宋爱学,杨金海,胡斌,等.琼东南盆地深水区古潜山裂缝性储层展布特征及有利区含油气性预测[J].海洋地质前沿,2021,37(7):60-67.

琼东南盆地深水区古潜山裂缝性储层展布特征及 有利区含油气性预测

宋爱学¹,杨金海¹,胡斌¹,刘亿¹,任丽娟¹,曹俊兴²

(1中海石油(中国)有限公司湛江分公司,湛江 524057;2成都理工大学地球物理学院,成都 610059)

摘 要:琼东南盆地深水区松南低凸起花岗岩古潜山是南海西部重点油气勘探领域。受该区 复杂地质条件与地震资料品质影响,其前古近系潜山优质储层预测与含油气性检测研究难度 较大。从已钻井资料出发,结合地质地球物理资料综合分析,精细划分并评价了古潜山储层 纵向有利相带,并应用蚂蚁体融合曲率体技术刻画了古潜山有利储层空间展布,有效提高了 潜山裂缝性储层预测精度;同时,结合基于倒谱变换的地震纹技术,从正演模拟出发,开展了 古潜山有利储层含气性分析,在研究区取得了较好的应用效果,极大地促进和推动了深水油 气勘探进程。

关键词:古潜山储层;裂缝预测;蚂蚁体;属性融合;地震纹;琼东南盆地 中图分类号:P744.4;P539.1 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.034

0 引言

随着油气勘探程度的提高,古潜山成为海上油 气勘探的重点。近年来中海油在渤海盆地、珠江口 盆地、琼东南盆地古潜山领域相继取得油气发现^[1-4], 证实了古潜山油气领域的巨大勘探潜力。古潜山 油气勘探的重点就是要落实古潜山储层空间展布 特征及储集物性和流体性质,但是,由于海上油气 勘探探井少、钻探成本高,可以通过有效的地球物 理技术手段及信息来综合预测古潜山有利储层发 育区、分析其储层空间展布和储集特征,进而开展 含气性检测。该方法对于指导古潜山油气藏评价 与勘探部署等工作至关重要。

目前业界主要应用相干、方差体等叠后地震属 性以及叠前弹性反演等技术开展对潜山裂缝性储 层的预测与流体识别。王景春等^[5]利用曲率体等 属性结合偏移距矢量域(OVT)地震属性,融合古地 貌信息开展花岗岩古潜山裂缝性储层预测,取得了

收稿日期: 2021-02-09

较好的应用效果;程四洪等^[6]采用裂缝敏感参数测 井曲线拟合声波重构技术,结合叠前弹性反演技术 预测古潜山裂缝发育密集段取得了较好的效果;王 亚等^[7]利用分频相干和曲率体属性等技术方法进 行古潜山裂缝-孔洞复合型储层识别预测,利用 AVO 属性及地震频率梯度等组合技术开展裂缝性储层 含油气检测取得较好的效果。本文从已钻井岩电 特征分析入手,在潜山储集相带纵向划分与有利地 震相分析的基础上,综合应用蚂蚁体、曲率体属性 融合技术,精细刻画了裂缝性储层空间展布特征; 结合潜山不同地质模型正演模拟,采用地震纹技术 对裂缝有利发育区进行了含气性检测。

1 区域地质背景

琼东南盆地是南海北部被动大陆边缘新生代 断坳盆地,面积约80000km²,盆地内油气共生,油 气资源勘探潜力巨大。2019年,中海油在琼东南盆 地深水区松南低凸起花岗岩古潜山储层喜获工业 气流,日产天然气超百万立方米,测试产能创中国 海域古潜山气藏新纪录,实现了南海西北部中生界 古潜山油气商业发现"零"的突破。松南低凸起位 于琼东南盆地中央坳陷带中东部,水深约1500~ 2000m,属于南海北部超深水油气勘探领域(图1)。

资助项目:"十三五"国家重大科技专项"琼东南盆地深水区大中型气田 形成条件及勘探关键技术"(2016ZX05026-002)

作者简介: 宋爱学(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋油气地球物 理研究工作. E-mail: songax@cnooc.com.cn





松南低凸起整体呈 NW 向展布,其被周缘多个凹陷 环抱,前古近系基底岩性为中生界三叠系花岗岩。 该古潜山花岗岩储层的主要储集空间为基岩凸起 经长期风化淋滤作用形成的风化壳和由于构造活 动形成的网格状裂缝。

琼东南盆地区域构造演化研究表明^[8-9],松南低 凸起中生界古潜山花岗岩自形成以来,主要经历了 3期构造运动:印支期挤压成山阶段、燕山期走滑 改造阶段、喜山期伸展翘倾抬升阶段。多期构造运 动叠加控制影响了松南低凸起花岗岩古潜山发育 展布特征。

2 潜山裂缝性储层分布

2.1 潜山储层发育特征

第37卷第7期

琼东南盆地松南低凸起花岗岩储层受大气淋 滤、深部热流体溶蚀等多种作用改造,储层具有"孔 隙+裂缝"双重介质属性,物性纵向分带明显。按照 古潜山发育模式,综合储层的储集空间组合特征、 储层类型及其岩石物理特征、储层地震响应特征, 将松南低凸起花岗岩潜山储层在纵向上划分为砂 砾质风化带、风化裂缝带和内幕裂缝带3类。

砂砾质风化带由于埋深较浅,受压实作用弱, 整体结构疏松,储层类型为孔隙型,厚度一般<50m, 常见砾石、花岗岩块等,风化严重,顶部多发育较薄 土壤层。砂砾质风化带与常规碎屑岩在岩电参数 上差异较小,表现为低伽玛、低密度、高声波时差特 点,录井上常与上覆近源扇三角洲砂砾岩混淆。砂 砾质风化带顶面在地震剖面上表现为近似平行于 基底强波峰的中等强度、较连续反射,受其厚度与 地震分辨率影响,在地震剖面上往往难以准确预测 砂砾质风化带底界。

风化裂缝带储层类型表现为孔隙-裂缝型,在井 壁取心样品及薄片上可见明显网状裂隙,声电成像 测井见明显高角度裂缝、孔洞发育,电性曲线表现 为高伽玛、高电阻率、低声波时差特征,在密度曲线 上由于裂缝发育,多存在明显的锯齿状异常(图 2)。 从成因上分析,风化裂缝带为构造裂缝受后期大 气淋滤溶蚀改造而成,储层物性较好。内幕裂缝 带主要为构造成因裂缝,局部含致密层,裂缝发育 密度也较风化裂缝段略差。风化裂缝带与内幕裂 缝带的整体纵波速度为4500~6000 m/s,其分界 面在地震剖面上难以区分,都对应网格状交叉反射。 受限于地震资料的分辨率,这种反射特征并非裂 缝的直接响应,而是断面波的叠合效应。由于构造 裂缝往往发育在断裂密集区,因此,网格状反射也 间接指示裂缝带发育(图3)。松南低凸起花岗岩潜 山钻井证实,风化裂缝带厚度为100~150 m,内幕 裂缝带尚未钻穿,钻进潜山约 300 m 时仍见良好裂 缝储集显示,裂缝纵向上多呈枝状分布,相互切割 连通。





Geological and geophysical characteristics of well YL83 showing the zoning buried-hills in the study area







2.2 裂缝性储层预测

Fig.2

业内通常采用相干体、方差体及蚂蚁体等属性 等开展潜山裂缝性储层预测研究。相干体主要反 映研究区构造活动及断裂发育情况,而潜山储层主 要以构造裂缝及后期溶蚀缝为主,断裂密集发育区 同时也指示裂缝发育区,因此,相干属性可间接反 映潜山储层发育情况^[10-14]。单一属性体预测结果 受地震资料品质影响较大,效果往往较差,而属性 融合技术可以有效降低预测结果的多解性。不同 地震属性的物理意义不同,且对储层类型响应存在 差异,因此,在属性迭代和融合过程中,必须优选相 关系数高、对裂缝性储层敏感的属性进行融合^[15-18]。 本文选用蚂蚁体与曲率体属性融合的技术,开展潜 山有利储层表征,可以有效地减少潜山储层预测的 多解性。

研究区地震资料为常规拖缆采集三维数据^[19], 方位角比较窄。受潜山上覆地层岩性组合、岩相变 化的不均一性及多期多次的构造叠加运动等综合 影响,潜山面地震反射较为杂乱,整体信噪比较低; 因此,采取的工作步骤是:①首先对原始地震数据 做大尺度构造平滑滤波,降低潜山内幕杂乱信号的 干扰;②结合区域断裂走向及主应力场分析,开展 连续倾角扫描与主曲率属性计算;③对得到的主应 力方向与垂向方向曲率体分别进行蚂蚁追踪,并将 2个方向的蚂蚁体属性归一化处理,之后加权平均 得到属性融合体。 从研究区潜山属性融合体三维显示(图 4)可以 看出,松南低凸起潜山整体向南抬升,构造高低起 伏,大致发育 3 排 NE 向展布的潜山构造带,北部 第 1 排低潜山呈"馒头状",发育多个高点;南部为 NE 向长轴高潜山,圈闭规模大,其中 YL8 井区已钻 探 4 口井,证实裂缝性储层十分发育。裂缝发育区 表现为多组裂缝相交网状分布,裂缝的主要方向为 NE 向,次要方向为 NW 向、近 SN 向。NE 向裂缝 延伸较长,横向上延伸长度为 200~600 m 不等。 依据该预测成果,在北部低潜山部署 YL1 井,实钻 证实潜山储层物性好,孔隙度约为 8%,钻进潜山超 200 m 依旧发育裂缝性储层,验证了该方法在松南 低凸起区的适用性。



图 4 松南低凸起古潜山属性融合预测储层裂缝三维显示特征 Fig.4 3D fracture prediction using attribute merge for buried-hills on Songnan Low Uplift

3 潜山含油气预测

叠前弹性反演、AVO分析、吸收衰减属性^[20] 是常规碎屑岩储层含气性检测的3大技术方法, 在南海西部深水区勘探实践中取得较好的应用效 果。由于潜山储层条件复杂,横向非均质性强,有 效储层厚度变化大,既发育与常规碎屑岩岩石物 理特征类似的低速低密的砂砾质带,也发育高速 高密的裂缝带储层,因此,常规含气性检测手段对 于深水区潜山这一新型勘探领域预测效果不佳。 为此,笔者引入地震纹检测技术开展潜山含气性 研究工作。

3.1 地震纹技术原理

地震纹是参考声纹的概念而引入的一个概念, 定义为"地震记录上能标识目标地质体属性的起伏 波纹",是特定地质体地震波动力学特征的综合表 现^[21-22]。地震纹分析的关键不在其信号特征的提 取,而在其特征对特定地质目标体标识性的确定。 利用地震纹分析技术,可以获得地下地质体的流体 信息。与叠前反演等技术不同,它不依赖于岩石物 理分析,克服了不同流体因素对弹性参数区分度的 要求。

地震纹技术方法主要基于倒谱变换分析地震 波穿过地下含不同流体的地质体时动力学特征的 微弱差异。倒谱分析是一种同态变换,可以采用傅 立叶变换或者 Z 变换计算,其特点是通过对时序信 号谱函数的对数变换,能够分离提取出弱信号。大 量正演模拟分析表明,1、2 阶倒谱系数作为识别含 气层的最佳参数组合可以充分表征地震记录的特 征,两者具镜像对称关系,其差值越大指示含气性 越好^[23-24]。

3.2 模型建立及验证

松南低凸起花岗岩潜山储层以孔隙型砂砾质 风化带、孔隙-裂缝型风化裂缝带与裂缝型内幕裂 缝带为主。砂砾质风化带因遭受长期大气风化淋滤, 花岗岩破碎严重,且大多风化成碎屑颗粒,与常规碎 屑岩储层的岩石物理特征基本类似,其纵波速度主 要受埋深压实作用影响;而风化裂缝带及内幕裂缝 带由于仍保存花岗岩的结构特征,岩石骨架大多完 整,因此,其岩石物理特征与原状花岗岩相差无几, 受深埋压实作用较小,纵波速度约4500~6000 m/s。

依据已钻井岩石物理分析,结合潜山储层纵 向分带特征,本文利用弥散黏质方程分别建立研 究区潜山砂砾质风化带、风化裂缝带的地质模型, 采样频率1000 Hz, 雷克子波主频 25 Hz, 基岩及上 覆围岩地层品质因子 Q 值 200。如图 5 所示, 砂砾 质风带含气层与含水层厚度均为 50 m, 气层速度 为 2 400 m/s, 水层速度为 2 800 m/s, 上覆两层围岩 泥岩速度为2700~2900 m/s,下伏潜山裂缝带速 度为4500~5000 m/s。从地震响应来看,含气层 与含水层振幅强度差异很小,而地震纹剖面上气层 表现为明显倒谱系数异常。图 6 为风化裂缝带含 气模型, 气层厚度为 50 m, 速度为 4 750 m/s, 上覆 泥岩速度值与砂砾质风化带模型(图 5a)一样,下伏 潜山基岩速度为4800~6000 m/s。正演模拟分析 表明,基于倒谱变换的地震纹技术可以有效识别潜 山有利储层段含气特征。









3.3 应用效果

琼东南盆地松南低凸起 YL8 研究区潜山地 形高低起伏,整体水深约 1 800 m,地层埋深约 1 000~1 300 m,基底潜山顶界(T₁₀₀)在地震剖面上 表现为一组中强较连续反射,潜山层段地层破碎, 小断裂发育,上覆崖城组(T₇₀)、陵水组(T₆₀)、三亚 组(T₅₀)地层呈层层超覆特征(图 7)。YL81 井在潜 山段钻遇厚层砂砾质风化带气层, 孔隙度约 25%, 在地震剖面上呈一组强振幅异常, 为典型的低速低 密气层响应, 在常规叠前弹性反演剖面上表现为明 显的低纵、横波速度比(*V*_P/*V*_S)异常, 同时, 地震纹 含气性检测的结果也表现为地震纹强异常。2 种技 术方法对砂砾质风化带流体识别都具有较好的效





Fig.7 Raw seismic profile with wells through buried-hills in the study area

果,基于倒谱分析的地震纹分析方法在气、水识别 敏感度以及在时间-空间分辨率上的效果较叠前反 演更好,计算效率更高。

研究区 YL83 井钻遇厚层风化裂缝带,钻遇气 层厚度超百米,在常规叠前弹性反演剖面(图 8a)上 无明显 V_P/V_S 异常;而从地震纹检测剖面(图 8b)及 平面预测图(图 9)看,在该井点及低部位处均表现出 明显的地震纹倒谱异常。YL13 井潜山段无明显地 震纹异常处则表现为低 V_P/V_S 异常,实钻证实 YL13 井为水层,说明常规叠前反演对潜山风化裂缝带含 气性判别存在明显的多解性,这也验证了地震纹含 气性检测技术在本区具有较好的适用性。





综合潜山有利储层预测与地震纹检测结果,在 YL83 井东北部低部位部署的评价井获得成功,实 钻超 300 m 优质风化裂缝带与内幕裂缝带储层,钻 遇气层厚度近 50 m,初步解决了研究区潜山含气性 预测难题,为井位部署提供了良好依据,有效促进 了松南低凸起潜山勘探研究工作。

4 结论与建议

(1)综合井震特征对比、岩电参数分析等手段, 将花岗岩古潜山储层纵向划分为砂砾质风化带、风 化裂缝带及内幕裂缝带,其中风化裂缝带储层厚度



图 9 研究区潜山地震纹检测平面特征 Fig.9 Map of seismic print for buried-hills in study area

大、物性好,为本区古潜山重点储层相带。结合蚂 蚁体与曲率体属性融合技术,在区域断裂展布基础 上,提出潜山裂缝性储层半定量预测新方法,精细 刻画了裂缝性储层平面分布特征,有效解决了常规 技术方法的多解性问题。

(2)针对常规叠前反演手段难以解决潜山裂缝 型储层含气性识别的问题,首次在研究区应用基于 倒谱变换的地震纹检测技术,从正演模拟出发,针 对潜山孔隙型与裂缝型储层开展含气性检测,预测 结果与已钻井吻合度高,取得较好的应用效果。

(3)琼东南盆地深水区松南低凸起中生界花岗 岩潜山分布面积广,勘探潜力巨大,综合多种地质 地球物理手段圈定有利勘探区带,对于下一步勘探 具有较大的促进意义。

参考文献:

- 徐长贵,于海波,王军,等. 渤海海域渤中19-6大型凝析气田形 成条件与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 25-38.
- [2] 薛永安, 韦阿娟, 彭靖淞, 等. 渤海湾盆地渤海海域大中型油田 成藏模式和规律[J]. 中国海上油气, 2016, 28(3): 10-19.
- [3] 李长宏, 彭英明, 褚庆忠, 等. 渤海湾盆地上太古界潜山油藏岩 性特征、储集空间类型及影响因素[J]. 中国海上油气, 2018, 30(5): 21-28.
- [4] 罗伟,蔡俊杰,万琼华,等.惠州凹陷花岗岩潜山储层条件分析

及石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(4): 126-135.

- [5] 王景春, 窦立荣, 徐建国, 等."两宽一高"地震资料在花岗岩潜 山储层表征中的应用:以乍得邦戈盆地为例[J].石油地球物理 勘探, 2018, 53(2): 320-329.
- [6] 程四洪,夏振宇,刘天琳.变质岩潜山内幕裂缝表征及储层预测研究[J].地球物理学进展,2017,32(2):596-602.
- [7] 王亚,王孟华,田建章,等.一种适用于深潜山及内幕的有效储 层地震预测方法:以廊固凹陷杨税务潜山为例[J].地球物理学 进展,2019,34(5):1930-1937.
- [8] 杨计海,黄保家,杨金海.琼东南盆地深水区松南低凸起天然气 成藏条件与勘探潜力[J].中国海上油气,2019,31(2):1-10.
- [9] 王振峰,李绪深,孙志鹏,等.琼东南盆地深水区油气成藏条件 和勘探潜力[J].中国海上油气,2011,23(1):7-13,31.
- [10] 任芳祥, 龚姚进, 张吉昌, 等. 潜山内幕油藏裂缝发育段地震 响应特征研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 565-573.
- [11] 朱宝衡.改进的蚂蚁追踪裂缝检测算法及其应用研究[J].海 洋石油,2019,39(3):27-32.
- [12] 王世星. 高精度地震曲率体计算技术与应用[J]. 石油地球物 理勘探, 2012, 47(6): 965-972.
- [13] 王军,李艳东,甘利灯.基于蚂蚁体各向异性的裂缝表征方法[J].石油地球物理勘探,2013,48(5):763-769.
- [14] PEDERSON S I, SKOV T. Automatic fault extraction using artificial ants[J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2002, 21: 512-515.
- [15] 李婷婷, 王钊, 马世忠, 等. 地震属性融合方法综述[J]. 地球物 理学进展, 2015, 30(1): 378-385.

- [16] 吴海波, 王江, 李军辉. 地震多属性融合技术在贝尔凹陷储层 预测中的应用[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(2): 96-101.
- [17] 张林清,张会星,姜效典,等.弹性参数反演与属性融合技术 在"甜点"预测中的应用[J].天然气地球科学,2017,28(4): 582-589.
- [18] 王彦仓,秦凤启,杜维良,等.地震属性优选、融合探讨[J].中国石油勘探,2013,18(6):69-73.
- [19] 宋爱学, 王利杰, 杨金海, 等. 琼东南盆地深水区叠前深度偏 移连片处理关键技术[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(7): 56-64.
- [20] 余朝华,杜业波,肖坤叶,等. 乍得Bongor盆地基岩潜山储层

特征与影响因素研究[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1279-1290.

- [21] 解滔,郑晓东,张䶮.基于线性预测倒谱系数的地震相分 析[J].地球物理学报,2016,59(11):4266-4277.
- [22] 李占东,张丽双,李阳,等.基于多次迭代属性融合技术的河 道砂刻画:以大庆油田扶余油层Z区为例[J].地球物理学进 展,2017,32(3):1161-1168.
- [23] 曹俊兴, 薛雅娟, 田仁飞, 等. 深层碳酸盐岩储层含气性检测 方法技术研究[J]. 石油物探, 2019, 58(1): 9-16.
- [24] 曹俊兴,刘树根,田仁飞,等.龙门山前陆盆地深层海相碳酸 盐岩储层地震预测研究[J].岩石学报,2011,28(8):2423-2434.

DISTRIBUTION PATTERNS OF FRACTURE RESERVOIRS IN THE BURIED-HILLS IN DEEP WATER AREAS OF QIONGDONGNAN BASIN AND PREDICTION OF FAVORABLE AREAS FOR HYDROCARBON EXPLORATION

SONG Aixue¹, YANG Jinhai¹, HU Bin¹, LIU Yi¹, REN Lijuan¹, CAO Junxing² (1 Zhanjiang Branch of CNOOC Limited, Zhanjiang 524057, China; 2 Chengdu University of Technology, College of Geophysics, Chengdu 610059, China)

Abstract: The granitic buried-hills on the Songnan Low Uplift in the deep water areas of the Qiongdongnan Basin is a key exploration target in the Western South China Sea. Owing to the complexity of geological conditions and low quality of seismic data, it is difficult to predict favorable reservoirs in the study area. In this paper, based on drilling data, favorable facies zones for buried-hills are identified and subdivided. And the ant tracking technique merged with curvature attributes is adopted to describe the distribution of favorable fracture reservoirs in the sum tracking technique merged with curvature attributes is adopted to describe the distribution of favorable fracture reservoirs in the buried-hills, and as the results, the prediction accuracy of fractured reservoir is effectively improved. At the same time, combined with the seismic print technology based on quefrency transform, we carry out detection of favorable reservoir in buried-hills based on forward modeling, which is proven efficient and successful and may benefit the future exploration projects in the study area.

Key words: buried-hill reservoir; fracture prediction; ant track; attribute merge; seismic print; Qiongdongnan Basin