张琳琳,何京,王伟,等. 基于构造演化分析的古近系储层预测: 以辽西凸起中段沙河街组为例[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(2): 62-68. ZHANG Linlin, HE Jing, WANG Wei, et al. Prediction of Paleogene reservoirs based on structural evolution analysis: taking Shahejie Formation in the middle part of Liaoxi Uplift as example[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(2): 62-68.

基于构造演化分析的古近系储层预测: 以辽西凸起中段沙河街组为例

张琳琳,何京,王伟,康琳,张江涛,张金辉 (中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459)

摘 要: 辽西凸起中段古近系沙河街组缺乏规模性圈闭,储层横向变化快、预测难度大,滚动勘探一直难有较大突破。针对构造、储层问题,采用基于构造演化分析的古近系储层预测方法,综合运用裂变径迹构造反演和空间平衡剖面技术,开展构造演化精细分析,改变传统地层沉积模式,提出辽西凸起高部位发育沙河街组地层的新认识,指导构造解释调整,新增沙河街组勘探层系和有利目标;结合构造约束下的叠前同步反演技术,准确预测沙河街组优势储层发育区,有效指导井位部署和钻探。近年的勘探实践证实了方法的有效性,研究区新增2个千万方级含油气构造,有力支撑了渤海油田的增储上产,也为类似区域的古近系储层研究提供了借鉴。 关键词: 古近系;构造演化;裂变径迹反演;空间平衡剖面技术;储层预测 中图分类号: P744.4 文献标识码: A DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.152

0 引言

辽西凸起中段一直是渤海海域辽东湾坳陷油 气勘探的有利目标区,成藏背景优越,已发现过多 个大中型油气田,其含油层系从基底潜山到古近系 东营组均有分布^[1-2]。但近十余年来,一直难有大的 勘探突破,究其原因主要有两个方面:一是古近系 缺乏规模性圈闭,东营组勘探程度高,规模性圈闭 钻探殆尽,而沙河街组地层分布局限,圈闭资源规模 较小;二是古近系地层横向变化快,储层非均质性 强,预测难度大,难以明确优势储层发育区。前人 针对该区的构造演化、沉积储层及成藏等方面做了 大量的分析,如姜培海^[2]、李伟等^[3]对辽西凸起的 形成演化、成藏控制因素进行了分析,江尚昆等^[4] 对潜山油气富集规律进行探讨,郭涛等^[5]、黄馨瑶

作者简介: 张琳琳(1983-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地震综合解释及储层预测方面的研究工作. E-mail: zhangll6@cnooc.com.cn

等^[6]对东营组储层沉积模式及勘探潜力做了分析。 前期研究多集中在辽西凸起整体的断裂结构、构造 演化,对凸起中段的构造演化分析较为笼统,且目 的层系主要针对潜山及东营组地层,对沙河街组地 层的研究相对较少。本文以辽西凸起中段沙河街 组为目的层,通过深刻解剖地震钻井资料,利用磷 灰石裂变径迹构造反演和空间平衡剖面技术,由点 及面,对辽西凸起中段新生代的构造演化过程进行 详细分析,改变传统认为新生代早期辽西凸起呈单 斜特征,高部位缺乏地层沉积的观点,提出辽西凸 起高部位发育沙河街组地层的新认识,指导构造精 细解释,新增沙河街组勘探层系和有利圈闭,从而 打开沙河街组勘探的新局面。在此基础上,运用构 造约束下的叠前同步反演技术准确预测沙河街组 优势储层发育区,有效指导井位部署和钻探。实钻 情况与钻前储层预测基本一致,研究区滚动勘探成 效显著,新增多个含油气构造,有力支撑了渤海油 田的增储上产。

1 区域位置

辽东湾坳陷是渤海湾盆地东北部的一个次级

收稿日期: 2020-09-24

资助项目:中海石油(中国)有限公司"七年行动计划"重大专项课题"渤海油田上产4000万吨新领域勘探关键技术"(CNOOC-KJ 135 ZDXM 36 TJ 08 TJ)

构造单元,受 NE 向展布的郯庐断裂带控制,整体 呈 NE-SW 向延伸。中生代以来历经多期次的构 造运动,使辽东湾坳陷形成了"三凹二凸"的构造格 局。辽西凸起是辽东湾坳陷内的二级构造单元。 西侧为辽西凹陷,东侧为辽中凹陷,呈北东向展布, 自南向北贯穿于整个坳陷内部,连续性较好。根据 基底潜山的岩性、上覆地层的沉积规律和主干断裂 的切割关系,可将辽西凸起进一步划分为南段、中 段和北段,本次研究目标区位于辽西凸起中段(图 1)。



图 研究区域过量 Fig.1 The location of study area

2 构造演化分析

区域构造研究认为辽西凸起中段受NNE向 展布的辽西1号断层控制,西临深大断裂带及深陷 带,断隆联动,在壳幔重力均衡调整作用下,早期叠 坳背景上发育翘倾断块。翘倾远端中生界、新生界 早期地层剥蚀殆尽,直接出露太古界地层^[2,7-8]。因此,传统观点认为沙河街组地层在凸起的高部位缺失,仅在斜坡带低部位沉积,形成一系列规模较小的地层圈闭,勘探潜力有限。本次研究通过磷灰石裂变径迹构造反演和空间平衡剖面技术,对研究区进行构造演化分析,改变传统地层沉积模式,提出辽西凸起高部位发育沙河街组地层的新认识,为沙河街组地层勘探提供了新契机。

2.1 裂变径迹构造反演

磷灰石裂变径迹法重建磷灰石的热演化史,结 合古温差和古地温梯度恢复地层的最大剥蚀量,最 终可建立构造区的构造热演化史^[9-10]。对研究区已 有的磷灰石样本进行优选,最终选取主要构造部位 3 口井目的层段的样品点进行裂变径迹构造反演分 析,模拟过程中,退火模型采用适用渤海海域复杂 热史演化的 Ketcham 模型,其结果如表1所示。可 以看到,辽西凸起中段不同构造位置的构造演化存 在明显差异,平面上具有分段性。但总体而言,研究 区在新生代早、晚经历了2次大的构造抬升,其中 孔店组-沙三段沉积期构造抬升量为 768~1 046 m, 东营组晚期--馆陶期构造抬升量为 794~1 497 m; 而新生代中期,具体为沙三段晚期-东营组晚期,研 究区处于断陷沉降中,存在明显的构造沉降,沉降 量为156~1030m。由此可以确定,辽西凸起中段 在沙三段晚期-东营组沉积之前,存在地层沉积可 容空间,其高部位存在沙河街组地层沉积的可能。 这一认识为沙河街组构造解释提供了有效支撑。

X1 2日口起「校坐」 衣文任近伏支内运出幼女

A构造	孔店组沉积期	1沙四段沉积期	沙三段	沉积期	沙一二段沉积	东三段沉积期	东二段沉积期]东一段沉积期	馆陶组沉积期
年代/Ma	$66{\sim}50.5$	50.5~42	42~	38.0	期38.0~32.0	32.0~30	30~27.4	27.4~23.3	23.3~12
抬升量/m	865.7	181	-1	1.4	-82.8	-37.1	-25.7	31.4	762.8
B构造 年代/Ma	晚白垩世+孔 店组沉积期 75~50.5	沙四段沉积期 50.5~42	沙三段早期 42~40.0	沙三段晚期 40.0~38.0	沙一二段沉 积期 38.0~32.0	东三段沉积期 32.0~30	东二段沉积期 30~27.4]东一段沉积期 27.4~23.3	馆陶组+明化 镇组沉积期 23.3~5.3
抬升量/m	727.7	162.8	25.7	-265.7	-325.7	-100	-188.5	-151.4	1314
C构造	孔店组沉积期	沙四段沉积期	沙三段沉积期	沙二段沉积期]沙一段沉积期	东三段沉积期	东二段沉积期	目东一段沉积期	馆陶组早期
年代/Ma	$66{\sim}50.5$	$50.5 {\sim} 42$	42~38.0	38.0~34.1	34.1~32.0	32.0~30	$30 \sim 27.4$	27.4~23.3	23.3~16.9
抬升量/m	602.8	165.7	-51.4	-77.1	-37.1	-111.4	-77.1	780	717

Table 1 Restoration of tectonic activity history based on fission track in the middle part of Liaoxi uplift

2.2 空间平衡剖面技术

平衡剖面是一种常用的构造演化分析方法, 通过几何学原则,在垂直构造走向的剖面上将变 形构造全部复原成合理的未变形状态。相较常用的层拉平法(残余厚度法),该方法考虑了断层活动、压实作用的影响,可以更加准确的反映构造演化过程^[11-13]。本文应用的空间平衡剖面技术则是

利用 petrel 软件的构造建模和三维收敛插值功能, 将二维的平衡剖面拓展至三维,由线及面,形成空 间立体概念,便于更好的认识研究区的构造演化 过程。

选取研究区主要构造部位的4条基干剖面,进 行断层恢复、去压实校正,制作二维平衡剖面,然后 利用 petrel 软件将同一时期的平衡剖面在空间上进 行联合,即可得到不同时期的构造展布特征。相较 传统方法利用单剖面展示构造演化过程,该方法综 合研究区不同位置的多个构造分析结果,可以同时 反映构造特征纵向、横向的变化,其分析结果更加 丰富全面。从图 2 可以看到: 辽西凸起中段在沙三、 沙四段沉积期,构造初具形态; 沙一、二段-东营组 沉积早期,构造活动剧烈,构造起伏较大;东营组末 期,构造逐渐趋于平缓,与现今构造特征基本一致; 且在东营组沉积之前,研究区整体呈现南高北低的 特征。这与辽西凸起整体的形成演化、断裂活动 时期、地层结构认识一致^[2-3],也验证了该方法的合 理性。



图 2 辽西凸起中段新生代构造演化特征 Fig.2 The Cenozoic tectonic evolution in the middle part of Liaoxi Uplift

综合磷灰石裂变径迹构造反演结果和主要目 的层段构造特征,明确研究区新生代以来的构造演 化过程:在沙三、沙四段沉积时期,辽西凸起中段整 体构造起伏不大,B、C构造相对较高,此时研究区 处于构造抬升期,缺乏地层沉积空间,仅在构造低 部位部分沉积;在沙一、二段沉积时期,受断层活动 的影响,凸起持续隆升,构造起伏较大,此时研究区 大部分位于水面之下,仅凸起局部出露水面,在凸 起两侧接受地层沉积;东营组沉积早期,构造发生 掀斜,地层呈现单斜特征,构造高点由凸起区转移 至辽西1号断层附近,构造格局基本定型,此时研 究区整体位于水面之下,因此大范围接受地层沉积; 东营组沉积晚期,构造相对平缓,与现今构造形态 基本一致。

3 构造精细解释

研究区新生代以来的构造演化分析表明: 在沙 河街组沉积时期, 辽西凸起局部出露水面, 凸起两 侧接受地层沉积; 到东营组沉积早期, 辽西1号断 层活动强度较大, 受断层活动影响, 构造发生掀斜, 构造高点由凸起转移至辽西1号断层附近, 地层呈 现单斜特征, 此时研究区处于沉降期, 整体位于水 面之下, 大范围接受地层沉积。在该模式的指导下, 结合地震剖面特征, 对研究区进行构造精细解释 (图 3), 重新落实沙河街组地层分布特征。调整解 释后, 沙河街地层的缺失范围明显变小, 仅在基底 潜山隆起带上局部缺失, 其他区域沙河街组地层广 泛存在(图 4)。且在辽西1号断层附近新增一系列





Fig.4 Comparison of new and old structural map

断块圈闭,新增圈闭面积超过 35 km²,为后续勘探研究指明了方向。

4 储层预测

辽东湾地区古近系沙河街组地层多为辫状河 三角洲沉积,储层段为砂泥岩互层,单砂体厚度薄, 横向变化快,且中深层地震资料分辨率有限,无法 进行单砂体识别和砂描工作。对于沙河街组的储 层预测,常规做法即在地质模式的指导下,借助地 震相、地震属性等手段对储层的优势发育区进行预 测^[1416]。但该方法只是定性描述,适用于区带储层 研究,难以满足现阶段精细勘探的需要。本次研究 采用构造约束下的叠前同步反演技术,通过岩石物 理特征分析,寻找储层响应敏感参数,在精细构造 模型的约束下进行叠前同步反演,完成储层精细 刻画。

4.1 储层地球物理响应特征

图 5 为已钻井目的层段岩石物理参数的交会 结果,可以看到储层整体表现为低密、低阻抗的特 征,密度对砂泥岩的区分性更好。研究区构造演化 分析表明,沙河街组地层直接覆盖在基底潜山之上, 其上覆地层为东三段大套泥岩,因此储层段顶界面 为波谷响应。受下伏潜山强反射界面的干扰,储层 段整体反射能量较东三段泥岩地层仅略有增强,利 用常规的振幅类属性难以有效识别储层。基于上 述分析,基本确定该区储层响应敏感参数,即利用 密度来区分储层与非储层。

4.2 构造约束下的低频建模

研究区构造演化、地层接触关系复杂,特别是 在辽西1号断层附近区域,沙河街组地层超覆在基 底潜山之上,地层厚度向低部位明显变薄。常规的 低频模型建立方法使用井间插值,受井点平面分布 位置的局限,难以准确反映真实的地层结构(图 6a)。 本文引入构造建模方法[17],基于构造解释方案建立 构造模型,利用精细构造格架约束低频模型建立, 得到较为准确的初始模型(图 6b)。在建模的过程 中,及时对比平、剖特征,判断模型与地质认识是否 一致,通过修正解释方案和插值方式,得到更为准 确、更加符合地质沉积认识的构造模型。对比两种 建模结果(图 6),可以看到常规的建模方法沙河街 组地层区域上连片分布,而在构造约束下的低频模 型上,沙河街组地层向低部位超覆在基底潜山之上, 与地震剖面特征和地质沉积模式一致,更加符合地 下真实情况。

4.3 确定性子波反演

子波是影响地震反演结果的关键参数,常用统 计性子波和确定性子波。统计性子波是通过地震 道自身来估算子波,需对所用的地震资料和地下反 射系数序列分布进行某种假设,子波相位是固定的, 而实际的地震子波往往是混合相位的。确定性子 波则是利用测井资料计算反射系数序列,结合井旁 地震道由褶积理论求得地震子波。其优点是不需 要对反射系数序列分布作任何假设,可以得到较为 准确的子波。从实际资料的应用效果可以看到 (图 7),确定性子波主瓣窄、旁瓣幅度更小,对提高 反演结果的分辨率更为有利。结合已钻井数据,对 地震资料的角道集分别进行确定性子波提取和 时深标定,完成叠前同步反演。从反演结果(图 8) 来看,与井上特征吻合较好,各套砂体均能有效识 别,同时储层的横向展布特征也符合地质沉积模式 认识。



图 5 已钻井纵波阻抗与密度交会结果 Fig.5 Intersection of P-wave impedance and density



(a)常规方法低频模型(b)构造约束下的低频模型图 6 常规方法与构造约束下的低频建模方法对比





5 勘探成效

综合分析地震、钻井资料,利用裂变径迹构造 反演和空间平衡剖面技术,开展构造演化精细分析, 明确研究区新生代以来的构造演化过程,改变传统 认为新生代早期辽西凸起呈单斜特征,高部位缺乏 地层沉积的观点,提出辽西凸起高部位发育沙河街 组地层的新认识。从而指导构造精细解释,新增沙 河街组勘探层系和有利目标,增加圈闭面积超过 35 km²。利用构造约束下的叠前同步反演技术,准 确预测沙河街组优势储层发育区,有效指导井位部 署和钻探。近年的勘探实践证实了上述方法的有 效性,探井实钻结果与钻前研究基本一致(图 9),研 究区新增 2 个千万方级含油气构造,勘探成效显著, 也为类似区域的古近系储层研究提供了借鉴。

6 结论

(1) 辽西凸起中段新生代早、晚经历了 2 次大 的构造抬升,在新生代中期,具体为沙三段沉积晚 期到东营组晚期,存在明显的构造沉降,为沙河街 组地层沉积提供了有效可容空间。

(2) 沙河街组沉积时期, 辽西凸起局部出露水面,



图 8 过 A 井密度反演剖面 Fig.8 The density inversion profile of Well A



Fig.9 The density inversion results are in good agreement with the drilled wells

凸起两侧接受地层沉积;东营组沉积早期,辽西1 号断层剧烈活动,断层上升盘地层发生掀斜,构造 高点由凸起转移至断层附近,地层呈单斜特征,构 造格局基本定型。

(3)利用构造模型约束下的低频建模方法,可以 更加准确反映地层之间的接触关系,有利于提高地 震反演结果的准确性。

(4) 基于构造演化分析结果, 指导研究区解释模 式调整和地震储层预测, 新增沙河街组勘探层系和 有利目标区, 取得了较好的勘探成效, 为类似区域 的勘探研究提供借鉴。

参考文献:

- 赵文智,池英柳. 渤海湾盆地含油气层系区域分布规律与主控 因素[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 10-15.
- [2] 姜培海. 辽西低凸起油气成藏的主要控制因素及勘探潜力[J].

油气地质与采收率, 2001, 8(4): 200-205.

- [3] 李伟, 戚建庆, 周东红, 等. 辽东湾坳陷辽西凸起的形成与演 化[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(5): 911-923.
- [4] 江尚昆,吴昊明,曾金昌,等. 辽西凸起中段潜山油气差异富集
 及主控因素[J]. 特种油气藏, 2016, 23(6): 55-59.
- [5] 郭涛,周心怀,赖维成,等.辽西低凸起中段古近系东营组第二段沉积模式与勘探新发现[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(6):619-624.
- [6] 黄馨瑶,魏鹏. 辽西低凸起中南段古近系东营组层序与沉积体 系演化特征[J]. 科技创新导报, 2016, 26: 67-70.
- [7] 张婧, 吴智平, 李伟, 等. 辽东湾坳陷新生代构造特征及演化[J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(11): 9-17.
- [8] 贾楠,刘池洋,张功成,等. 辽东湾坳陷新生代构造改造作用及 演化[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 377-390.
- [9] 周海, 雷川. 磷灰石裂变径迹(AFT)研究进展[J]. 西北地质, 2013, 46(1): 168-176.
- [10] 张江涛,吴奎,王冰洁,等. 渤海海域辽西凸起北段新生代构 造演化的磷灰石裂变径迹证据[J]. 石油学报, 2018, 39(11): 1262-1271.

67

68	Marine Geology Front	tiers 海	洋地质前沿	2022年2月
[11]	张向鹏,杨晓薇.平衡剖面技术的研究现状及进展[J].煤田地	[14]	王建立,明君,张琳琳,等.渤海油田	日古近系地震储层预测研
	质与勘探, 2007, 35(2): 78-80.		究难点及对策[J].海洋石油,2014,3	34(4): 44-79.
[12]	汤济广,梅廉夫,沈传波,等.平衡剖面技术在盆地构造分析	[15]	赖维成,徐长贵,于水,等.渤海海域	试地质-地球物理储层预测
	中的应用进展及存在的问题[J].油气地质与采收率,2006,		技术及其应用[J]. 中国海上油气, 20	006, 18(4): 217-222.
	13(6): 19-22.	[16]	徐长贵,赖维成.渤海古近系中深	层储层预测技术及其应
[13]	胡望水,柴浩栋,李瑞升,等.平衡剖面技术对东海西湖凹陷		用[J]. 中国海上油气, 2005, 7(4): 23	1-236.
	正反转构造及其成藏控制的研究[J]. 特种油气藏, 2010,	[17]	刘尧均,官大勇,王志萍,等.湖底扇	弱水道相控建模技术及应
	17(1): 15-19.		用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(11):	59-68.

Prediction of Paleogene reservoirs based on structural evolution analysis: taking Shahejie Formation in the middle part of Liaoxi Uplift as example

ZHANG Linlin, HE Jing, WANG Wei, KANG Lin, ZHANG Jiangtao, ZHANG Jinhui (Tianjin Branch of CNOOC (China) Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: Two problems are encountered in the middle part of Liaoxi Uplift, with regard to the reservoir prediction for Shahejie Formation: the lack of large-scale traps and the rapid lateral variation in reservoirs, which have made reservoir prediction difficult and limited the progress of rolling exploration. In order to solve these problems, we turned the way of research to carry out the Paleogene reservoir prediction upon structural evolution. Using the methods of fission track structure inversion and space balance profiling, detailed study of structural evolution was conducted. This approach abandoned the traditional stratigraphic deposition model, and proposed a new way of thinking for the Shahejie Formation. It is assumed that the Shahejie Formation might occur as well in the high part of Liaoxi uplift. Based on the new understanding, new exploration strata and favorable targets in Shahejie Formation are re-selected. Combined with the pre-stack synchronous inversion technology under structural constraints, the development area of the dominant reservoirs in Shahejie Formation mas accurately predicted, and the well position deployment and drilling were effectively performed. The exploration practice in recent years has proved the effectiveness of the new understanding. Two new gas oil-bearing structures of ten million cubic meters of reserves have been discovered in the study area, which strongly supported the increase in oil and gas reserve and production of the Bohai Oilfield, and also provided a reference for the study of Paleogene reservoirs in similar areas.

Key words: Paleogene; tectonic evolution; fission track inversion; space balance profiling technology; reservoir prediction