times 10^4 \sim 500 \times 10^4$ t 的油藏有 9 个, 储量占

15.6%; $100 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4$ t 的油藏有 44 个, 储量占 32.1%; 小于 100×10^4 t 的油藏有 210 个, 储量占 33.5%, 以小型或微型油藏为主。单个油藏平均储量为 85.5×10^4 t; 单个油藏平均含油面积为 0.75 km^2 , 单个油藏平均储量丰度为 $101 \times 10^4 \text{ t/km}^2$ 。③贫富不均。探明储量分布在高邮、金湖、海安少数凹陷, 三者比例大致为 20:10:1; 其余如盐城、阜宁、洪泽等凹陷储量为零。

油源展布有两个特点。①成熟油 (甾烷异构化参数 ≥ 0.3 相当 $R_o = 0.7\%$) 为主, 成熟油约占总储量的 80%, 低熟油占 20%; ②阜二段、阜四段油源为主, 阜四段为油源的上组合探明储量 0.72×10^8 t, 占总量的 32.9%, 阜二段为油源的中组合探明储量 1.36×10^8 t, 占总量的 62.4%, 泰二段为油源的下组合探明储量 0.10×10^8 t, 占总量的 4.7%。

苏北盆地油气藏^[11]分构造、岩性和构造-岩性复合 3 大类 6 亚类共 15 种 (图 4)。构造油气藏为主, 主要分布在中油气系统; 构造-岩性复合油气藏为次, 主要分布在上油气系统; 纯岩性的较少。油水关系分为统一油水界面的块状砂岩油气藏和多油水系统的层状砂岩油气藏两类。

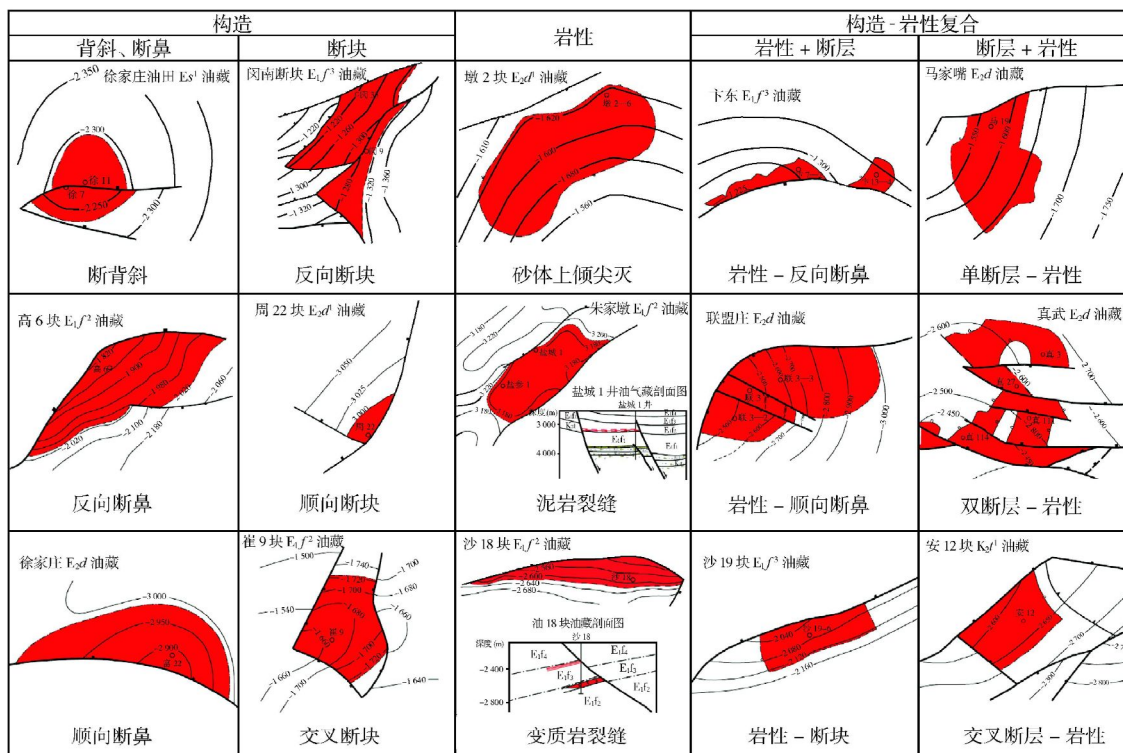


图 4 苏北盆地第三系油藏类型^[2]

Fig. 4 Types of the Tertiary oil pools in Subei basin

2.3.2 油气分布规律

特点一: 阜四段油源油气不离深凹, 阜二段油源油气远离深凹。阜四段油源油气垂向运移成藏, 受储层非均质性控制, 侧向运移弱, 排烃范围即成藏范围, 所以局限于深凹 (图 5)。深凹也是阜二段油源油气的主要烃源灶, 来自深凹的“成熟油气”以长距离运移、异地聚集为主。更有一条重要原因是, 深凹、内斜坡圈闭不发育, 储层物性差,

所以倾向远离深凹在斜坡、隆起上储集。阜二段油源“低熟油”分布在构造上相对独立的浅次凹, 如金湖凹陷的东阳次凹及汜水次凹及高邮凹陷的码头庄次凹, 成熟油运移不能到达, 主要以近源、就地储集为特征, 与上组合相似。

特点二: 上组合油气不离断层, 成纵向“穿糖葫芦”; 中组合油气不离断鼻, 成平面“穿糖葫芦”。上组合属于下生上储式“它源”油气藏, 油源沟通是关键, 特别是要向纵向上复合的数个相对孤立

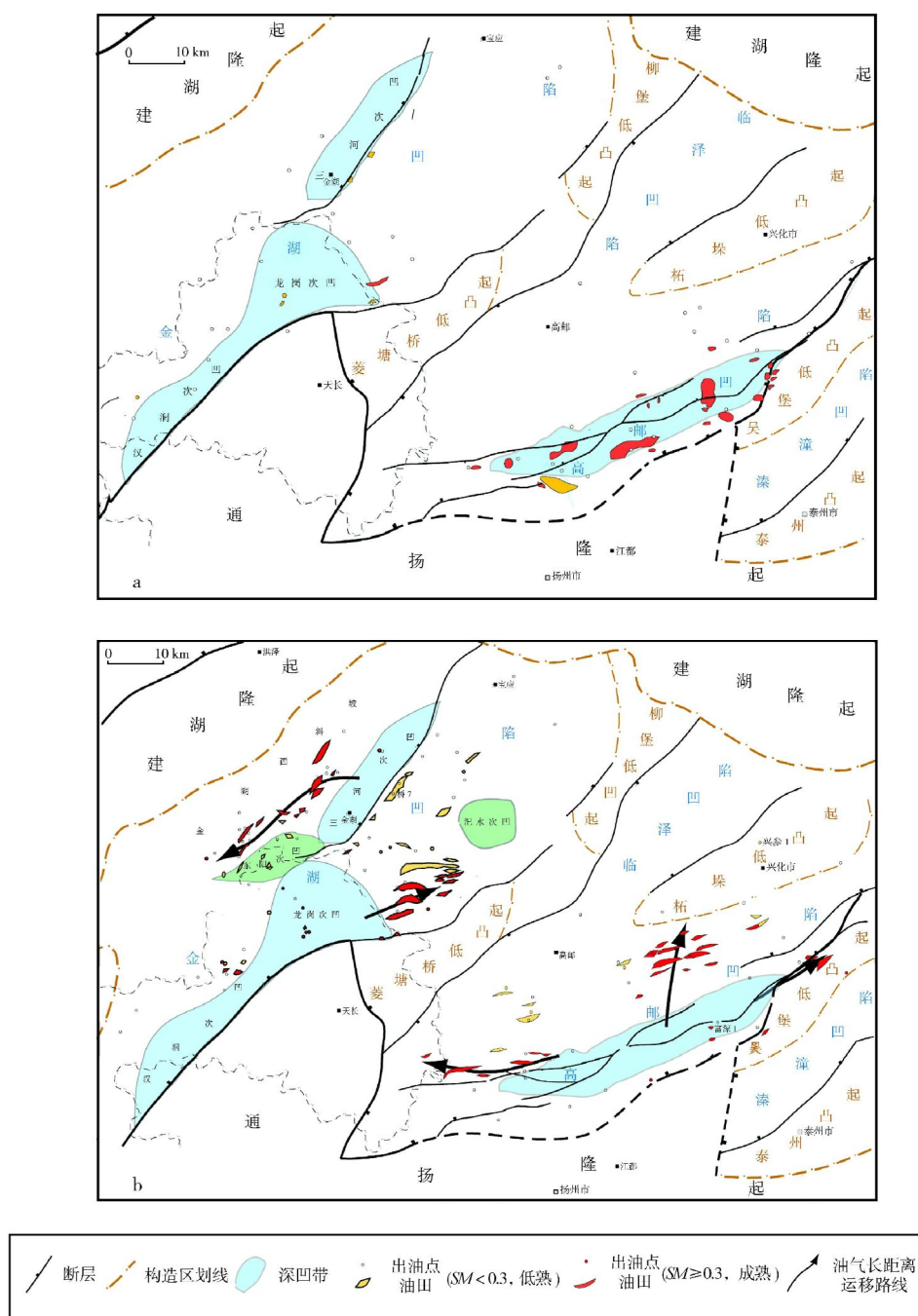


图 5 苏北盆地油源、成熟度展布及运移方向

Fig. 5 Map showing the source rocks distribution of maturity and migration direction in Subei basin

a. 阜四段来源油; b. 阜二段来源油

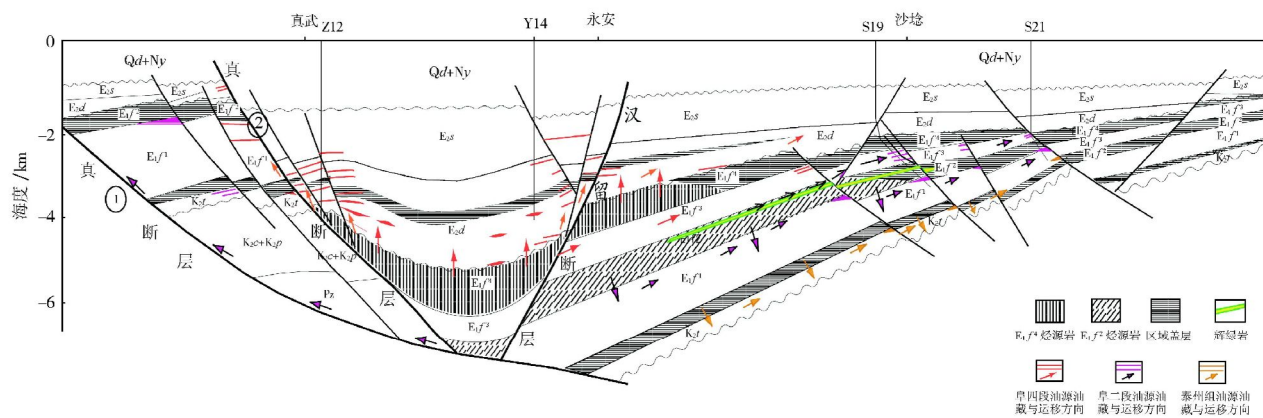


图 6 高邮凹陷成藏模式

Fig. 6 Reservoiring mode in Gaoyou sag

砂体一并供油,唯断层可以实现。在上组合,不论是真武、富民油田为代表的断隆、断鼻构造油气藏,还是高邮凹陷中、西部马家嘴、联盟庄、黄珏为代表的断层-岩性隐蔽油气藏,断层都是一种最普遍的油源通道,油藏或贴断层分布(图 6),或骑断层分布,纵向呈串珠状多层系含油,平面呈叠合裙边状贴断层分布。中组合油气侧向运移活跃(图 6),盖层条件优越,圈闭成为关键。圈闭以断鼻为主,形成于右行剪切力学背景^[5 12],方向性(北西向)强,成带性明显,平面上成“穿糖葫芦”状分布(图 5),有 3 种表现:①环凹分布,受深凹烃源灶控制,距离不近不远最佳,如高邮沙埝、瓦庄及金湖西斜坡;②沿运移路径分布,如高邮韦庄油田、金湖闵桥油田成一个带分布在运移路径上;③沿北西至北北东向构造高带分布,如高邮沙埝断鼻群及金湖西斜坡的刘庄-高集断鼻带、南湖-安乐断鼻带、李庄-墩塘断鼻带等均是成排的油气富集带。

下组合泰一段储集系统兼有以上两种情况,高邮与海安不同。高邮凹陷泰一段自上而下均为块状砂岩,油气成藏相似于中组合,侧向运移为主成藏;海安泰一段分为 3 个砂层组,上部 I 砂组紧邻生油层,但粒度细、岩性非均质性强,易形成岩性油气藏,近源聚集,常伴随“超压”现象,遇顺向断层调节可传递到下部块状砂岩为主的第 II 和 III 砂层组,形成构造油气藏。

2.4 油气富集因素

油气富集普遍的控制因素有以下三点。

1) 生油层展布和源岩成熟度。泰二段烃源岩仅分布在海安凹陷和高邮凹陷中、东部,泰州组

油气发现只限于这一地区。高邮凹陷探明储量是金湖凹陷的两倍,主要是因为高邮凹陷源岩成熟条件好,特别是阜四段成熟度优于金湖凹陷。其他凹陷储量很低,甚至为零,源岩成熟度低是重要原因。

2) 储集体物性。在油源充足的前提下,储集体物性对油气富集有极大的控制作用。从高邮、金湖凹陷的整体情况看,异地储集是主流。上系统油气移居上层,中系统油气移居斜坡,唯浅凹属就地成藏,而“深凹的深层”几乎是空白。原因之一是前者成岩作用弱,孔隙发育;后者埋深大,成岩作用强,孔隙不发育(凹中隆和凹上坡仍值得注意)。苏北已知油藏以 K_2t^1 和 K_2c 砂岩物性好、厚度大,其次是 E_2d 和 E_2s 储层, E_2f 储层相对较薄,其中 E_2f^1 和 E_2f^3 又比 E_2f^2 好。油藏储量与砂岩物性关系较大。

3) 断层封闭性。断层承担了盆地内几乎每一个构造的圈闭作用,断层封闭性无疑是不同地区、不同成藏组合油气富集的必要条件。断层侧向封挡的关键是遮挡盘岩性。经大量数据统计分析,遮挡盘砂层/地层厚度比小于 18% 时油气封堵效率接近 100%,圈闭全充满;遮挡盘砂层/地层厚度比介于 18% ~ 37% 之间时断层封闭性不确定,尚取决于断层规模、活动时间和产状等,构造有效性中等-低;遮挡盘砂层/地层厚度比大于 37% 时不能有效封闭油气。断层的泥岩涂抹系数小于 1.60 时有利于成藏,大于 1.60 时一般不能成藏。断层的“下开上闭”——既是通道、也是圈闭的双重功能正在被认识。杨勇等(2005)用模糊综合评判方法研究高邮凹陷陈堡地区的吴 1、吴 2 断层,

它们具有“下开上闭”的特征。“下开上闭”的主要机理是上部地层对置盘泥岩增多、塑性变好从而造成封闭。断距大小主要影响圈闭规模。在不错开区域盖层的前提下,断距越大、延伸长度越远,其圈闭规模也越大。

不同成藏组合也有其独特要求。对于上组合而言,深凹中的储层、盖层均不缺乏,最缺乏的是油源,是起油源沟通作用的断层(主要是一、二级断层,三级断层中只有极少的断层起通道作用,绝大多数构成圈闭),此外是砂体和断层封闭性。

在高邮凹陷的深凹部位,随着构造油气藏的减少,断层-岩性复合油气藏(上组合)已成为主要勘探目标。目前发现的此类油气藏主要分布在真②断层北侧和汉留断层南侧(即深凹两侧,图6)。造成这种分布的主要原因是,以上两条断层起着“控烃、控砂、通源、控藏(圈闭)”三控一通的作用:①它们作为戴南组沉积时的生长断层,断层活动使沉积空间扩容,戴南组厚度剧增,阜四段源岩成熟度增加,产生充足油源;②作为南、北两个物源方向的“断坡带”,主要在深凹一侧发育了多期“裙边状、条带状”砂体,成为有利的储集空间;③形成如戴南组“五高导泥岩”那样的深水相优质泥岩盖层;④本身既是油源通道,又是圈闭因素。

更深入的研究表明,油气注入位置和数量、断层封闭性、砂体走向、构造线倾向以及它们之间的相互搭配也都是控制圈闭油气充满程度的因素。对于单断层控制的断层-岩性圈闭来说,邻近油气充注点且断层封闭性好的圈闭油气充满度高;远离充注点或位于其下倾方向的圈闭,以及断层封闭性差的圈闭充满度低。当油气注入量一定时,油气保存量主要受封存容积控制。封存容积取决于砂体走向及其与构造倾向的搭配关系。一般平行构造线分布的长轴砂体封存容积大,保存的油多,可追踪距离长;与构造线相交的长轴砂体封存容积小,保存的油少,可追踪距离短(图7)。由双断层控制的断层-岩性圈闭含油情况与单断层相似。当油气注入量充足且两条断层均封闭时,砂体充满程度高;当一条断层的不同部位出现封存条件差异时,有两种情况。当断层在构造高部位封闭,则各个砂体的油充满度总体较高,单个砂体向下倾方向降低;当断层封闭主要在低部位、高部位相反不封闭时,砂体成藏几率较小。

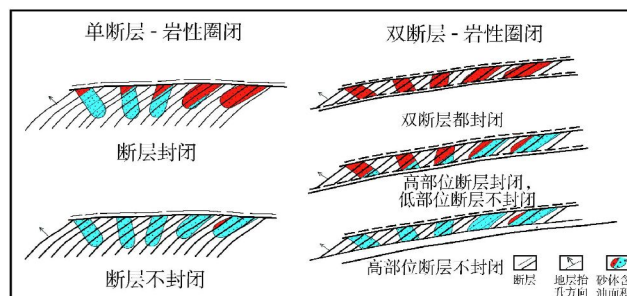


图 7 断层-岩性复合圈闭成藏模式

Fig. 7 Reservoiring mode of fault-lithologic traps

对于中、下组合而言,烃源、盖层普遍存在,砂体广布、运移活跃,凡是深凹油气能够到达的地方,封挡有效的圈闭落空较少。圈闭是侧向运移成藏的必然需求。圈闭发育和断层封闭性是中、下组合成藏的主控因素。排烃疏导和储层是盆地东部突出的矛盾。海安、盐城凹陷阜宁组砂岩极不发育,阜二段生油层能生不能排,或者排出的油不能进入储集层有效聚集,致使成藏几率降低,非常规油藏是今后考虑的方向。

与其他盆地相比,苏北盆地油气成藏存在如下有利因素。

1) 坳陷沉积,优质生油岩均衡发育,差异在于成熟度。优质生油岩以“腐泥干酪根”和“成熟”为主要标志。苏北盆地含 3 套腐泥生油岩,由于沉积在坳陷盆地环境,横向稳定,差别在于成熟度。其中,高邮、金湖凹陷成熟状况最佳。

2) 砂体发育,形成排烃、储集有利配置。“排烃”是源岩潜力发挥的关键,生油层、成熟、无障碍排烃三者缺一不可,失去疏导层也意味着缺乏储集层。高邮、金湖凹陷等发育三垛组、戴南组、阜三段、阜二段、阜一段、泰一段等三角洲、冲积扇砂体,分布着 6 套油气运移疏导系统,形成排烃、储集的优良配置。

3) 后期翘倾,激发油气二次运移。后期抬升固然对油气成熟产生不利影响,甚至破坏了一部分储盖组合,但是后期抬升所造成的地层翘倾同时也增大了油气运移势差,成为激发油气二次运移的动力。活跃的二次运移将打破源岩排烃范围的限制,使斜坡、隆起部位主要依靠异地供烃的圈闭受益,提高了圈闭利用率或聚集效率。

4) 三垛期大量排烃,圈闭先期形成。三垛期是本区源岩大量生排烃时期,而本区主要的圈闭

类型——断鼻和断裂均产生于右行剪切应力场, 即从阜宁组沉积末至戴南组、三垛组沉积时, 圈闭形成早于大量生排烃时期。

5) 断鼻构造发育、区域盖层加断层封挡形成优质圈闭。圈闭是实现聚集的核心。从应力角度分析, 断层和断鼻具伴生关系^[5]。断裂越发育, 断鼻也越发育。断鼻构造、断层侧向封挡, 加上本区在泰二段、阜二段、阜四段、戴南组(五高导泥岩)、三垛组都分有布泥岩盖层, 三者共同构成本区优质圈闭。合理的断距也很重要。一般要求断层断距小于区域盖层厚度, 在第一排圈闭充满后, 油气从下方溢出继续向前运移, 充注第二、第三排圈闭。当断距大于区域盖层厚度时, 油气窜入新层作侧向运移, 仍有可能在后排圈闭聚集。但对于外斜坡而言, 一旦出现断距大于区域盖层厚度, 将导致油气逸散。

3 复杂小断块地震识别技术^[13]

随着勘探难度增大, 勘探新技术所起的作用越来越明显。三维地震技术的采用、完善及地震处理、解释技术的提高, 给勘探工作带来了“质”的飞跃。以沙埕、瓦庄地区为例, 1992年以前利用二维地震资料相继钻探了 25 口探井, 仅有 1 口井在戴南组获得工业油流。1993 年开始三维地震勘探, 初步打开了勘探局面, 先后部署探井 14 口, 成功 4 口, 探井成功率 29%; 但由于火成岩干扰, 地震资料成像质量差, 勘探效果总体欠佳。1998 年后, 在深入研究火成岩的基础上开展地震采集处理解释一体化攻关, “九五”期间发现阜宁组主力含油层系, 新增探明储量 $1\ 102 \times 10^4$ t; “十五”期间, 沙-瓦地区总计钻探井 28 口, 新发现含油圈闭 23 个, 钻探成功率达到 82%, 新增石油探明储量 $1\ 478 \times 10^4$ t。

3.1 地震采集

针对江苏地区复杂水网、复杂小断块两大特点, 完善形成了一套地震勘探技术系列, 主要包括基于地质模型的采集方法设计与论证技术、宽方位及全三维地震采集技术、浅水及水陆过渡带地震勘探技术、高精度及高分辨率地震采集技术、地震采集现场设计及现场质量监控技术和 GPS 及卫星遥感技术共 6 项技术。

3.1.1 基于地质模型的地震采集方法设计与论证技术

针对苏北盆地构造复杂、断层发育、断块破碎、地表河网纵横、人口和城镇密集等特点, 先后引进了美国 I/O 公司的绿山软件及 KLSies 4.0 地震采集方法设计论证软件。从二维转向三维地质模型设计, 从共中心点 (CMP) 叠加技术转向共反射点 (CRP) 技术, 突出纵横向有效覆盖次数, 强化设计方法验证, 寻求最佳地震采集方法。以金湖凹陷石庄三维为例, 通过优化采集方法的设计取得明显效果。老资料显示断阶带内地层破碎、构造复杂、断面及断点不清楚; 优化采集剖面显示石港断裂带上升盘、下降盘处各反射层同相轴连续、特征明显、信噪比较高, 断阶带内部特征明显、构造较清晰、断面和断点位置可分辨。

3.1.2 宽方位及全三维地震采集技术

由于普通三维采集中存在的空间采样不均匀性, 限制了三维处理质量 (主要是速度分析、叠加、DMO 以及偏移) 的进一步提高, 使得更复杂的构造和更隐蔽的油气藏难以发现。“十五”期间, 对三维采集方法进行研究, 发现宽方位采集能显著改善空间采样均匀化的要求, 有利于三维处理质量的提高; 同时, 面向勘探地质目标的三维采集参数设计更有利于勘探目标的实现, 将为勘探提供坚实可靠的数据基础。通过对三维观测系统各参数的研究, 宽方位以及全三维采集在江苏油田的沙埕北进行了初次试验。全三维采集的初叠加剖面, 其波组特征明显, 相位连续性好, 断层成像效果好、断点清楚、断面波反射清晰。在 1.5~2.5 s 之间, 资料所含的信息特别丰富。与同区的老三维资料相比, 信噪比有了很大的提高, 尤其是中、深层的资料, 为以后的处理研究和精细解释打下了良好的基础。

3.1.3 浅水及水陆过渡带地震勘探技术

苏北地区是典型的平原水乡, 水网稠密、湖荡星罗, 主要存在激发、接收、观测系统、自然环境等方面诸多的难点。“十五”期间针对这些问题开展攻关研究, 引进了 BOX 无线遥测地震仪和 408UL 浅水有线遥测地震仪及适合于水网地区作业的组合气枪震源系统等, 进行了水下检波器的针对性

改造试验,成功研制了适应浅水及水陆过渡带接收的锥型检波器。水上勘探施工作业船、钻井平台等等,先后在白马湖、高邮湖和邵伯湖等湖区及过渡带进行地震勘探,取得了良好的勘探效果。

GPS及卫星遥感技术在地震勘探中的应用,使得测量不受地形的限制,能开展全天候作业,避免了由于起始点精度引起的问题,克服了以往水网区(特别是沼泽、养殖区等)踏勘不清造成的先天设计缺陷,使野外生产时能轻易判别测线即将穿越的地面环境,从而提前制定避开或预防危险源的对策措施。科学调整作业方法,达到尽可能成本最小、安全最佳,减少安全生产控制的盲目性与临时性,从而有效地降低和减小了安全风险。

3.2 地震资料处理

针对江苏地区多次波发育、火成岩侵入、小断块以及地表水网发育等难题,完善建立了地震资料处理的 9 项技术系列:全三维处理技术、低信噪比地震资料处理技术、水陆过渡带一致性处理技术、火成岩、多次波处理技术、复杂地表区大连片处理技术、高分辨率处理技术、复杂小断块成像处理技术、叠前深度偏移处理技术,及叠前地震反演技术。

3.2.1 全三维处理技术

与常规三维处理相比,全三维处理技术主要针对宽方位角采集信息丰富的特点,致力于三维地表一致性处理、三维剩余静校正、三维速度分析及动校正、三维 DMO、三维道内插、三维叠前叠后去噪、三维叠后一步法时间偏移等处理技术的应用研究,更着重于从全三维的角度来关注地震资料处理效果在信噪比、连续性、波组特征、断面的成像与连续性、断面与目的层反射同相轴接触关系等诸多方面都能有大幅度提高,从而使得有效勘探深度从浅到深,获取的地下反射信息量明显增加,特别是应用叠前深度偏移处理技术,更有效地解决了因速度横向变化造成的常规时间偏移归位不够精确的问题。宽方位采集有利于中、深层成像,有利于复杂断块内有效反射及断面的成像,适用于复杂区的采集观测。“十五”期间,江苏油田的采集方法几乎都是采用了较宽方位角的观测系统,并在地震资料处理中采用全三维处理技术,都取得了很好的处理效果。

3.2.2 低信噪比地震资料处理技术

针对江苏地表及地下的地质特点,根据低信噪比区的资料特点及存在的问题,对噪音类型及产生原因进行详细分析后,选择相应的去噪方法采用多种组合方法进行测试,并采用循序渐进的方法开展去噪处理。低信噪比地震资料处理技术主要包括多域联合去噪、精细速度分析与静校正迭代处理、迭后去噪等。上述方法是根据能量的强弱、分布特征以及每种方法应用的前提条件来安排的。实践表明,该项处理技术系列具有较好地适应性,能较好地解决低信噪比资料的成像问题。

3.2.3 水陆过渡带一致性处理技术

水陆过渡带地震资料成像差的原因主要是观测系统多变、震源类型不一、激发岩性不均匀等因素,致使地震资料的信噪比很低。采用地表一致性处理技术主要就是解决各区块资料间存在的频率、相位、极性、能量等方面的差异。它包括地表一致性振幅补偿处理、地表一致性频率补偿处理、地表一致性反褶积处理、地表一致性剩余静校正处理、整形滤波处理、分频地表一致性剩余静校正等技术。通过这些技术的联合应用,有效地消除了由于地表激发、接收条件的不均匀性和地层对地震波能量的吸收衰减对地震数据振幅特别是深层振幅产生的不良影响,拓宽了有效地震信号的频宽和主频,提高了地震资料的分辨率及信噪比。

3.2.4 复杂小断块成像处理技术

由于勘探成熟度的不断提高,面临的勘探目标也越来越复杂,构造圈闭的落实与否成为制约勘探成功率和新发现的“瓶颈”。针对地震资料处理过程中存在的问题,建立了一套适合于本地区的复杂小断块地震资料处理流程,从而使地震资料处理的质量不断获得改善,进而发现和落实新的圈闭,深化了老区勘探。该技术主要包括叠前去噪处理技术、地表一致性处理技术、提高叠加成像精度处理技术和偏移归位处理技术等 4 个方面。如石庄三维处理见到明显效果,清晰地显示出石港断裂特征的展布(图 8),推进了该区的勘探进程。

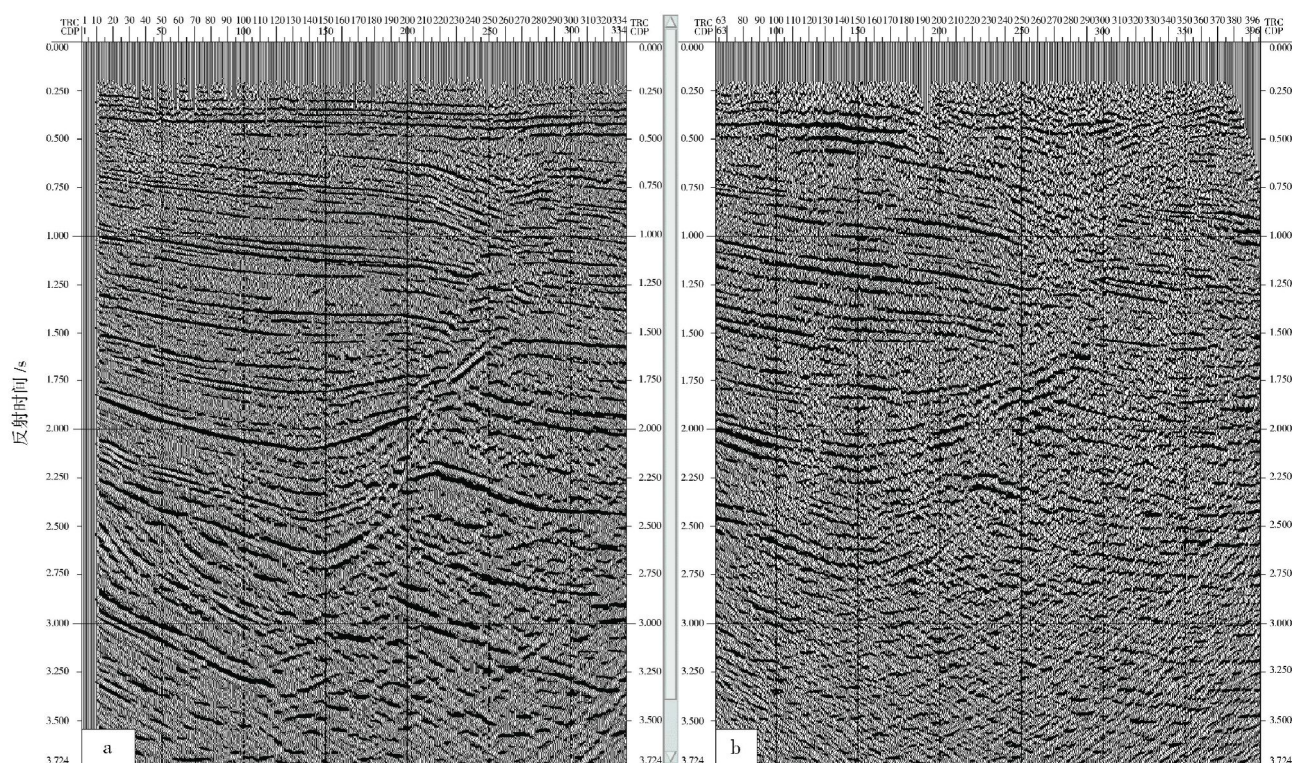


图 8 金湖凹陷石港断裂带三维地震新 a)老 b)剖面对比

Fig. 8 Comparison of new (left) and old (right) 3D seismic sections in Shigang fault zone

3.2.5 复杂地表区大连片处理技术

苏北地区地下地质条件复杂,不同的年度、不同的采集方法、不同的仪器、不同的采样间隔等多种因素差异的资料混合在一起处理,难度很大。具体表现为:早期的采集资料变化多,炮检点存在较多的误差,面波、多次波、线性干扰以及火成岩穿插干扰,各区信噪比面上不均匀,同一目的层在拼接处相位不一致,及不同的三维覆盖次数不均匀等。这些对资料的总体品质影响较大。为此,开展针对性试验,形成有效处理技术对策,采用了地表一致性处理技术、网格归一化及面元均化处理技术、区域地质模型处理技术等,提高了联片处理质量,资料逐步得到改善,经解释研究发现并落实了一批有利圈闭。

3.3 地震解释

3.3.1 三维解释技术系列

完善的三维解释技术系列体现了对地震属性的全面利用,改变了以往广泛使用的对三维资料仅进行二维垂直剖面解释的习惯方式,从一个全新的角度对地质体从点、线、面结合的三度空间进行立体可视化解释,并对地震资料所包含的各类

属性进行提取和解释,以对地质体做全面研究。同时,对空间速度场进行分析研究,实现了变速成图,形成了一套针对复杂断块群勘探的解释流程。三维解释技术系列包括以下 8 项核心技术:三维地震数据体动画浏览、相干体不连续性检测技术、面块切片解释技术、层位自动拾取技术、三维可视化解释技术、地震属性提取技术、变速成图技术和基于构造模式的断层解释技术(图 9)。

3.3.2 储层预测和油气检测技术系列

地震波有关几何形态、运动学、动力学、统计学的特征在“十五”期间得到广泛的运用,储层预测和油气检测技术得以迅速发展,成为油藏地球物理的核心和连接勘探地震和开发地震的桥梁。储层预测和油气检测技术系列主要包括:地震属性分析技术、聚类分析技术、谱分解技术、叠后地震反演技术、联合纵横波阻抗属性识别含油砂体及利用纵波资料进行裂缝检测等技术。

3.4 精细地质解释

3.4.1 小断层识别

苏北盆地四级断层一般延伸短、断距小,在地震资料上难以识别。而这些小断层往往是形成圈

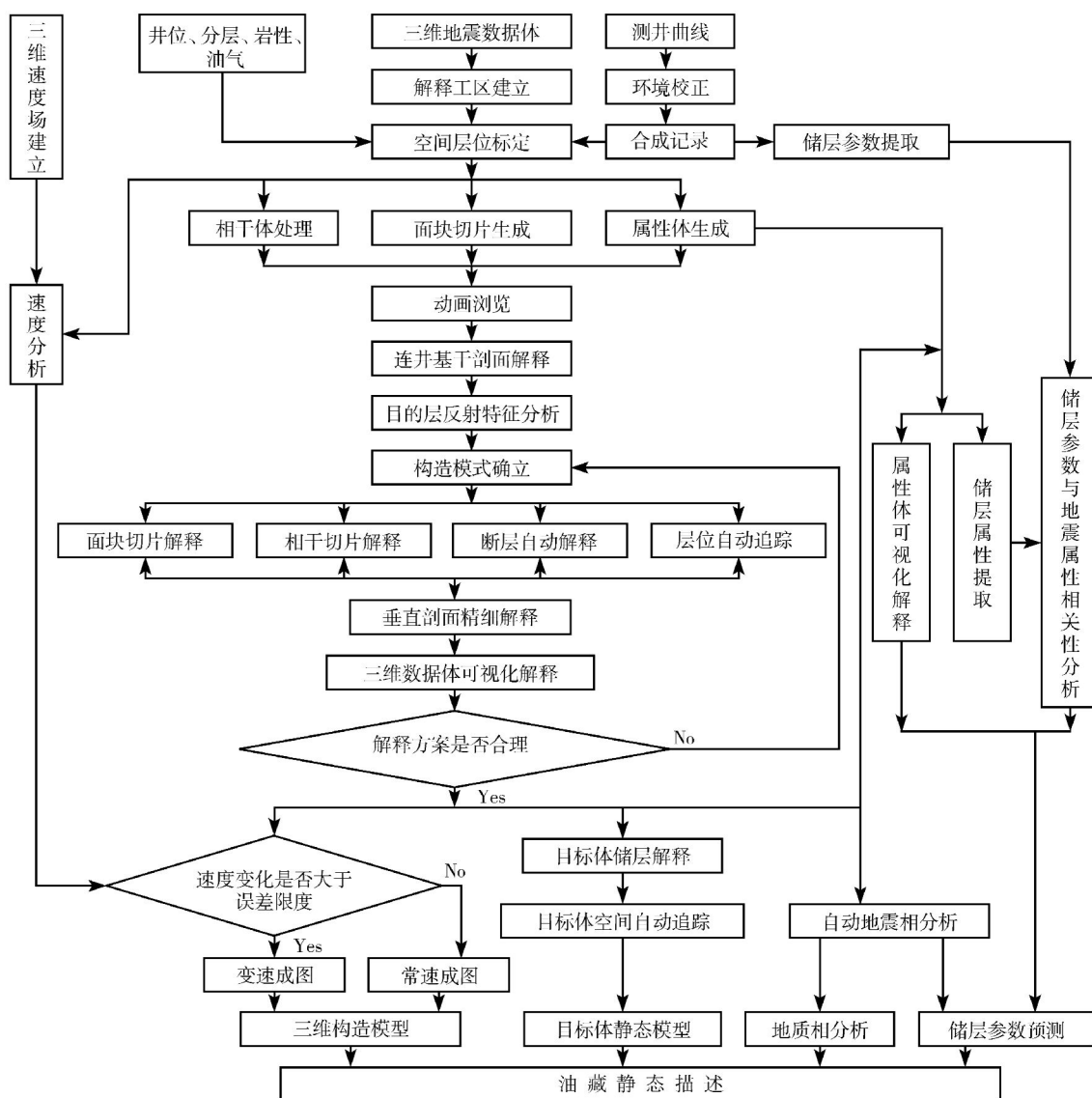


图 9 复杂小断块三维地震解释流程

Fig. 9 3-D seismic interpretation flow chart of small complex fault block

闭的关键。所以,正确识别、描述小断层是本区地震资料解释的重要环节。

通过不断摸索,总结出一套行之有效的方法:利用常规参数相干数据体卡准主断裂系统;然后采用调节相干计算方向的方法,测试出适合于识别小断层的计算参数,使小断层在这些特殊的相干数据体上逐渐显现;确定断层位置后,在地震数据体内通过研究地震反射的细微变化以验证它们的可靠性,同时还通过研究各种方位角的随机测线上断面产状的变化确定小断层走向。

高邮北斜坡的大多数地区阜三段存在火成岩干扰和屏蔽,地震反射资料质量差,断层难以识别。通过这一技术的应用,识别出一系列发育在东西向主断层间延伸短、断距小的北东向断层,从

而发现和落实了一批断块圈闭,扩大了该区的勘探潜力。汉涧西坡也是由于解释识别出一系列北东向小断层,落实了圈闭,实现了勘探突破。

3.4.2 地质模式指导解释

复杂断裂带构造破碎,圈闭落实难度大。近年来,在深化构造解析和综合利用各种钻井、地震信息和解释技术的基础上,重视地质模式指导下的地震解释,创新思路,勘探取得较大突破。

例如在金湖凹陷石港断裂带的地震解释中,运用“走滑断裂地质模式”指导断层组合解释,明确上、下构造层构造样式和断层产状差异,通过精细解释,使断裂带的纵向“负花状”结构和平面上早期“主-羽断层”组合、晚期“左阶雁列断层”组

合的断裂特征和构造面貌更加清晰。通过优选目标钻探取得成功, 使该断裂带的勘探增添了新活力。

3.4.3 断层组合

苏北盆地存在掉向不同的多期次断层。以高邮凹陷为例, 吴堡期(阜宁组)主要发育反向(北掉)断层, 后期活动微弱; 三垛期和戴南期在斜坡中部发育顺(南掉)、反向两种断层。对比发现, 同为反向断层, 三垛期与吴堡期断层在平面上交叉, 不是同一条断层; 同时, 三垛组和戴南组南掉断层往往切割吴堡期断层, 造成原断层错位, 不同期次断层的关系错综复杂。

通过不断实践总结, 针对斜坡和复杂构造带断裂系统的深浅差异和不同切割关系, 建立了“深断切式”、“浅断交式”等不同期次断层组合模式, 理顺了关系, 落实了一批有利圈闭, 从而加快和扩大了斜坡和复杂断裂带的勘探进程和成果。

3.4.4 薄砂层解释

上油气系统单砂体厚度多数为 1~5 m, 在地震剖面上难以识别和追踪。通过多年的探索和实践, 逐渐找到了适合本地区薄砂体解释的配套技术。由于难度较大, 此项技术尚待完善。

该技术充分利用所有钻井资料, 通过细致的小层对比, 识别出同一体系域的各个砂体, 根据地质规律编制出各砂体的厚度及沉积微相图, 从而推断出物源的来龙去脉, 作为判断下步预测准确性的参照标准。在沉积相研究和地质构图基础上, 首先在经过高分辨处理的地震数据体上进行准确层位标定, 搭建地震剖面与测井资料之间的桥梁, 准确地在地震剖面上进行层序界面的空间追踪与闭合, 精细解释各主要目的层构造图; 其次结合测井曲线均衡处理及曲线重构等特殊手段, 综合运用 Jason 反演、地震属性提取、地震相分析、相干体切片等方法, 识别有利砂体及其空间展布, 并使这些方法相互渗透、相互验证、综合判断, 以取得满意效果; 再利用 LPM 软件技术对储层厚度进行预测, 实现储层定量, 结合构造精细解释成果, 落实隐蔽圈闭。在这套思路的指导下, 马家嘴地区共发现隐蔽圈闭 25 个, 累计面积 23.8 km², 预测圈闭资源量 1 916 × 10⁴ t; 联盟庄地区共发现 13 个隐蔽圈闭, 圈闭面积 16.1 km², 预测圈闭资源

量 905 × 10⁴ t。

4 存在问题与勘探方向

苏北第三系勘探成效显著, 但后期难度越来越大。三维地震在主力凹陷已基本满覆盖。从技术上讲, 地震勘探虽然闯出了一条成功的路子, 但是未来勘探中对复杂构造带和薄砂层解释等仍然需要继续攻关研究。而关于油气成藏的认识只要勘探未结束, 认识就不会中止。

今后, 苏北第三系勘探的主攻方向如下。

1) 主力凹陷高邮、金湖的挖潜, 非主力凹陷海安、盐城的突破。

2) 根据最新一轮的资源评价认为潜力较大、勘探程度相对低的领域: 龙岗次凹上组合, 汉涧斜坡带中、上组合, 高邮凹陷北斜坡中、上组合, 瓦庄-吴岔河地区及海安凹陷下组合等。

3) 三新领域, 也是相对偏难的勘探领域: 上、下组合的隐蔽油气藏, 上组合隐蔽油气藏以高邮凹陷深凹、内斜坡为重点, 下组合隐蔽油气藏以海安泰一段 I 砂组为重点; 中组合的深层“低渗透”油气藏, 如高邮、金湖凹陷深凹、内斜坡地带; 凹陷边缘地区, 以高邮、金湖凹陷中组合为重点; 复杂断裂带, 如石港断裂带、真武-吴堡断阶带和杨村断裂带等。

参 考 文 献

- 1 杨大荣. 苏北盆地复杂断块油气藏的形成和富集规律 [J]. 小型油气藏, 1997, 2(2): 11~15
Yang Darong The formation and accumulation laws of complex faulted reservoir in Subei basin [J]. Small Hydrocarbon Reservoirs, 1997, 2(2): 11~15
- 2 刘玉瑞, 刘启东, 杨小兰. 苏北盆地走滑断层特征与油气聚集关系 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 279~293
Liu Yurui, Liu Qidong, Yang Xiaolan. Relation between features of strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in Subei basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 279~293
- 3 马力, 钱基, 穆曰孔, 等. 苏北-南黄海盆地的构造演化和烃类生成 [J]. 南京大学学报(地球科学), 1993, 5(2): 148~163
Ma Li, Qian Ji, Mu Yuekong, et al. Tectonic evolution and generating hydrocarbons of Subei-South Yellow Sea basin [J]. Journal of Nanjing University (Earth Science Edition), 1993, 5(2): 148~163
- 4 陈安定. 苏北箕状断陷形成的动力学机制 [J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 408~418
Chen Anding. Dynamic mechanism of formation of dustpan subsi-

- ence Northern Jiangsu [J]. Geological Journal of China Universities 2001, 7(4): 408–418
- 5 陈安定. 苏北第三系盆地、断裂、圈闭形成的力学机制 [J]. 小型油气藏, 2003, 8(1): 1–5
Chen Anding Mechanism of the basin, fracture and trap formation of Tertiary in Subei basin [J]. Small Hydrocarbon Reservoirs 2003, 8(1): 1–5
- 6 陈安定. 苏北盆地第三系烃源岩排烃范围及油气运移边界 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 630–636
Chen Anding Range of hydrocarbon expulsion from the Tertiary source rocks and hydrocarbon migration boundary in Subei basin [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 630–636
- 7 张喜林, 朱筱敏, 钟大康, 等. 苏北盆地高邮凹陷第三系—上白垩统层序地层格架特征 [J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 393–399
Zhang Xilin, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang et al The character of sequence framework of Tertiary and Upper Cretaceous in Gaoyou sag Subei basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica 2004, 22(3): 393–399
- 8 陈安定. 苏北第三系成熟演化指标与深度关系的 3 种模式 [J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 58–63
Chen Anding Three models of relationship between the maturity indexes and the depth in the northern Jiangsu Tertiary basin [J]. Petroleum Geology & Experiment 2003, 25(1): 58–63
- 9 张金亮, 刘宝琚, 毛凤鸣, 等. 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组成岩作用及储层特征 [J]. 石油学报, 2003, 24(2): 43–49
Zhang Jinliang Liu Baoju Mao Fengning et al Clastic diagenesis and reservoir characteristics of Funing formation, north slope of Gaoyou depression, Subei basin [J]. Acta Petrolei Sinica 2003, 24(2): 43–49
- 10 刘世丽, 陈平. 金湖凹陷西斜坡油气运移特征及成藏模式 [J]. 小型油气藏, 2001, 6(1): 13–15
Liu Shili, Cheng Ping Oil and gas migration characteristics and reservoir formation mode in west slope of Jinghu sag [J]. Small Hydrocarbon Reservoir 2001, 6(1): 13–15
- 11 邱旭明. 苏北盆地断块圈闭分类及油气成藏特征 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 371–374
Qiu Xuming Classification of fault-block traps and characteristics of petroleum reservoiring in Subei basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 371–374
- 12 邱旭明. 扭动作用在苏北盆地构造体系中的表现及其意义 [J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(2): 5–7
Qiu Xuming Representation of torsional action in tectonic system of Subei basin and its significance [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute 2002, 24(2): 5–7
- 13 毛凤鸣, 戴靖. 复杂小断块石油勘探开发技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2005, 194–380
Mao Fengning Dai Jing Oil exploration techniques of complex small fault block [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005, 194–380

(编辑 李 军)

(上接第 819 页)

- 10 Gersztenkom Adam, Marfaut K J Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping [J]. Geophysics 1999, 64(5): 1468–1479
- 11 秦伟军, 林社卿, 程哲, 等. 南襄盆地泌阳凹陷油气成藏作用及成藏模式 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 136–141
Qin Weijun, Lin Sheqing, Cheng Zhe et al Hydrocarbon accumulation and reservoiring pattern in Biyang depression, Nanxiang basin [J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 136–141
- 12 于翠玲, 曾溅辉. 断层幕式活动期和间歇期流体运移与油气成藏特征 [J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 129–133
Yu Cuiling, Zeng Jianhui Features of fluid migration and hydrocarbon accumulation in the active and intermittent stages of fault episodic activities [J]. Petroleum Geology & Experiment 2005, 27(2): 129–133
- 13 钱基. 关于中国油气资源潜力的几个问题 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4): 13–19
Qian Ji Some issues on China's petroleum resource potential [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 13–19
- 14 周庆凡. 关于油气资源探明程度的探讨 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 9–13
Zhou Qingfan Discussion on discovery degree of petroleum resources [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 9–13

(编辑 武新民)

(上接第 826 页)

- 12 程日辉, 王璞琚, 刘万洙, 等. 徐家围子断陷带对火山岩体和沉积相带的控制 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 126–130
Cheng Rihui, Wang Pujun, Liu Wanzhu et al Volcanic massif and sedimentary facies belts controlled by Xujiaweizi fault terrace belt in Songliao basin [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 126–130
- 13 任延广, 朱德丰, 万传彪. 松辽盆地徐家围子断陷天然气聚集规律与下步勘探方向 [J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(5): 26–29
Ren Yanguang, Zhu Defeng, Wan Chuanbiao Natural gas accumulation rule of Xujiaweizi depression in Songliao basin and future exploration target [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing 2004, 23(5): 26–29

(编辑 李 军)