

邱宇, 李安琪, 周杰, 等. 琼东南盆地深水区松南低凸起花岗岩风化壳储层底界面识别技术[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(7): 87-96.

琼东南盆地深水区松南低凸起花岗岩 风化壳储层底界面识别技术

邱宇, 李安琪, 周杰, 宋爱学, 胡斌

(中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海口 570311)

摘要: 琼东南盆地深水区松南低凸起花岗岩古潜山风化壳储层油气勘探重大突破, 展示其具有较好勘探前景。针对花岗岩风化壳储集层地震勘探中储集层底界面确定难的问题, 以琼东南盆地深水区前古近系花岗岩风化壳为研究对象, 应用钻井、测井及地震资料, 总结了花岗岩风化壳储层底界面标定的模式。该模式以井资料为依据构建岩石物理模型, 采用地震正演模拟方法研究确定不同厚度花岗岩风化壳储层与地震响应之间的联系; 从古潜山暴露时间与风化程度关系分析入手, 通过印模法研究确定花岗岩潜山古地貌, 并在古地貌图上选取古潜山不同位置的暴露点, 统计其在地震剖面上对应的风化壳储集层顶底界面双程走时时差, 以正演模拟为基准进行多样点拟合分析, 获得相应的定量关系式。最后以研究区风化壳储层顶界面作为输入信息, 通过关系式计算即可获得全区风化壳储层底界面标定结果, 以及风化壳储层时间厚度图。采用上述技术方法对古潜山储层底界面进行标定, 提高了花岗岩古潜山风化壳油气储层的预测精度。

关键词: 风化壳储集层; 正演模拟; 印模法; 古地貌; 琼东南盆地

中图分类号: P744.4; P539.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.087

0 引言

古潜山油气储层具有良好的开发前景, 在中国渤海湾盆地、东海盆地、珠江口盆地、琼东南盆地、北部湾盆地、辽河盆地等地区广泛分布^[1-2]。近年来, 随着南海北部深水勘探的不断深入, 在琼东南盆地深水区松南低凸起花岗岩潜山领域 YL-A 构造亦钻遇了近百米厚的优质气层, 实现了潜山领域油气勘探的重大突破, 钻探结果揭示该区中生界花岗岩基底潜山风化壳为主要的油气储集层^[3-4]。然而, 由于基底储层的物性横纵向变化较大、底界面地震响应杂乱, 储层顶底界面标定难度较大, 且储层顶底界面的标定直接影响储层预测的精度, 增加了油气勘探的不确定性。目前国内外对风化壳储层

的研究主要体现在储层微观特征及地质发育模式上, 胡志伟等^[5]总结了近几年国内渤海盆地蓬莱 9-1 及柴达木盆地东坪地区在花岗岩基岩风化壳中油气勘探取得的重大突破; 徐守立等^[6]综合花岗岩潜山油气藏储层特性及控制因素, 在纵向上进行了风化壳储层的识别和分带划分; 姚元锋^[7]总结了花岗岩岩石风化带特征以及风化带划分的一些常用技术和方法, 为风化壳纵向分带提供了依据; 马平^[8]通过对花岗岩风化程度与其所处的微地形相关性进行统计分析, 获得地形与风化程度之间的关系。总之, 众多学者从纵向上划分了花岗岩风化壳储层, 同时提出了一些统计划分的方法, 但缺乏采用地球物理手段, 特别是利用地震界面识别风化壳储层底界面的技术方法等相关研究。鉴此, 本文利用钻井、测井及地震资料, 从已钻探花岗岩古潜山风化壳储集层物性特征出发, 通过正演模拟获得相应的地震响应特征; 在此基础上, 基于古潜山暴露时间与风化程度之间存在的相关性, 通过印模法恢复潜山古地貌, 进行多样点统计拟合分析, 获得古地貌不同高点与风化壳储层在地震剖面上

收稿日期: 2021-04-08

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)项目“深海油气探测及生产智能优化技术研究”(ZJW-2019-04)

作者简介: 邱宇(1989—), 男, 工程师, 主要从事海洋油气勘探方面的研究工作. E-mail: qiuyu3@cnooc.com.cn

顶底时差的定量关系式。最后应用该关系式进行全区风化壳底界面的识别与标定工作,其标定结果验证了该方法的可行性和可靠性,亦为花岗岩古潜山风化壳的识别预测与圈定评价等提供了行之有效的技术思路及研究方法,同时亦为减少油气勘探风险、提高勘探成功率实施科学钻探部署等提供了指导和参考。

1 区域地质概况

琼东南盆地位于南海北部大陆边缘西部,处于海南岛以南、西沙群岛以北的海域,属太平洋构造域,是欧亚板块、印支板块和太平洋板块三者之间相互碰撞所导致一系列构造活动相互作用的结果。盆地整体呈 NE 向展布,其西与以走滑断裂体系为主的莺歌海盆地相邻,东接神狐隆起与以大陆边缘伸展断裂体系为主的珠江口盆地相隔,北邻海南岛隆起,南接西沙隆起区(图 1),盆地海域面积约 $6.0 \times 10^4 \text{ km}^2$,盆底面积约 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地新生代构造演化是在古南海消亡与新南海扩张导致盆地持续沉降的构造背景下形成的。新生代主要发生了珠琼运动、南海运动、白云运动及东沙运动等 4

次对构造沉积演化影响巨大的构造活动,进而控制和强烈影响了琼东南盆地及其周缘的构造沉积环境^[9-11]。松南低凸起花岗岩古潜山风化壳储层研究区处在琼东南盆地南部坳陷深水区中东部,南北分别与松南-宝岛凹陷和陵水凹陷及北礁凹陷相邻(图 1 红框处)。近年来在松南低凸起花岗岩古潜山风化壳上钻探了 YL-A 井,其在基底花岗岩风化壳储层中钻遇了 42.2 m 厚的优质气层,首次在该区古潜山领域获得了重大的油气勘探突破,亦证实了琼东南盆地松南低凸起及周缘前古近系-古近系为一套新的、重要的油气勘探层系。研究区与古潜山相邻及相关的地层自上而下主要由下中新统三亚组、渐新统崖城组及前古近系基底花岗岩风化壳所构成。其中,崖城组砂砾岩与三亚组海相泥岩呈不整合接触,三亚组泥岩可作为良好的区域盖层;基底花岗岩在接受沉积前,由于经过长时间的暴露风化,形成了具有良好裂缝-孔隙型储集空间的风化壳储层。古潜山风化壳储层及其周缘属于被“多凹环抱”的古凸起,是烃源供给及油气侧向运移的低势区,具有较好的油气运聚成藏条件,属于南海北部深水区油气勘探的重要新领域和新类型,迫切需要进一步深化研究,拓展深水油气勘探成果^[12-14]。

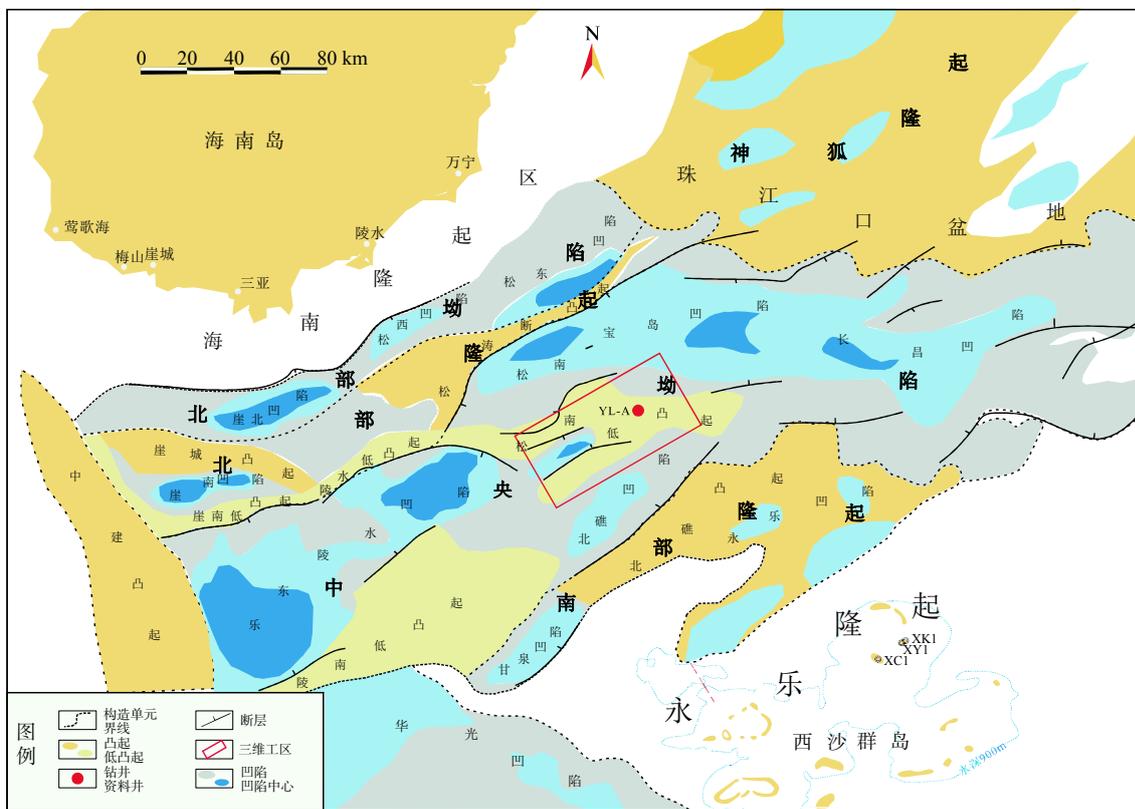


图 1 琼东南盆地构造纲要图和研究区域图

Fig.1 Tectonic map of the Qiongdongnan Basin and the survey region

2 花岗岩风化壳储集层特征

2.1 花岗岩风化壳地质成因及分带特征

风化壳是指地质历史时期曾出露地表的地质层, 在经过一定时期的风化剥蚀后, 再经由埋藏、压实固结所形成的壳体或壳带。影响风化壳发育的因素主要有气候、构造、岩石性质等^[15-19]。风化作用促进了琼东南盆地松南低凸起及其周缘花岗岩潜山储层的发育^[20], 改变了该区岩石的物理化学性质, 形成大量的次生孔隙, 为花岗岩潜山提供了优质储集空间。松南低凸起周缘花岗岩侵入体形成于三叠纪, 受印支期挤压成山、燕山期走滑改造、喜山期伸展翘倾抬升等构造活动影响, 形成了广泛分布的

风化壳。

松南低凸起花岗岩潜山储层垂向上具有明显的分带性, 根据风化程度可分为风化壳、裂缝带和基岩带, 其中风化壳可分为土壤化带、砂砾质风化带(图 2)。土壤化带风化程度最高, 主要以棕红色或黄色强风化细粒风化层为主, 花岗岩特征基本消失, 主要矿物成分为石英和黏土矿物; 砂砾质风化带以棕红色或黄褐色砂砾状基岩为主, 主要以花岗岩岩块、风化所形成的岩屑为主, 其中以岩屑为主, 花岗岩岩块次之, 含量 < 50%; 裂缝带主要由花岗岩岩块构成, 含量介于 50%~90%, 裂缝的密度总体随深度的增加有降低的趋势, 有时也可见裂缝相对密集发育带与裂缝相对不发育带相间分布的特征; 基岩带则主要由新鲜的花岗岩基岩构成, 基岩中发育有少量裂缝。

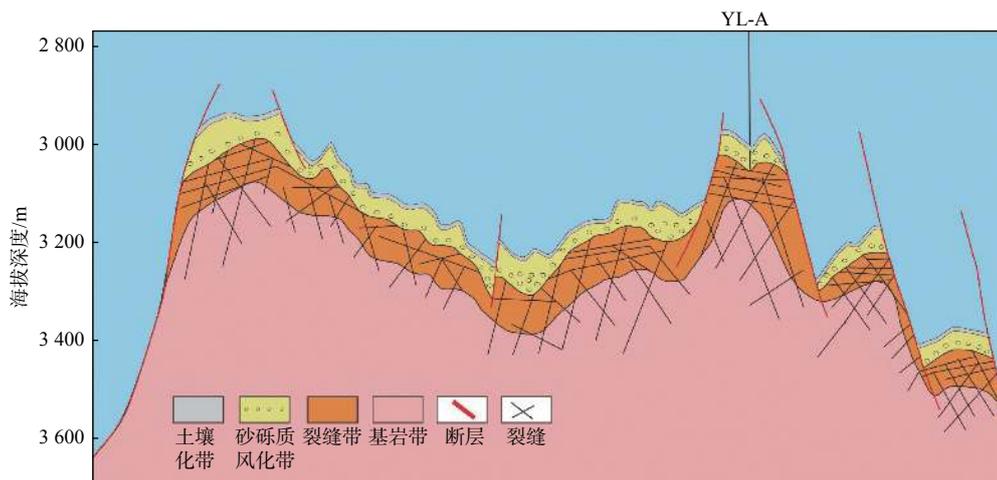


图 2 松南低凸起花岗岩古潜山储层风化壳形成模式

Fig.2 Formation model of a granite reservoir on Songnan Low Uplift

2.2 花岗岩风化壳储层物性与地震响应特征

通过对松南低凸起研究区内 YL-A 井测井资料分析, 为正演模拟提供依据。土壤化带在伽马测井曲线上表现为高伽马、低密度, 在电阻率成像测井表现为“高阻低导”特征; 砂砾质风化带可分为砂质风化带和砾质风化带, 砂质风化带测井表现为较高的伽马值和高孔隙率, 声波时差介于 98.1~132.7 $\mu\text{s}/\text{f}$, 平均值为 114.2 $\mu\text{s}/\text{f}$; 砾质风化带测井表现为较高伽马值, 略高于砂质风化带, 从砂质风化带到砾质风化带, 反映孔隙度的补偿中子测井曲线有一个突变, 呈现出孔隙度突然降低的特征, 砾质层中的裂缝呈近水平状, 声波时差介于 93.43~126.16 $\mu\text{s}/\text{f}$, 平均值为 112.9 $\mu\text{s}/\text{f}$; 裂缝带整体伽马值高于砾质风化带,

裂缝层中的裂缝呈高陡或低缓的倾角, 主要表现为电阻率突然增加, 并变得相对稳定, 随深度的增加缓慢的增大, 密度总体有随深度的增加而降低的趋势, 以声波时差测井曲线响应最为明显, 可见到明显的“周波跳跃”现象, 说明裂缝较为发育; 基岩带声波时差一般较小, 介于 50~60 $\mu\text{s}/\text{f}$, 孔隙度很低, 电阻率通常较高, 各项数据均显示基岩带储集物性极差, 仅在裂缝处发育较好(图 3)。花岗岩风化壳基于垂直分带性在地震剖面上具有不同的特征, YL-A 井钻遇前古近系花岗岩风化壳储层 42.2 m, 说明该井处风化壳发育较好, 如图 3 中过 YL-A 井地震剖面所示为多条连续性较好的强振幅反射, 风化壳储层顶底界面相差 38 ms 时间厚度。井震联合解释说明, 通过井数据提取储层特征进行正演能够得到

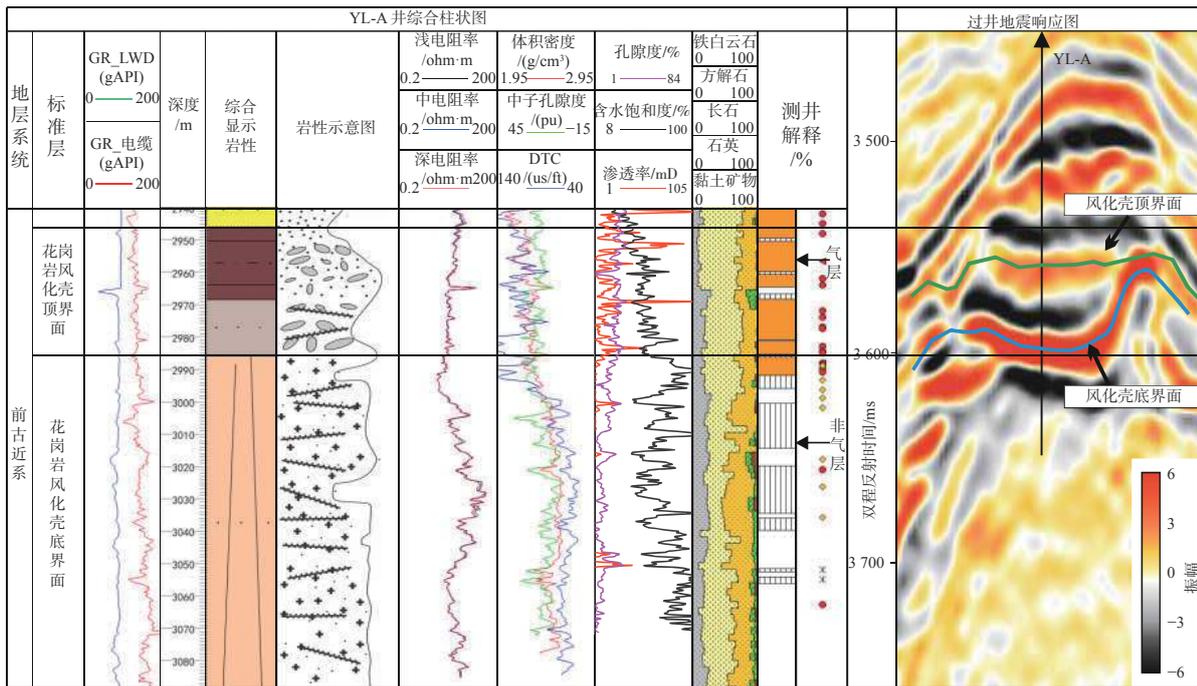


图3 松南低凸起 YL-A 井钻遇花岗岩古潜山储层综合柱状图及地震响应特征

Fig.3 Integrated stratigraphic column with seismic records of well YL-A of the Songnan Low Uplift

地震剖面上的反射特征,为花岗岩风化壳储层底界面的识别奠定了良好的基础。

2.3 不同厚度花岗岩风化壳地震响应正演模拟

通过对井曲线特征的总结,选取强风化带和中风化带作为可成为储集空间的风化壳储集层,其平均速度为 3 600 m/s,密度为 2 400 kg/m³;盖层为深海相泥岩,其平均速度为 2 600 m/s,密度为 2 250 kg/m³;以致密的花岗岩为基岩,其平均速度为 4 800 m/s,密度为 2 600 kg/m³ 建立楔形模型(图 4b)。楔形模型能够全方位的展示不同厚度的风化壳储集层在地震剖面上的响应。选择主频为 36 Hz 的雷克子波,通过克希霍夫波动方程正演获得叠加剖面。可以

看出,当花岗岩风化壳厚度<25 m时,由风化壳砾质风化带底部至黏土带顶,波阻抗呈一直增大趋势,形成一个低频单峰反射,风化壳顶底界面难以有效识别、区分;当风化壳厚度>25 m时,风化壳砾质风化带底面和黏土带顶面可反映为 2 条连续的强振幅反射,对应 2 个波峰,可对风化壳顶底面进行有效区分。因此,认为地震剖面上潜山顶面对应的强波峰代表潜山花岗岩风化壳的构造形态,而底界面的识别与风化壳的厚度有着较为直接的关系。古潜山的高度与受风化的时间即风化壳储集层厚度有着直接的关系,故通过顶界面追踪与潜山古地貌形态的恢复能够实现风化壳底界面的定量识别和追踪。

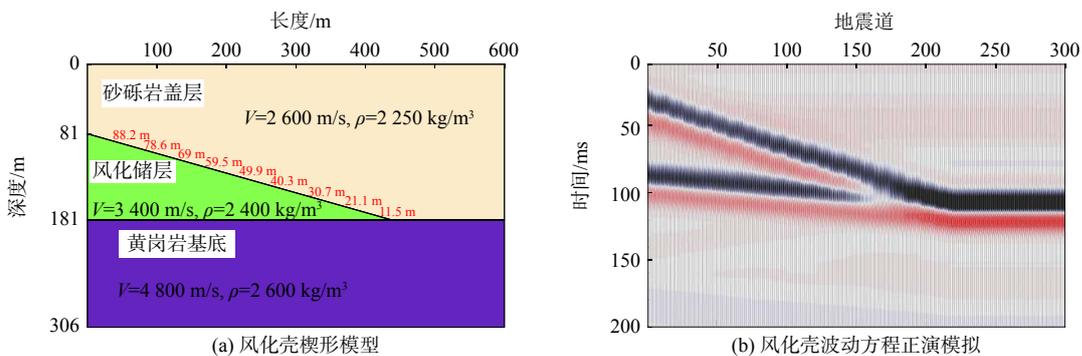


图4 松南低凸起花岗岩风化壳储层正演模型

Fig.4 Forward simulation of granite weathering crust reservoir on Songnan Low Uplift

3 风化壳储层定量识别方法

3.1 古地貌恢复

岩石处于高势区时, 暴露地表时间越长, 越

容易发生风化作用。地层经过沉降等构造运动后, 得到现在的地层形态(图 5a), 地震剖面并不反映古潜山在接受暴露风化时候的真实形态。所以需要通过前古近系潜山古地貌恢复来判断古潜山形态, 确定风化程度, 最终确定风化壳的有利发育区。

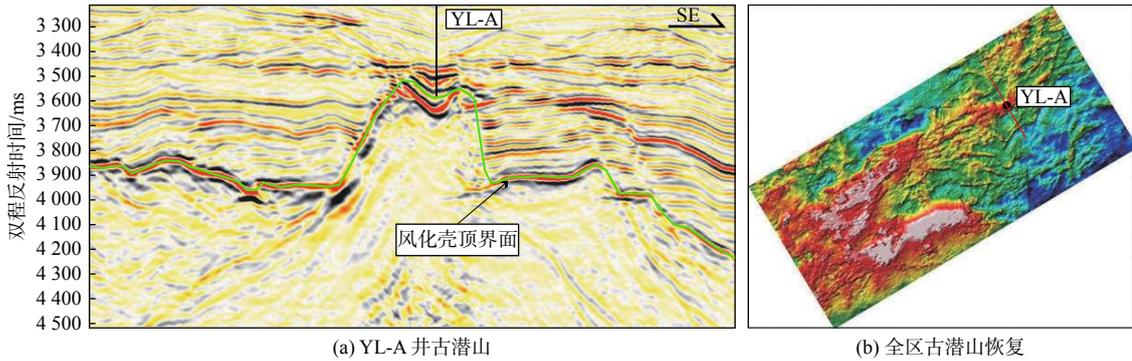


图 5 松南低凸起古近系沉积前古地貌特征恢复结果

Fig.5 Restored profile by Paleogene sedimentary paleogeomorphology through well YL-A on Songnan Low Uplift

古地貌恢复方法较多, 常用的有地球物理法、印模法、残厚法、沉积学方法、层序地层法等^[21-30], 但其均各有利弊, 如残厚法未考虑沉积前地形及剥蚀影响, 不能准确恢复古构造背景; 层拉平法不适用于构造复杂区域, 去压实校正难。因此, 为了使恢复出的古地貌更加逼近原始形态, 最优的方法便是将上述 2 种或几种方法综合运用来进行古地貌的恢复, 本文采用印模法与古地质图分析法相结合来对研究区前古近系潜山顶面古地貌进行恢复。

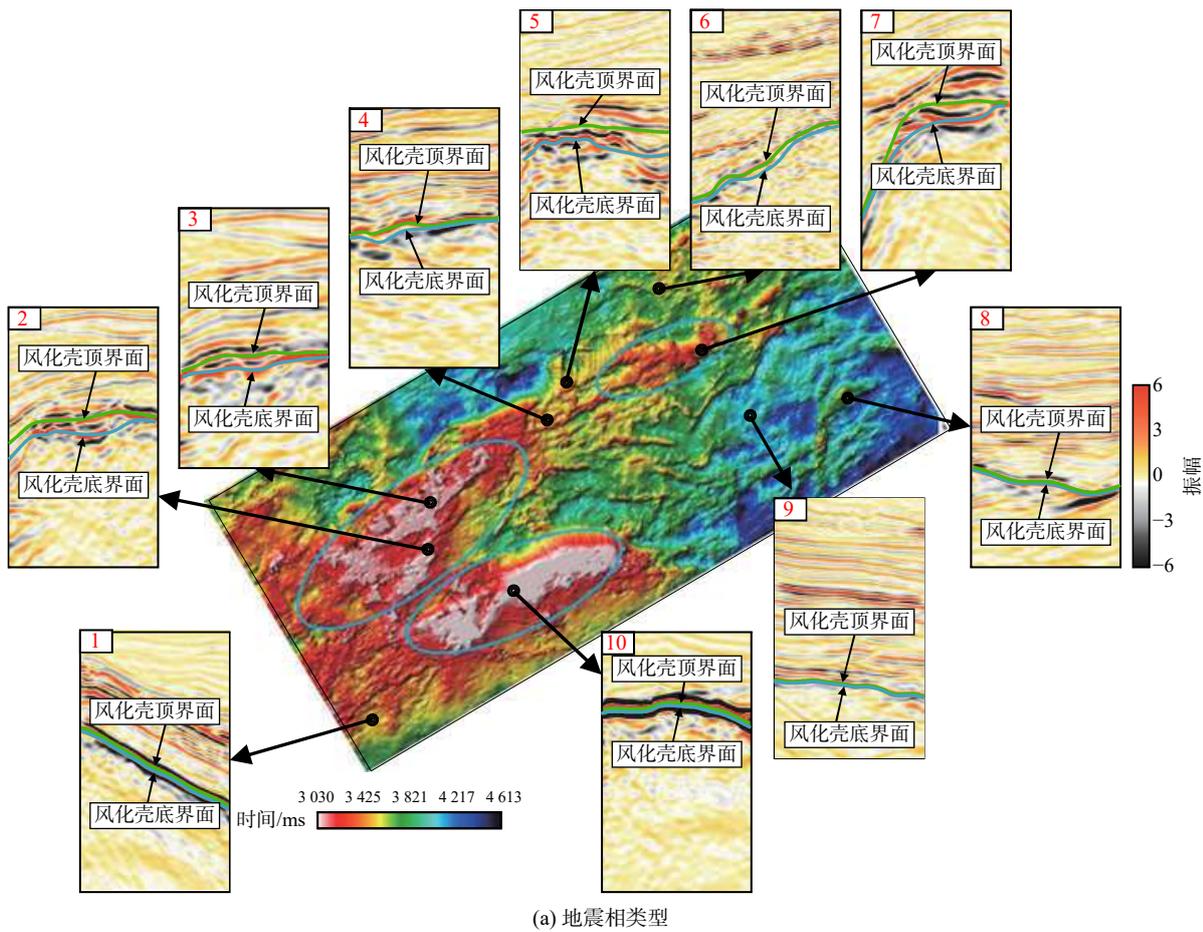
印模法将前古近系花岗岩潜山顶面结束剥蚀、开始上覆沉积时期视为一等时面, 根据沉积补偿原理, 利用上覆新沉积地层与残余古地貌之间存在镜像关系反应古地貌形态。本次研究采用的技术路线为: 残余厚度→剥蚀恢复→去压实恢复→构造恢复→印模法恢复。古地质图分析法是通过研究区古地质图了解沉积前古构造格局及盆地各地区的剥蚀程度, 从区域上对研究区古地貌特征有一个宏观的把握。假设基准面之上的沉积为等厚沉积, 则基准面到不整合面之间的残厚越小, 说明运动抬升幅度越大, 剥蚀程度越大, 在古地质图中表现为出露地层越老, 在古地貌图上则表现为较高区域。在使用印模法进行古地貌恢复时, 标志层的选择至关重要。所选界面应靠近侵蚀面, 且在全区范围内有着稳定分布的等时界面, 可代表当时海平面。考虑到研究区内陵水组顶面(即新近系、古近系分界面)为盆地断拗转换期分界面, 新近系以来三亚组、梅

山组等沉积时期盆地构造运动相对平缓, 地层近水平发育, 陵水组顶面可作为很好的印模顶面, 且在研究区沉积范围广, 特征明显, 可识别度高。因此, 将陵水组与崖城组残余厚度作为印模块进行前古近系花岗岩潜山顶面古地貌恢复。

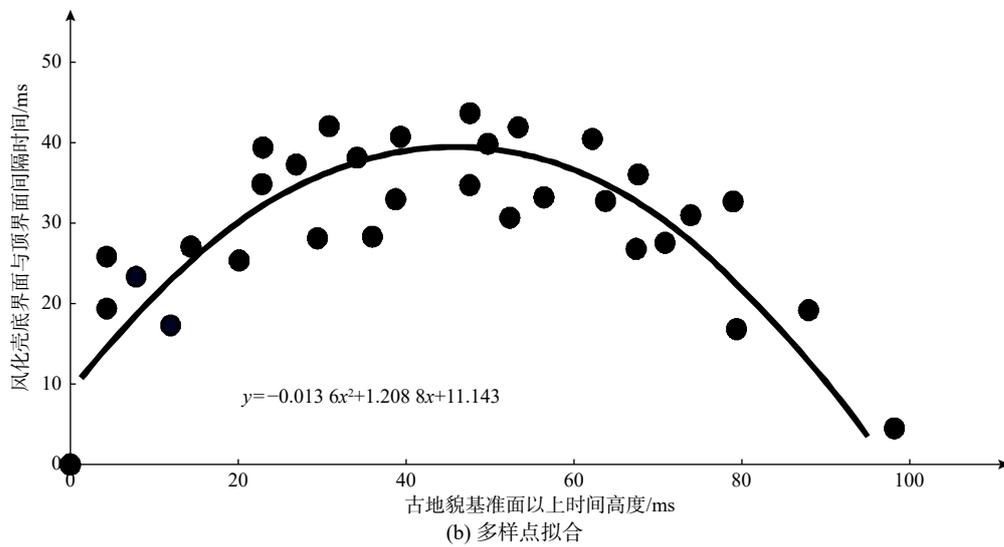
结果显示, YL-A 井古潜山形态得到了很好的恢复, 在井点处确实为古潜山高点, 风化程度较高, 而两翼古潜山变矮, 风化程度逐渐减弱(图 5a)。图 5b 为全区古潜山恢复结果。结果显示, 研究区内西南部和 YL-A 井周缘为前古近系潜山相对高势区, 且研究区北部由 NW 向往 SE 向呈现高程逐渐降低趋势, 由此推测, 研究区内西南部和东北部 YL-A 井周缘为风化壳发育有利区, 与工区内 YL-A 井钻探结果相吻合, 证实古地貌精细恢复工作对花岗岩风化壳有利发育区具有指向性意义。

3.2 拟合关系式建立

古潜山的高度表征沉积之前潜山的古暴露和风化时间, 能够一定程度上表征风化程度, 通过寻找古潜山高度与地震剖面上风化壳储层地震响应特征之间的内在联系, 能够定量的得到风化壳底界面的分布。首先选取研究区不同古地貌高度的 10 个靶点, 并分析其地震剖面的反射特征, 研究发现, 不同古潜山高度的点具有不同的地震反射特征, 表征了不同风化程度。图 6a 中 10 号点位置位于古潜山最高点, 地震反射特征为在一条连续性好的强



(a) 地震相类型



(b) 多样点拟合

图6 松南低凸起古潜山风化壳储层地震相类型及多样点拟合图

Fig.6 Seismic facies and multi-point fitting map of weathering crust reservoir of buried hills on Songnan Low Uplift

反射同相轴下方分布蠕虫状地震反射, 表征为过度风化区, 指示风化壳较薄, 地震剖面无法分辨其顶底界面; 点 2、3、5、7 位于古潜山中上高程点, 地震反射特征为一条或多条连续性好的低频强振幅同相轴, 同相轴下方出现较连续的中强变振幅反射, 表征为强风化区, 风化壳顶底界面清晰; 点 1、4、6

位于古潜山中下高程点, 地震反射特征为一条连续性好的高频中强振幅同相轴, 同相轴下方出现蠕虫状变振幅反射, 表征为中风化区, 风化壳顶底界面较为清晰; 点 8、9 位于古潜山较低的界面点, 地震反射特征为一条连续性较好的高频中强变振幅同相轴, 同相轴下方为杂乱弱反射或空白反射, 表征

为弱风化区,地震剖面无法分辨其顶底界面。通过不同潜山高程点与之对应的地震剖面分析,可以看出古潜山高度与地震响应之间存在一定的联系性。风化时间最长的点,由于过度风化作用,形成松散的土质层,在地震剖面上表现为低频强反射同相轴;而强风化区由于储层良好,风化壳厚度合适,约为 50~100 m,在地震剖面上出现多轴互轴;中、弱风化随着风化壳厚度的变小,地震顶底界面有着对应的越来越弱响应的特征。所以有理由相信古潜山高度与风化壳储集层顶底地震反射时间间隔有着一定的数学关系。

针对古潜山地貌形态与地震剖面上的对应特征,选定一个水平面为潜山受风化壳面即古潜山的出露面,在该研究区选定高于 3 930 ms 的潜山面为风化壳存在面。对该研究区进行多样点统计分析,选取若干样点进行拟合分析。本次选取了 30 个样点,构建拟合关系图如图 6b 所示。得到古潜山基准面以上时间高度与地震风化壳顶底响应时间间隔之间的关系式:

$$y = -0.013 6x^2 + 1.208 8x + 11.143 \quad (1)$$

式中: x 表示古地貌基准点上的时间高度;

y 表示该点对应地震剖面上风化壳储集层顶底界面时间差。

从拟合公式可以看出古潜山时间高度与地震剖面顶底时间间隔存在一种二次曲线关系,表征随着暴露时间风化程度在逐渐增强,所形成的风化壳储层厚度从薄到厚,再到最终的过度风化而形成土

壤化储层,在地震剖面上显示不同的形态特征变化。当 x 为 0 的时候, y 值为 11.143 ms,与正演模拟结果吻合,即表征在风化壳储层小于某个数值时,地震响应顶底界面出现重合现象。拟合结果与地质认识和正演模拟结果相符,进一步说明了该统计拟合结果的正确性与可靠性。

3.3 花岗岩风化壳储层底界面预测

通过对古地貌风化零界面以上的古地貌时间高度进行提取,选定研究区的零界面为 3 930 ms。由于时间高度越小表示古地貌高度越高,时间高度越大表示古地貌高度越低,所以提取 3 930 ms 以上的古地貌时间点即提取 < 3 930 ms 的全区结果,作为拟合公式的输入,获得全区风化壳时间厚度分布图。顶界层位时间加上时间厚度则得到风化壳储层底界面结果图,结果如图 7 所示。其中图 7a 为已知风化壳顶界面全区平面图;图 7c 为古地貌通过拾取拟合得到的全区风化壳储集层时间厚度图。由图 7c 可以看出,该区风化壳储集层的分布特征与已知钻井 YL-A 钻探结果吻合度高,满足地质规律。图 7b 为顶界面通过叠加厚度得到的风化壳底界面,可以看出,顶底界面在保持良好的一致性情况下,在潜山风化程度高的地方有良好的指示性,在风化程度低的地方也有较好的准确性。通过顶底界面的追踪可以直接圈定风化壳储集层的分布情况,为油气的圈定提供直接的依据。

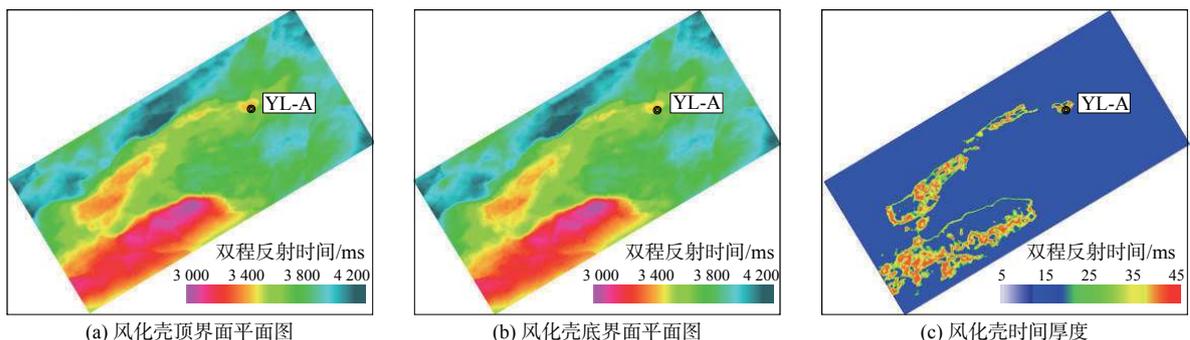


图 7 松南低凸起古潜山风化壳储层顶底界面及厚度

Fig.7 Calibration results of bottom interface of buried hill weathering crust reservoir on Songnan Low Uplift

为了进一步验证风化壳储层顶底标定结果的准确性,在研究区内选取 3 个点(源于计算拟合统计点)来进行结果的说明,如图 8 所示。分别选取了具有不同风化程度的地方进行了验证,图 8a 位于古潜山低点,对应的风化程度属于弱风化,对应的地震剖面响应也属于单轴响应特征,

标定结果与地质结果相符;同样的图 8b 和图 8c 分别对应的古潜山中部和高部位,与地震剖面响应结果也具有较好的一致性,风化壳底界面标定结果较为准确。通过不同特征点标定结果展示,进一步说明该方法具有一定的有效性和可行性。

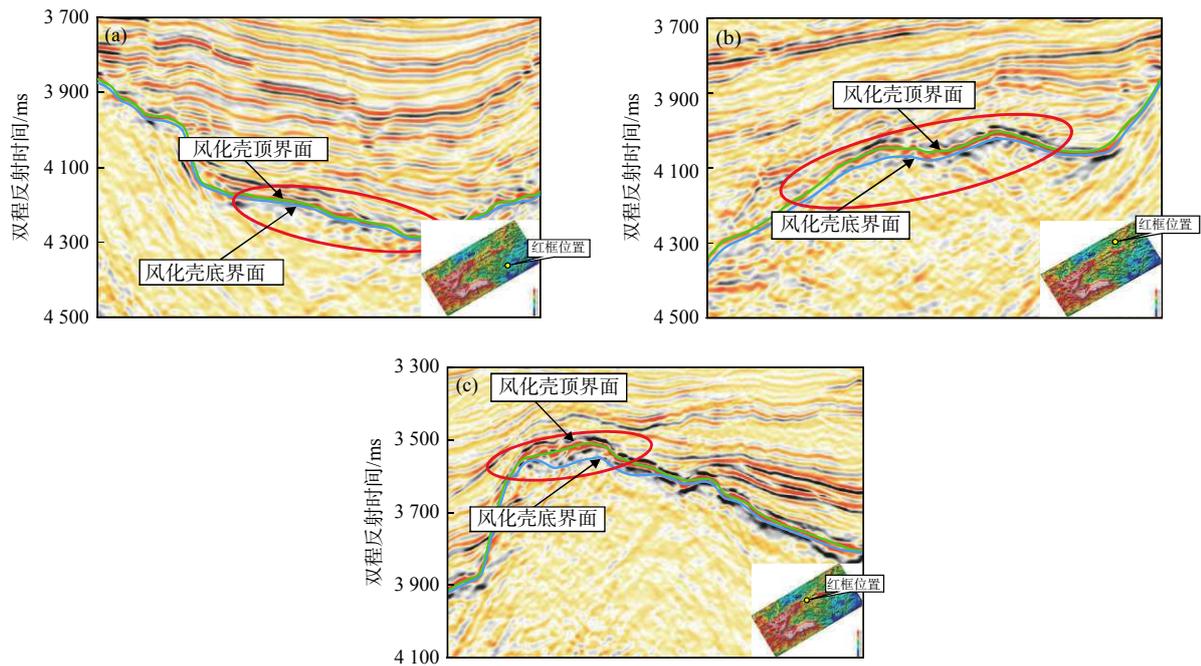


图8 松南低凸起不同类型古潜山风化壳储层顶底标定结果

Fig.8 Calibration results of the top and bottom of weathering crust of different buried hills on Songnan Low Uplift

4 古潜山油气藏勘探实践

随着近两年琼东南盆地深水勘探进程的加快,古潜山领域逐渐成为重要的油气勘探接替区,YL-A井的钻探成功,揭示了琼东南盆地深水区松南低凸起前古近系花岗岩潜山领域具有较好的油气勘探前景。大量油气勘探实践表明,寻找优质储层是深层潜山油气勘探获得突破的关键。研究区孔隙-裂缝型花岗岩风化壳储层即属于优质储层类型,是该区古潜山油气藏勘探的重点目标。在该思路的指导下,应用本文建立的古潜山风化壳储层底界面识别方法部署的YL-B、YL-C井都获得商业天然气流。YL-B、YL-C井位于YL-A井西南方向,2口井通过该方法预测的井点处风化壳厚度分别为24 m和26 m,实际钻遇的前古近系花岗岩潜山顶部风化壳储层分别为23和27 m,其古潜山风化壳储层分布与钻前预测厚度基本一致(图7),且储层物性好(平均孔隙度23.9%),岩性以杂色砂砾岩为主。而且YL-B井,风化壳段储层测井解释全部为气层,全井段气层超百米,通过测试获得高产天然气流,日产气量超百万立方米,实现了琼东南盆地花岗岩潜山领域油气勘探的重大突破。以上天然气勘探成果,充分证实了本技术方法的可靠性及可行性,亦表明其具有良好应用前景,对指导古潜山油气藏勘探部署及勘探生产等均具有重要的现实意义。

5 结论

(1)琼东南盆地深水区松南地区及其周缘前古近系古潜山花岗岩风化壳垂向上呈现明显的分带性,其中土壤化带、砂砾质风化带风化作用强烈,是花岗岩潜山储层中的主要储集空间。风化壳储层厚度与潜山古地貌暴露时间存在内在联系。

(2)根据钻遇花岗岩古潜山风化壳特征,通过正演模拟可发现,松南低凸起及周缘花岗岩古潜山风化壳储层厚度在增加的过程中其地震响应有所不同,进而为储层底界面标定提供了依据。

(3)本文建立的古地貌恢复方法,能够获得可靠的古潜山地貌。通过对研究区内不同高程潜山点与对应的地震剖面中风化壳顶底特征进行多样点统计拟合分析,可以获得对应的拟合关系式,进而运用至全区可获得全区风化壳储层底界面。

(4)通过拟合获得的风化壳储层底界面准确度较高,可靠性强。油气勘探实践证明该技术方法有效可行,其对于指导古潜山油气藏勘探具有参考意义。

参考文献:

- [1] 马龙,刘全新,张景廉,等.论基岩油气藏的勘探前景[J].天然气工业,2006,26(1):8-11.
- [2] 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.
- [3] 张迎朝,甘军,徐新德,等.琼东南盆地深水区Y8-1含气构造天然气来源及侧向运聚模式[J].地球科学,2019,44(8):2609-2618.
- [4] 周杰,杨希冰,杨金海,等.琼东南盆地松南低凸起古近系构造-沉积演化特征与天然气成藏[J].地球科学,2019,44(8):2704-2716.
- [5] 胡志伟,徐长贵,杨波,等.渤海海域蓬莱9-1油田花岗岩潜山储层成因机制及石油地质意义[J].石油学报,2017,38(3):274-285.
- [6] 徐守立,尤丽,毛雪莲,等.琼东南盆地松南低凸起周缘花岗岩潜山储层特征及控制因素[J].地球科学,2019,44(8):2717-2728.
- [7] 姚元锋.花岗岩风化带的勘察方法及遇到的问题[J].城市建设理论研究(电子版),2018(6):93-94.
- [8] 马平.花岗岩风化程度与微地形的关系及其风化深度的统计分析[J].工程勘察,2019,47(8):15-18,48.
- [9] 任建业,雷超.莺歌海—琼东南盆地构造-地层格架及南海动力变形分区[J].地球物理学报,2011,54(12):3303-3314.
- [10] 苏明,解习农,王振峰,等.南海北部琼东南盆地中央峡谷体系沉积演化[J].石油学报,2013,34(3):467-478.
- [11] 王振峰,甘华军,王华,等.琼东南盆地深水区古近系层序地层特征及烃源岩分布预测[J].中国海上油气,2014,26(1):9-16,29,119.
- [12] 刘杰,杨睿,张金华,等.琼东南盆地华光凹陷天然气水合物成藏条件及有利区带预测[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(1):134-142.
- [13] 赖亦君,杨涛,梁金强,等.南海北部陆坡珠江口盆地东南海域GMGS2-09井孔隙水地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(3):135-142.
- [14] 张伟,梁金强,陆敬安,等.琼东南盆地典型渗漏型天然气水合物成藏系统的特征与控藏机制[J].天然气工业,2020,40(8):90-99.
- [15] 黄建红,谭先锋,程承吉,等.花岗质基岩风化壳结构特征及油气地质意义:以柴达木盆地东坪地区基岩风化壳为例[J].地球科学,2016,41(12):2041-2060.
- [16] 李晓燕,蒋有录,陈涛.古风化壳孔隙与裂缝发育特征及其油气地质意义[J].地球科学与环境学报,2010,32(1):60-64,88.
- [17] 尚彦军,吴宏伟,曲永新,等.花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比:以香港九龙地区为例[J].地质科学,2001,36(3):279-294.
- [18] ARESHEV E G, DONG T L, SAN N T, et al. Reservoirs in fractured basement on the continental shelf of southern Vietnam[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1992, 15(4): 451-464.
- [19] ZHOU W J, YANG X Q, ZHOU Y Z, et al. Characteristics of magnetic susceptibility of granite weathering crust and their relationship with succession of ecologic environments in Xiaoliang Soil and Water Conservation Station, Guangdong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(1): 77-86.
- [20] 周杰,杨希冰,杨金海,等.琼东南盆地深水区中生界潜山裂缝发育特征及形成机理:以松南低凸起Y8区为例[J].中国海上油气,2020,32(3):1-9.
- [21] 张庆玉,陈利新,梁彬,等.轮古西地区前石炭纪古岩溶微地貌特征及刻画[J].海相油气地质,2012,17(4):23-26.
- [22] 王萍,袁向春,李江龙,等.塔河油田4区古地貌对储层分布的影响[J].石油与天然气地质,2011,32(3):382-387.
- [23] 李家强.层拉平方法在沉积前古地貌恢复中的应用:以济阳拗陷东营三角洲发育区为例[J].油气地球物理,2008,6(2):46-49.
- [24] 王敏芳,焦养泉,任建业,等.沉积盆地中古地貌恢复的方法与思路:以准噶尔盆地西山窑组沉积期为例[J].新疆地质,2006,24(3):326-330.
- [25] 吴丽艳,陈春强,江春明,等.浅谈中国油气勘探中的古地貌恢复技术[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(S4):25-26.
- [26] 龚洪林,姚清洲,敬兵.应用等时层序厚度比较法恢复古地貌:以塔中西部下奥陶统碳酸盐岩潜山为例[C]//中国石油学会物探专业委员会.中国石油学会2017年物探技术研讨会论文集,2017-04,天津:出版社不详,2017:938-941.
- [27] LI S T, ZHANG H F, WANG D Y, et al. Genetic type of oil-gas accumulation paleogeomorphology and favorable conditions for petroleum accumulation: taking the paleogeomorphology of pre-Jurassic in Shangliyuan area, Ordos Basin as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 962-969.
- [28] WU J, YANG H, XU D. Introduction to the recovery and technology of palaeogeomorphology in sedimentary basins[J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1073/1076(1): 2025-2030.
- [29] PENG S M. The geological characteristics and the prospecting criteria of the granite-weathering crust ion adsorption type Ree deposits in Nanling Area, South China[J]. *Materials Science Forum*, 1991, 70/72: 10.
- [30] LIU J Y, LIN S, CAI Z, et al. Palaeogeomorphology and its control on the development of sequence stratigraphy and depositional systems of the Early Silurian in the Tarim Basin[J]. *Petroleum Science*, 2010, 7(3): 311-322.

CALIBRATING THE BOTTOM INTERFACE OF GRANITE WEATHERING CRUST RESERVOIR ON THE SONGNAN LIFT IN THE DEEP WATER AREAS OF QIONGDONGNAN BASIN

QIU Yu, LI Anqi, ZHOU Jie, SONG Aixue, HU Bin

(Hainan Branch of CNOOC Limited, Haikou 570100, China)

Abstract: A great breakthrough has recently been made for oil and gas exploration in the weathering crust reservoir of granite buried hill on the Songnan low uplift in the deep-water areas of the Qiongdongnan Basin. One of the difficulties in seismic exploration for granite weathering crust reservoirs is the determination of reservoir bottom interface. Taking the weathering crust of pre-Paleogene granite in the deep water of the Qiongdongnan Basin as an object of study, and based on the integration of drilling wells, well logging and seismic data, this paper established a calibration model for determination of the bottom interface of the granite weathering crust reservoir. Forward seismic simulation method is adopted to define the relationship between the weathering crust reservoirs of granite with different thickness and seismic responses. Started from the study of the relationship between exposure time and weathering degree of buried hill, the palaeogeomorphology of buried hill of the granite is described with the impression method. On the palaeogeomorphological map, different exposure points are selected to calculate the two-way time interval for the corresponding weathering crust reservoir bottom interface relative to the top interface of the seismic profiles. Based on forward simulation, multi-point fitting analysis is carried out to gain the corresponding quantitative relationship. Finally, taking the top interface of the weathering crust reservoir as a reference, the bottom interface of the weathering crust reservoir and the quantitative time-thickness relationship of the weathering crust reservoir are obtained. Using the above method to calibrate the bottom interface of the buried hill reservoir, the prediction accuracy of the weathering crust reservoir of the granite buried hill will be highly improved.

Key words: weathering crust reservoir; forward modeling; impression method; palaeogeomorphology; Qiongdongnan Basin