

基于“四元致险”模型的地震导向钻井地质漏失风险层预测方法

陈帅¹, 袁三一^{1*}, 袁俊亮², 丁智强¹, 许言午¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100029

* 通信作者, yuansy@cup.edu.cn

收稿日期: 2025-03-07; 修回日期: 2025-05-18

国家自然科学基金“融合岩石物理- 钻井信息的海上深层钻井风险识别方法研究”(U24B2031)资助

摘要 钻井漏失作为钻井工程中最常见的复杂与事故类型之一, 其精准预测对保障油气资源的安全高效勘探开发具有重要意义。然而, 传统漏失风险预测方法依赖历史钻测井数据与经验分析, 欠缺对地质构造特征等关键地质风险要素的考虑, 存在预测滞后性与空间局限性, 难以满足复杂地层钻前预测需求。针对上述问题, 本文提出基于“四元致险”模型的地震导向钻井地质漏失风险预测方法。基于海上钻井典型区块的跨尺度数据, 融合测井、钻井与三维地震信息, 从地质统计与典型井分析入手, 系统揭示了断裂带、火山通道、岩性突变界面与异常高压地层 4 类主控致险因素, 构建了“四元致险”模型框架。进一步以地震信息为主导, 融合测井与钻井数据的约束机制, 提取多源敏感地震属性, 建立四类风险体的识别方法, 即通过多属性贝叶斯融合建立断裂带风险概率模型, 振幅-方差联合分析识别火山通道边界, 响应特征优选构建岩性界面敏感属性集, 结合孔隙压力反演实现异常高压层预测。渤海 A 区和南海 B 区的实际应用表明, 多口钻井钻前漏失风险预测与实际钻井过程中的风险事故吻合率较高, 其中成功预测渤海 H1 井 80% 漏失层位, 包括多个复合成因的漏失层, 瞬时漏速达 90 m³/h, 验证了该模型对复杂地层钻井风险的前瞻有效预测能力。总之, 研究成果构建了一套面向复杂构造区的地震导向的三维钻前漏失地质风险综合识别流程, 为井位部署、轨迹设计与钻井安全管理提供关键支撑。

关键词 钻井漏失; 地震导向钻井; 四元致险模型; 地震属性; 钻前预测; 地质体识别

中图分类号: P631.4; TE857.24

Seismic-guided prediction of geological lost circulation risk zones based on a “four-element hazard” model

CHEN Shuai¹, YUAN Sanyi¹, YUAN Junliang², DING Zhiqiang¹, XU Yanwu¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100029, China

引用格式: 陈帅, 袁三一, 袁俊亮, 丁智强, 许言午. 基于“四元致险”模型的地震导向钻井地质漏失风险层预测方法. 石油科学通报, 2025, 10(03): 478–495

CHEN Shuai, YUAN Sanyi, YUAN Junliang, DING Zhiqiang, XU Yanwu, JIANG Zhenxue, TANG Xianglu. Seismic-guided prediction of geological lost circulation risk zones based on a “four-element hazard” model. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(03): 478-495.

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.016

Received: 2025-03-07; Revised: 2025-05-18

Abstract Lost circulation is one of the most frequent and hazardous complications in drilling operations, and its accurate prediction plays a vital role in ensuring the safe and efficient exploration and development of hydrocarbon resources. However, conventional prediction methods largely rely on historical drilling and logging data combined with empirical analyses, while often neglecting critical geological risk elements such as structural features. These methods suffer from delayed predictions and limited spatial applicability, making them insufficient for pre-drilling risk assessment in complex geological environments. To address these challenges, this study proposes a seismic-guided prediction method for geological lost circulation risks based on a “four-element hazard” (FEH) model. Utilizing multi-scale data from representative offshore drilling blocks, the method integrates well-logging data, drilling parameters, and 3D seismic information. Through geological statistics and analysis of typical well sections, four major geological factors are identified as the primary triggers for lost circulation: fault zones, volcanic conduits, lithologic discontinuities, and abnormally overpressured formations. These factors form the foundation of the FEH model framework. Guided primarily by seismic data and constrained by well and drilling information, the method extracts multi-source sensitive seismic attributes to establish identification workflows for each of the four risk types. Specifically, a multi-attribute Bayesian fusion model is used to estimate fault-related risk probabilities; joint amplitude-variance analysis delineates the boundaries of volcanic conduits; lithologic interface indicators are optimized based on response features; and abnormal overpressure zones are predicted by integrating seismic velocity and pore pressure inversion. Field applications in the Bohai A Block and South China Sea B Block demonstrate strong consistency between predicted risk zones and actual lost circulation events. In particular, the model successfully forecasted 80% of the loss intervals in the Bohai H1 well, including several composite-origin zones, with a maximum instantaneous loss rate of 90 m³/h. These results validate the model’s capability for forward-looking and effective risk prediction in structurally complex formations. In summary, this research develops a three-dimensional, seismic-guided, pre-drilling risk identification workflow targeting structurally complex zones. The method provides essential technical support for well placement optimization, trajectory design, and proactive drilling risk management.

Keywords lost circulation; seismic-guided drilling; four-element hazard model; seismic attributes; pre-drilling prediction; geological body identification

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.016

0 引言

在油气资源勘探开发过程中，钻井工程作为获取地下油气资源的核心环节，长期面临复杂的技术挑战^[1-3]。钻井事故不仅造成巨额经济损失，更可能引发井喷失控、危险爆炸和环境污染等灾难性后果。其中，钻井漏失作为高发钻井复杂和事故类型，其成因涉及地质构造、工程参数等多维度因素^[4-6]。特别值得注意的是，地质条件作为漏失事故的根本诱因，其精准识别与风险防控已成为保障钻井安全的关键^[7-10]。

漏失机理的研究为钻井漏失的预防与控制提供了理论基础。国内外学者如徐同台^[11]、赵良孝^[12]、曾义金等^[13]，以及 Ozdemirtas^[14]、Shahri^[15]等，通过实验模拟、岩石物理分析与地震属性响应研究，探讨了地层漏失的主要控制因素与演化规律。Li^[16]、Guglielmi^[17]、Yong^[18]、邓金根^[19]、黄荣樽^[20]等则从井筒力学机制出发，分析井壁应力状态与裂缝扩展条件，提出了一系列井壁稳定与防漏控漏的技术对策。在钻井工艺参数优化方面，Zhang^[21]、Dupriest^[22]、Elmgerbi^[23]、Remmert^[24]、史玉升^[25]、樊洪海^[26]、崔猛^[27]等开展了钻头负荷控制、钻压设计、钻井液性能匹配等方法研

究，为减轻井漏风险提供了工程手段支持。近年来，针对漏失风险的主动预测问题，国内外研究者也提出了多种技术路径。Liu^[28]、卢运虎^[29]和聂臻等^[30]基于地震属性数据开展致险特征提取，建立了地震约束下的漏失风险预测模型；金衍^[31]和Pang^[32]等引入模糊数学理论，实现了多源数据下的漏失层位识别与分类判断；Ding 等^[33]和周长所等^[34]则基于裂缝网络建模方法，对裂缝分布概率进行量化分析，进一步推动了井漏风险的定量化表征与空间预测能力。

综上所述，尽管国内外学者围绕钻井漏失的成因机制与风险预测进行了广泛研究，涵盖了实验模拟、地震响应分析、地质建模与工程参数评估等多个方向，但目前尚未构建起系统表征多个不同地质主控因素与漏失风险之间关系的有效模型。现有方法多数依赖历史钻井与测井数据进行经验性推断，对地质构造特征等关键要素的考虑有所欠缺，难以满足复杂地层钻前漏失风险的预测需求。

针对上述问题，本文基于海上钻井典型区块的跨尺度数据，融合测井、钻井与三维地震信息，从地质统计与典型井分析入手，系统明确了断裂带、火山通道、岩性突变界面与异常高压地层 4 类主控致险因素，

构建了“四元致险”理论框架。进一步基于地震导向理念, 提取多源敏感地震属性, 建立 4 类风险体的识别方法。相较于井点数据, 发挥地震信息在覆盖范围、空间连续性和未钻区预测能力方面的显著优势, 最终构建适用于钻前的地质漏失风险综合预测流程, 为深水及构造复杂区井位优化提供技术支持。

1 漏失致险地质因素分析

1.1 研究区工程地质概况

渤海 A 研究区位于渤海湾盆地渤中凹陷西南部, 构造上受北北东向郯庐走滑断裂带与北西西向张蓬断裂带双重控制, 形成具有洼中隆特征的背斜构造带。区域地层自下而上可划分为基底太古界变质岩、古近系孔店组-沙河街组-东营组及新近系馆陶组-明化镇组(图 1)。其中, 太古界基底由混合花岗岩、片麻岩及碎裂岩组成, 岩石脆性强, 发育多期构造裂缝网络, 其中顶部风化壳溶蚀裂缝带与内幕裂缝带构成高角度裂缝密集区, 钻井过程中易引发井漏和井壁失稳; 古近系孔店组为冲积扇砾积砂砾岩沉积, 具有“富砂贫泥”特征, 砾石分选差且石英含量高(局部>70%), 岩石胶结疏松, 孔隙-裂缝双重介质发育; 沙河街组-东营组以辫状河三角洲及湖相砂泥岩互层为主, 泥岩层厚度大(常见单层厚度>50 m), 具强塑性变形特征, 在钻井过程中易引发缩径卡钻, 同时夹持的薄层砂岩, 常见厚度 2~5 m; 值得注意的是, 该层段发育多期受断层控制的火山通道相, 通道面积普遍小于 0.4 km², 垂向叠置, 通道内部充填玄武岩-安山岩-凝灰岩多期次组合, 周缘发育放射状/环状裂缝系统。新近系馆陶组辫状河砂砾岩渗透性强, 明化镇组曲流河砂泥岩互层段存在高压异常(压力系数 1.2~1.4)。研究区受多期构造叠加改造, 古近系-新近系发育走滑-伸展复合断裂系统, 同时, 高角度走滑断层与基底断裂耦合形成中心-裂隙复合式火山喷发体系, 地层厚度突变和井轨迹穿行时的扭矩异常, 进一步加剧了地层岩性和结构的复杂性, 这在钻井过程中频繁引发了严重的井漏等事故。

南海 B 工区位于琼东南盆地乐东凹陷东北缘, 属南海北部陆架深水区, 构造上处于中央峡谷带的西段拐折区。主要目标层为中新统黄流组砂岩储层, 地层自上而下呈深水沉积-近岸过渡相特征。该区已钻井揭示, 在下伏梅山组异常高压系统的驱动下, 黄流组呈现明显的过压特征, 地层孔隙压力系数普遍超过 1.7, 远高于上覆泥岩层 1.36 的背景压力, 压力梯度突

变对井筒稳定构成显著威胁。高压地层导致井壁应力状态高度复杂, 局部构造应力叠加进一步增强了裂缝传播倾向, 引发多起井漏、溢流和提前完钻事故, 严重制约了目标层的有效钻达。同时, 该区属典型深水钻探区, 平均水深约 800 m, 目标层内多期叠置水道体系发育, 构造扰动频繁, 地震速度横向变化剧烈。由于已钻井点位分布稀疏且构造解析精度有限, 导致钻前地质风险识别难度大、预测误差高, 是典型的高压高风险区段。

此外, 除地质构造与岩性因素外, 钻井过程中所采用的工程参数与工艺同样对井漏、井塌等风险的诱

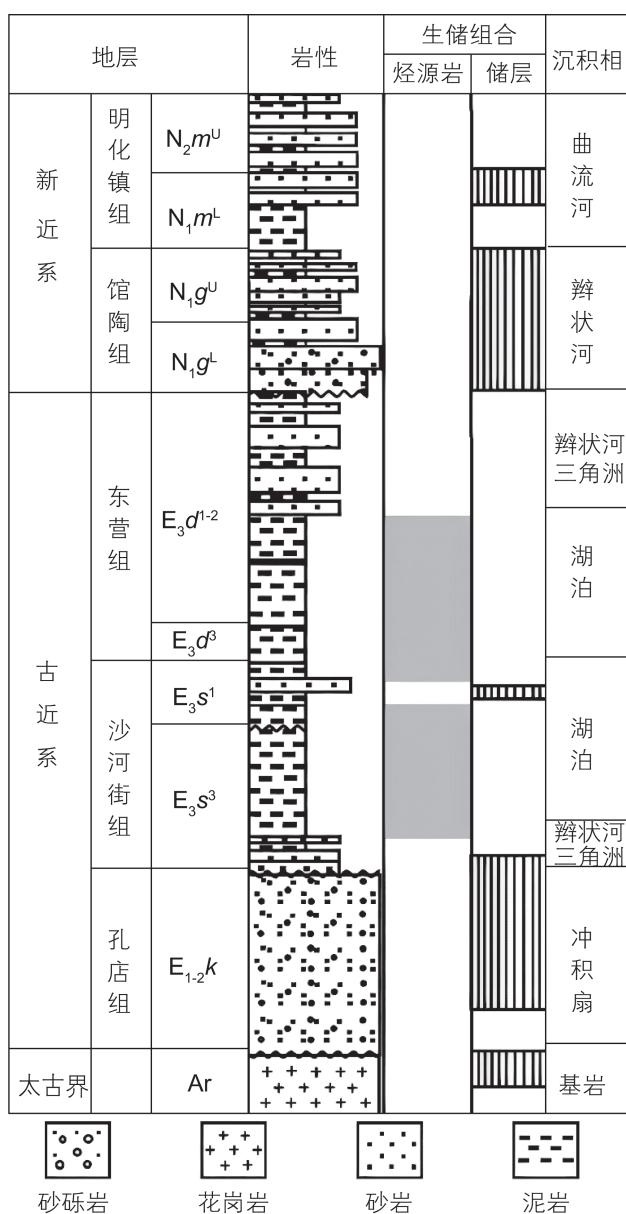


图 1 渤海 A 研究区地层综合柱状简图

Fig. 1 Integrated stratigraphic column of the Bohai A study area

发起到重要作用。两研究区所采用的钻井工艺虽有所差异，但均反映出工程因素在致险过程中的调控作用。在渤海A工区，多数井采用水基钻井液和分级密度窗口设计的组合工艺，通过动态调整泥浆密度及流变性实现对不同层段压力窗口的匹配。对于高风险段裂缝带，通常辅以高黏低滤失体系或堵漏性封堵泥浆进行预防性处理^[35~37]。在南海B工区，考虑到深水作业环境与异常高压背景，普遍采用控压钻井联合高性能泥浆体系相结合的方式进行压力窗口管理，同时提前部署泄压防喷器及环空压力监测系统，在钻遇异常高压时联动调整立管背压以抑制溢流风险^[38~39]。这些工程技术背景为本研究聚焦的“地质主控因素分析与预测”提供了边界条件支撑。

1.2 四元致险地质主控因素分析

为系统厘清海上钻井过程中的地质致险机制，本文选取渤海与南海两个典型海域工区，汇集分析了共计28口探井与8口开发井的地质与工程数据，开展多源数据预处理、标准化以及时深标定等数据准备工作。在所调查的36口井中，共有23口井记录发生漏失事件，累计识别出83处漏失点。经归纳统计发现(图2)，这些漏失点在不同地质环境中呈现出明显的聚集规律：约40%集中分布于断裂发育区，特别是断裂交汇或密集带；约20%位于厚泥夹砂薄层内，岩性突变与力学差异显著；另有约1/8漏失事件发生在泥岩—砂砾岩、沙泥岩—花岗岩等岩性突变界面；约1/9漏失点则与火山岩体相关，反映出其构造边界的致险特性；此外，另有5处漏失事件直接与异常高压地层相关。以上统计表明，断裂带、火山通道、岩性界面与异常高压地层是当前钻井漏失的主要地质诱因，构成本文提出的“四元致险”核心构架。

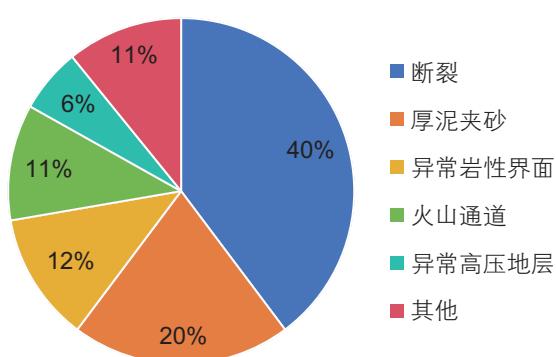


图2 各类致险因素相关漏失点的统计分布图

Fig. 2 Statistical distribution of lost circulation points associated with different risk factors

1.2.1 断裂带

统计数据显示，共有31处漏失点与断裂构造密切相关，占总漏失点的比重最高。断裂带内的岩石通常呈现出高度破碎的状态，地层完整性遭到破坏，钻井液容易沿着破碎的岩石缝隙进入地层，从而引发漏失。同时，断裂的存在会导致周围地层应力分布发生改变，应力集中区域，地层岩石更容易发生破裂和变形，增加了钻井过程中井壁失稳和漏失的风险^[40]。

以典型井W1井为例，在钻井过程中，当钻至3044 m和3065 m深度的沙泥岩地层时，先后发生两次严重漏失事件，瞬时漏速分别高达60 m³/h和90 m³/h。首次漏失发生于四开钻进至3044 m期间，当时钻压为3~5 t，泵排量3900~4000 L/min，泵压21~23 MPa，转速50~60 r/min。现场监测到返出量突然减少、泵压下降约2 MPa，循环池液面快速下降，环空失返后通过灌注海水16 m³才见液面。第二次漏失发生在继续钻进至3065~3066 m期间，此时钻压为3~6 t，排量2500~2800 L/min，泵压10~19 MPa，漏速进一步上升至90 m³/h。图3所示综合录井数据表明，漏失位置处的钻时曲线呈现出快速下降且波动剧烈的特征，这一典型的响应特征通常是由断裂位置处不连续地层的交替所导致^[41]。同时，图中展示了该漏失层位井周的地震相干属性剖面，从黄色箭头所指示的位置可以明显观察到横向延展的弱相干条带，揭示出典型的断裂响应特征，与W1井漏失深度高度吻合。

如图4所示，W1井漏失点处电成像图像中，断裂带表现为高导电性带状特征(图中红色弧线所示)，对应区域裂缝密集发育，形成交错连通的裂缝网络。这一结构不仅显著削弱了地层围压承载能力，也为钻井液沿裂缝系统的快速运移提供了通道，是诱发大规模漏失事故的直接地质原因。

1.2.2 火山通道

根据工区内28口井的录井统计分析，共记录有113处火山岩段地层，约占岩性的1%，尽管占比较低，但火山岩段中的漏失事件却高达12处，占火山岩段总数的约11%，显著高于其他岩性单元。其中，火山通道区域通常由火山碎屑岩或高硬度火成岩(如安山岩、玄武岩等)构成，岩体完整性较强但脆性高，周缘则常形成构造挤压下的裂缝发育带，具备高漏失风险^[42]。

以典型井W2为例，在三开过程中先后钻遇多段火成岩层，至3022 m深度时发生严重井漏，瞬时漏速高达30 m³/h。事发段位于一套火山碎屑岩—安山岩夹层中，钻井参数为钻压4~6 t，排量3200~3500 L/min，

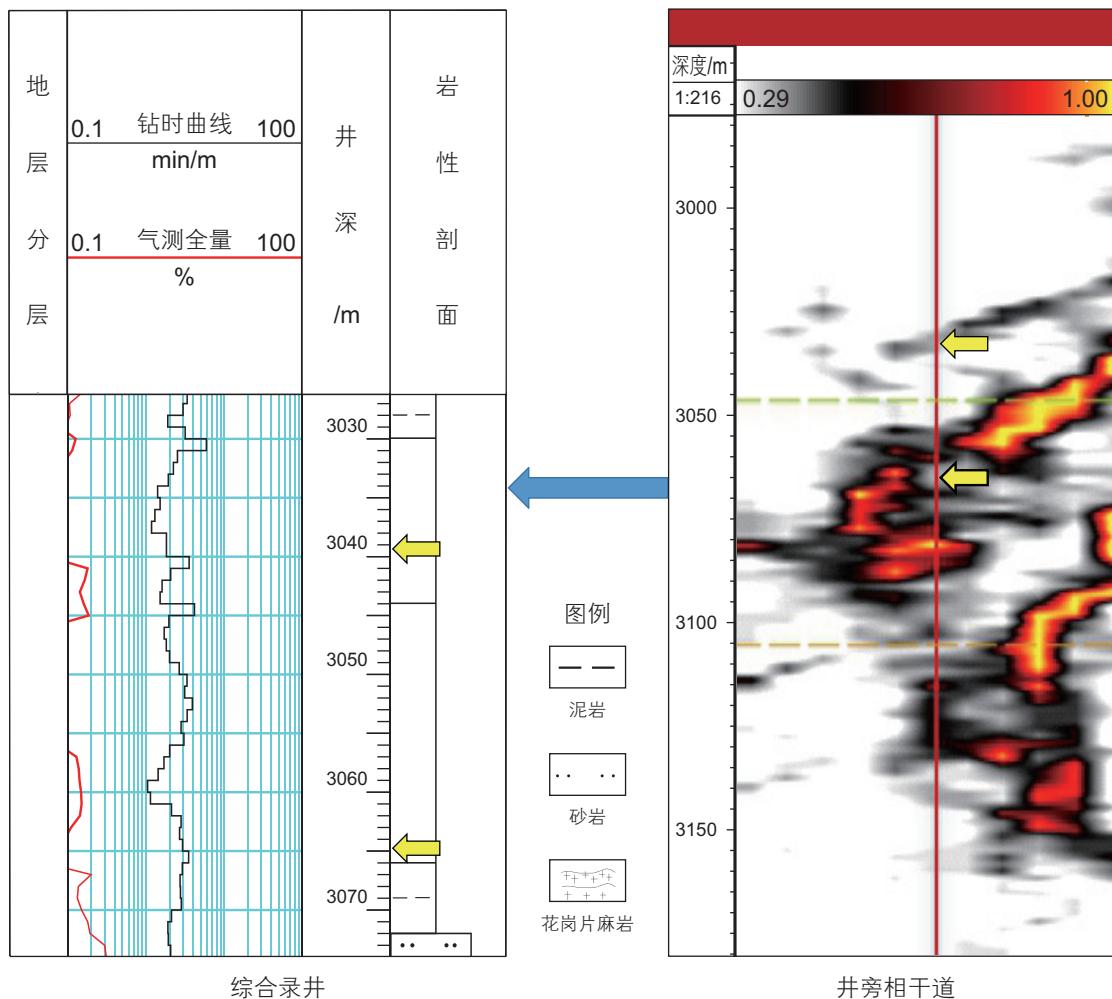


图 3 W1 井漏失点处断裂特征

Fig. 3 Fracture characteristics at lost circulation points of Well W1

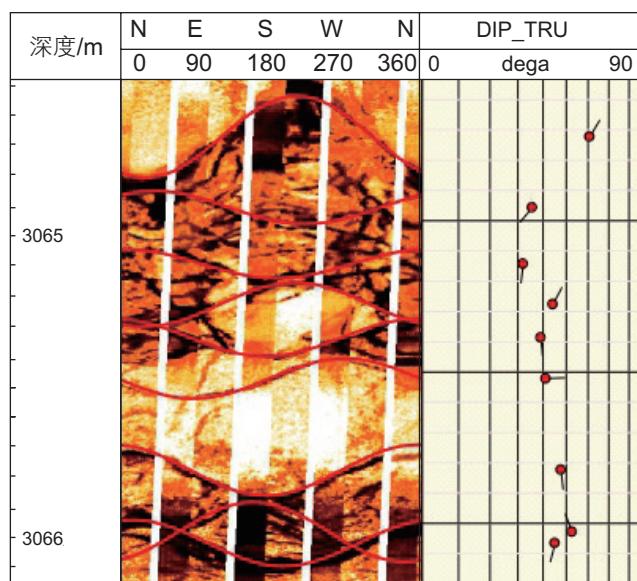


图 4 W1 井漏失点电成像测井响应及裂缝发育特征示意图

Fig. 4 Electrical imaging logging response and schematic of fracture development at the lost circulation point of Well W1

泵压 18~21 MPa, 转速 55 r/min, 扭矩 9~12 kN·m。钻进过程中突然出现返出量骤减、循环池液面快速下降, 判断为漏失所致。随即采取停泵、提钻、减排量和封堵材料处理等应急措施, 初步控制了漏失扩展, 累积漏失量达 210 m³。

如图 5 所示, W2 井穿越的该段地震剖面表现出典型的火山通道地震响应特征(图中黄色箭头): 该通道呈近直立状, 自下而上逐渐发散, 内部为弱振幅、杂乱反射带, 显著打断周围层状地震反射, 其底部与深部断裂构造相连, 反映出垂向贯穿的火山岩供源通道。过井地震切片图像中, 该区呈现出环状反射衰减特征, 与围岩存在明显不整合接触, 且反射连续性极差, 指示出复杂的非均质结构。

如图 6 所示, 火山通道往往呈垂向贯穿特征, 可跨越多个地层单元, 其形成过程伴随着剧烈的岩浆侵位与构造变形, 导致通道周缘地质结构复杂、岩石破碎程度高。该区域岩体常具有较高的孔隙度与渗透率,

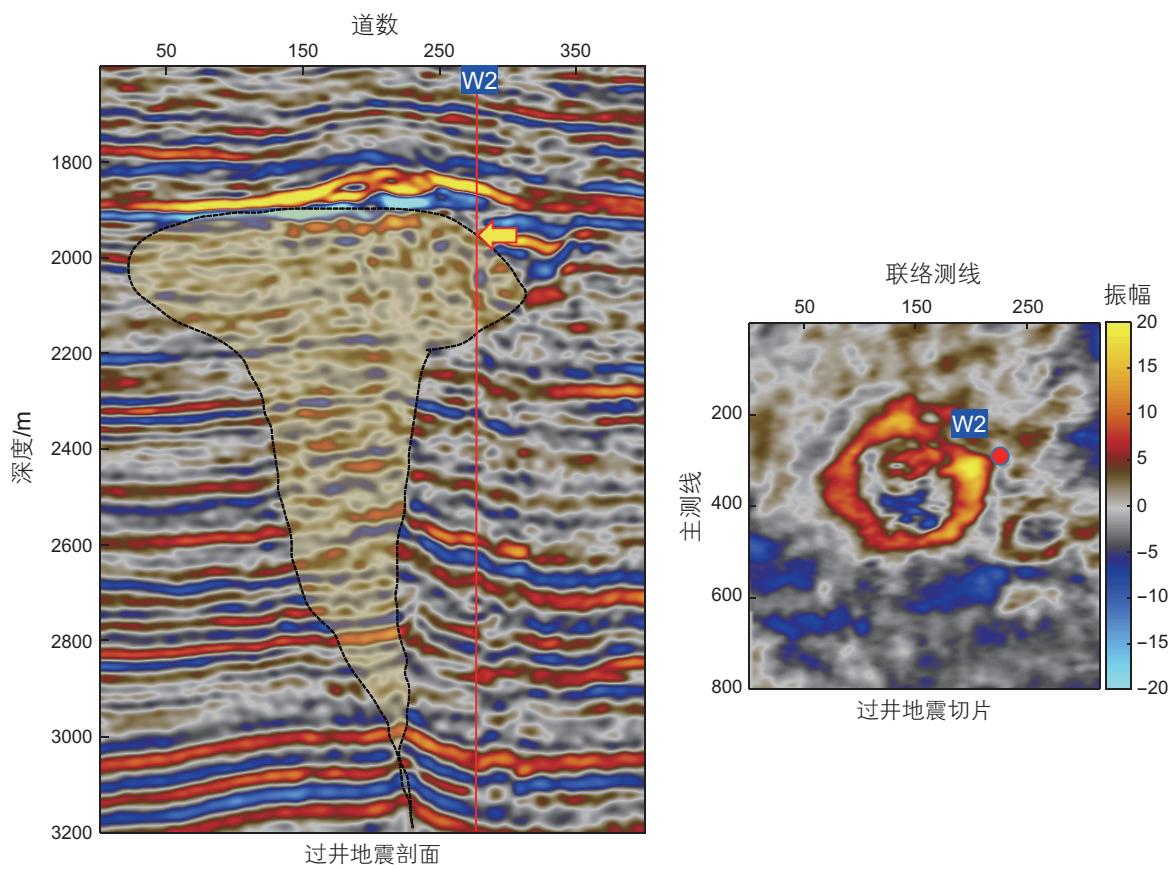


图 5 火山通道的典型地震响应特征

Fig. 5 Typical seismic response characteristics of a volcanic conduit

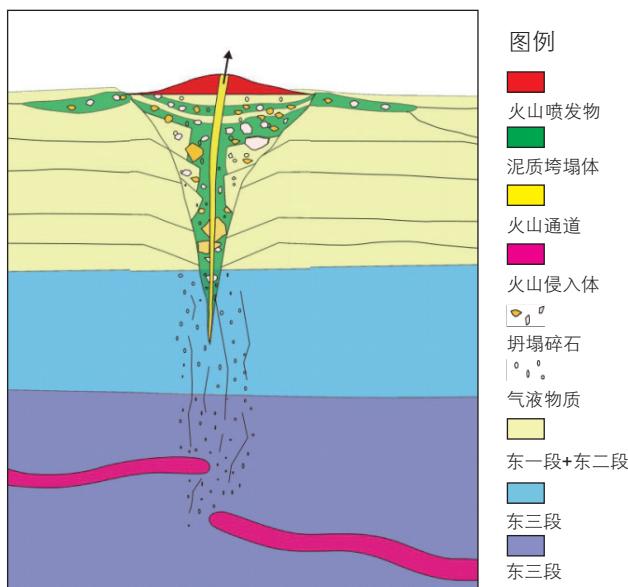


图 6 典型火山通道结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of a typical volcanic conduit structure

为钻井液渗流提供了有利的运移通道，显著提升了漏失风险^[43]。另一方面，火山通道内部广泛分布高硬

度、低孔隙率的火成岩，与周围沉积岩之间构成明显的岩性突变界面，易形成局部应力集中区，诱发裂缝发育。这些裂缝一旦与断裂系统连通，将进一步加剧井壁稳定性破坏和环空流体失控的风险，是钻井过程中需要重点识别与避让的高致险构造单元。

1.2.3 岩性界面

根据工区的统计分析，工区 79 处漏失点中有 21 处在区域岩性界面相关，其中 11 处漏失点发生在厚泥夹砂层段，10 处漏失点出现在泥岩-砂砾岩、沙泥岩-花岗岩等的异常岩性界面处。以典型井 W3 井为例，四开钻进至 3895 m 深度钻遇厚泥岩段中的薄砂体，厚度仅为 3 m 左右，发生漏失事件，瞬时漏速达 20 m³/h。钻井参数为：钻压 8~12 t、排量 1600~2000 L/min、泵压 11~18 MPa、转速 90~120 r/min、扭矩 9~14 kN·m，背景气显示 2.1%~6.6%。应急期间，逐步下调排量至 1681 L/min，液面趋于稳定，后恢复正常钻进。如图 7 所示，W3 综合录井图中，该段钻时曲线突降，结合岩性录井显示该层段为典型“厚泥夹砂”构型，岩性突变导致的应力重分布可能诱发薄层砂体破裂，进而发生漏失。

另一典型井 W4 在钻至 4245 m 深度过程中频繁出现遇阻与蹩扭矩现象，钻遇泥岩-花岗岩界面后突发漏失，监测瞬时漏速达 30 m³/h。钻井过程中采用排量 1900~2200 L/min、钻压 10~14 t、泵压 13~20 MPa、转速 85~110 r/min、扭矩 12~18 kN·m，现场通过阶段性减排量和泥浆调控实现漏失缓解。如图 8 所示，在 W4 井综合录井图中，岩性界面处钻时曲线波动显著，钻速突然降低，指示该位置发生了显著的岩性突变。该界面花岗岩刚性强、孔隙度低，与上覆塑性泥岩形成强烈力学反差，极易在钻遇时引发局部应力集中与井壁破裂，从而诱发结构性井漏。该案例进一步表明，泥岩-基底岩接触带是钻井过程中不可忽视的重要风险界面。

岩性界面通常是不同岩石类型的接触带，在钻井过程中，岩性界面在外界载荷作用下容易形成滑移面或扩展裂缝，为钻井液提供直接通道。以厚泥夹砂模型为例^[44]，如图 9 中显示，厚泥夹砂层模型的应力强度和应变强度随深度呈现出显著的分异特征。在应力强度图中，泥岩层的应力强度较低，而砂体段的应力强度相对较高。然而，薄砂体厚度的限制使其整体承载能力较弱，易在外力作用下发生破裂。在应变强度

曲线上，泥岩表现出较高的应变强度，具有一定塑性，而砂体其应变强度较低，在应力集中区域易出现脆性破裂。这些特性使得泥岩与薄砂体的交界处成为应变不匹配的高风险区域，进而形成井漏的主要通道。

1.2.4 异常高压地层

在南海 B 工区，根据 8 口井统计分析，异常高压地层共导致 5 次钻井漏失，主要集中在莺歌海组二段以及黄流组的高压泥岩层段。以典型井 W5 井为例，根据钻完井报告，W5 井在钻进至黄流组 4068 m 深度时，钻遇异常高压泥岩层，导致地层气体入侵井筒，发生溢流。现场立即采取停钻、上提钻具、停泵并关井等控制措施。EKD 系统监测到返出流量快速增加，活动池液面快速上升，记录溢流量约为 15 bbl。关井过程中套压迅速升至 1350 psi 后下降至 1070 psi，经检查井控设备正常。然而，由于关井操作引发了井筒内部剧烈的压力波动，致使井壁破裂，进而诱发严重漏失事故，瞬时漏失速率极高，最终被迫停钻。从 W5 井综合录井图（图 10）中发现，在漏失点（图 10 中黄色箭头）上部确为大套泥岩，在 4062 m 位置气测曲线激增与钻时下降，表明钻遇高压气层，后续在 4068 m

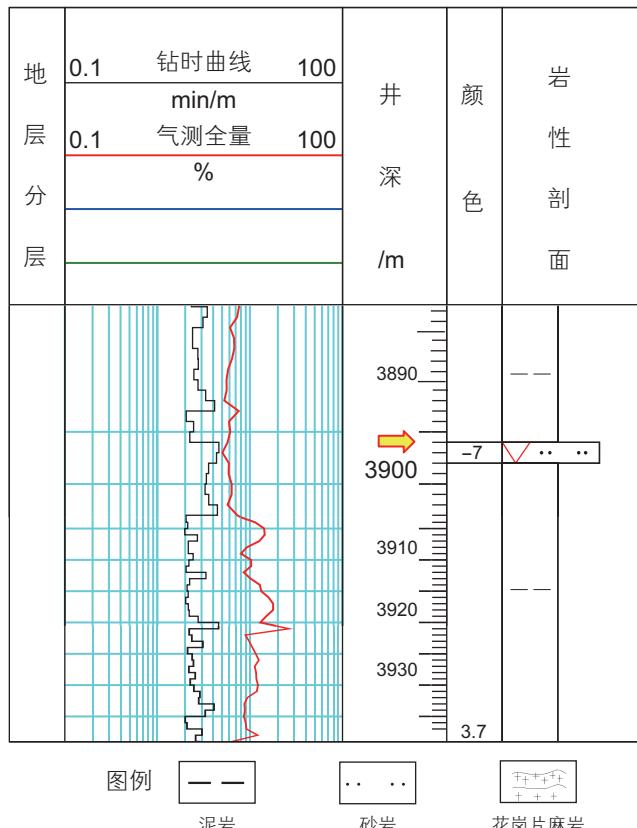


图 7 W3 井厚泥夹砂漏失层段的综合录井图

Fig. 7 Comprehensive mud logging chart of the lost circulation interval in thick mudstone interbedded with sandstone in Well W3

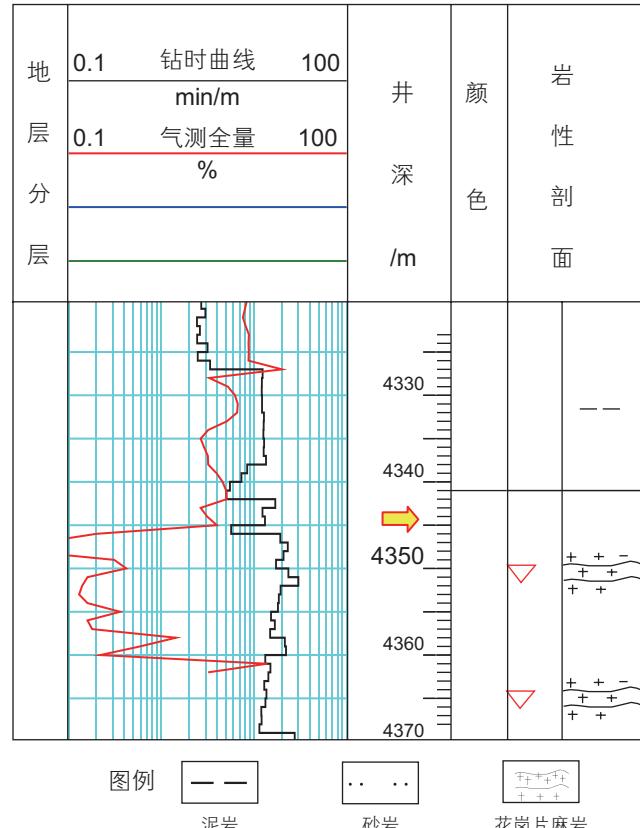


图 8 W4 井岩性界面漏失层段的综合录井图

Fig. 8 Comprehensive mud logging chart of the lithologic interface-related lost circulation interval in Well W4

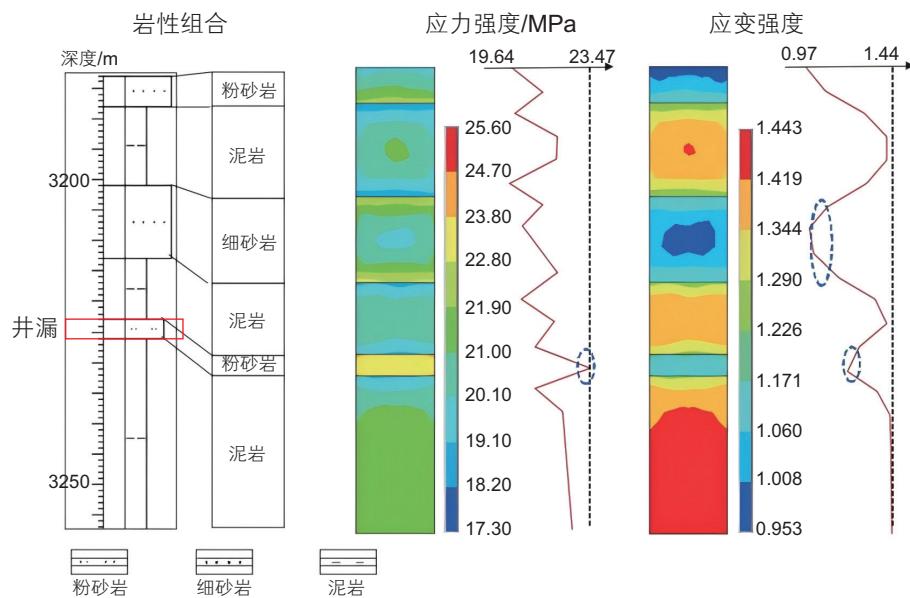
图 9 厚泥夹薄砂层段应力–应变与井漏关系图(改编自邓津辉等^[44])

Fig. 9 Relationship diagram between stress–strain and well leakage in thick mudstone interbedded with thin sandstone (modified from Deng et al^[44])

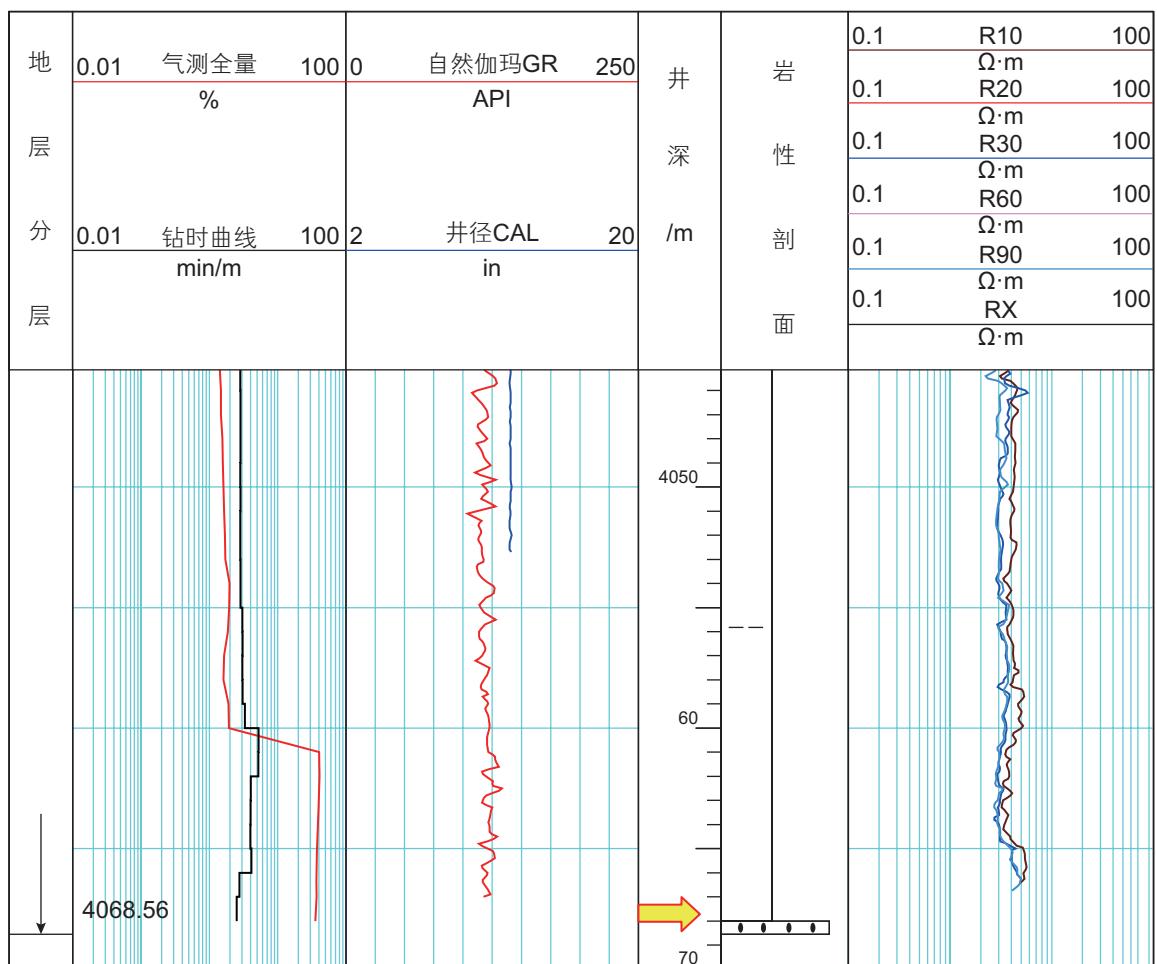


图 10 W5 井异常高压致漏层段的综合录井图

Fig. 10 Comprehensive mud logging chart of the lost circulation interval induced by abnormal overpressure in Well W5

由于严重漏失事故停钻。

异常高压层具有显著的压力梯度差异，容易造成井筒与地层之间的压力失衡。当井筒压力不足以有效抵抗地层压力时，易发生地层流体入侵井筒，导致溢流。随后，为控制溢流而进行的关井操作，会引起井筒压力急剧上升，当井筒压力超过地层破裂压力时，极易诱发新裂缝的扩展和地层破裂，形成钻井液快速渗漏通道，进一步加剧漏失事故。

综上所述，基于南海与渤海两个工区共 36 口井的事故统计、典型井段实证剖析及地震属性响应特征的系统分析，本文提出并构建了面向钻井风险识别的“四元致险”模型框架。该框架将钻井过程中最常诱发复杂工况的关键地质因素归纳为四类主控致险单元：断裂带、火山通道、岩性突变界面与异常高压地层。研究表明，上述因素在构造分布、岩性组合与力学响应上均呈现显著的非均质性特征，且在钻井扰动、压力失衡及流体耦合等作用下，具备高度叠加性与触发敏感性，是导致钻井漏失等复杂事件发生的根本地质诱因。该模型的提出为后续开展可解释性强、可推广性高的地震导向致险体识别方法提供了理论基础与应用支撑。

2 地震导向的四元致险体识别方法

2.1 断裂带风险层识别方法

在钻井工程作业前，准确识别断裂带分布是保障钻井安全的关键步骤。针对地震资料中断裂响应特征弱、噪声干扰大的问题，本研究提出基于多属性贝叶斯加权融合的断裂风险概率建模方法^[45]。通过集成不同地球物理响应机理的地震属性，构建抗噪性强、多角度高维集成预测的断裂风险概率模型。

首先，依据断裂在不同地震属性上的异质响应特性，优选出第三代相干体(刻画断裂面不连续特征)、最大曲率(量化地层挠曲变形强度)、导向相位(追踪断裂带相位错动)及地层倾角(反映构造应力场方向)，构建正交化的多属性特征空间，能够从不同角度表征地震资料中的断裂带特征。

其次，对所有属性数据进行归一化处理，消除不同量纲和取值范围带来的影响，确保不同尺度数据在概率融合中的贡献均衡性。

在此基础上，本研究以电成像测井解释成果为断裂标定样本，构建“断裂-属性”训练集，在贝叶斯框架下以各单一属性对断裂发育的响应程度作为先验信息，计算断裂存在的后验概率 $P(F|A)$ ，其计算公式为：

$$P(F|A) = \frac{\prod_{i=1}^n P(A_i|F)P(F)}{\prod_{i=1}^n P(A_i)} \quad (1)$$

式中， $P(F|A)$ 为联合多属性条件下断裂存在的空间概率分布； $P(F)$ 为断裂带存在的先验概率， $P(A_i|F)$ 为单属性似然概率。

贝叶斯融合算法的实现基于概率框架的层次化建模。首先，通过工区已知断裂样本的标定，建立各属性与断裂发育的统计关联模型，量化单一属性对断裂存在的支持程度；其次，引入自适应权重系数反映不同属性在特定地质背景下的贡献差异，例如在构造活跃区强化曲率属性的权重，在岩性突变区提升相位属性的重要性；最终，通过贝叶斯公式将多属性似然概率与先验地质概率融合，计算断裂存在的综合后验概率。这种数据驱动与知识驱动相结合的机制，既避免了传统经验加权法的主观性缺陷，又保留了地质规律对模型的空间约束作用，显著提升了复杂断裂系统的识别精度与工程适用性。

2.2 火山通道风险层识别方法

在钻井工程中，火山通道是引发井壁失稳和钻井液漏失事故的重要地质单元，尤其在海域高压、复杂构造区，其空间产状难以准确掌握，常导致钻遇高硬度岩体或破碎岩带，引发严重安全风险。因此，在钻前阶段开展基于地震资料的火山通道识别工作，对于提前规避地质风险、优化钻井轨迹具有重要意义。

本研究基于火山通道的地质特征和典型响应规律，从地震数据中提取多种敏感属性开展识别建模。综合考虑火山通道的反射特性、结构连续性和构造扰动，初选了 8 种常见的敏感属性，包括原始振幅、最大振幅、均方根振幅、反射强度、相对波阻抗、方差属性、倾角属性和蚂蚁体属性(图 11)。针对不同火山岩相与产状特征，分别评估这些属性在剖面和切片上的响应表现，最终选取均方根振幅与方差属性作为联合识别的核心指标。

均方根振幅可量化一定时间窗内地震信号的能量累积，能够有效反映火山通道与周围沉积地层在反射强度上的差异，特别是在高能量通道体附近呈现出持续增强的高值区。方差属性则利用相邻道之间振幅与相位的变化程度，揭示反射轴的连续性扰动，对破碎构造、岩性突变等横向非一致性特征具有显著响应。在火山通道发育区域，方差值往往显著升高，特别是在时间切片中常表现为环状或条带状高值异常区，能

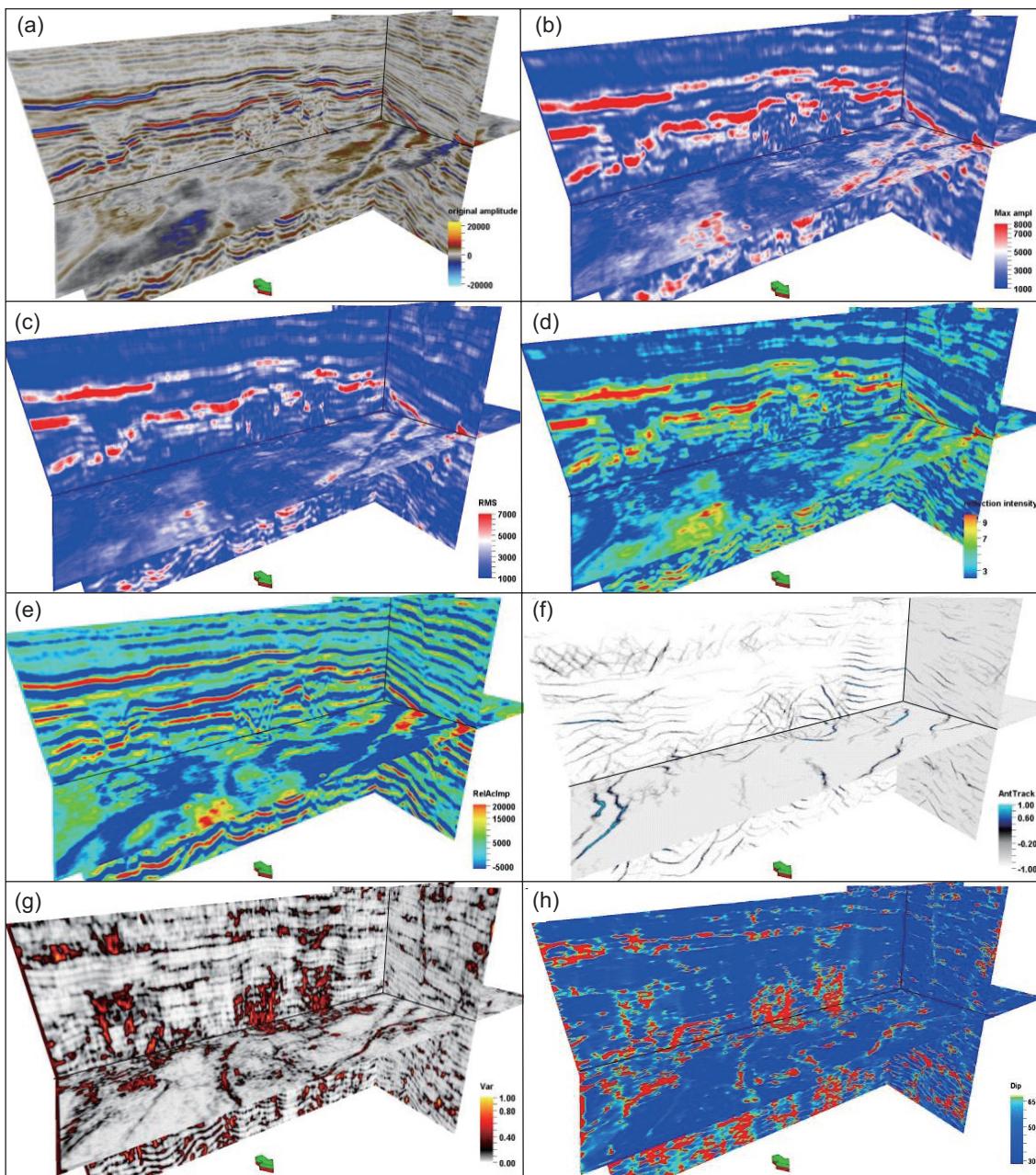


图 11 渤海 A 工区多种地震属性体 (a) 原始振幅属性; (b) 最大振幅属性; (c) 均方根振幅属性; (d) 反射强度属性; (e) 相对波阻抗属性; (f) 蚂蚁体属性; (g) 方差属性; (h) 倾角属性

Fig. 11 Multiple seismic attribute volumes in the Bohai A block (a) original amplitude attribute (b) maximum amplitude attribute (c) root mean square amplitude attribute (d) reflection strength attribute (e) relative acoustic impedance attribute; (f) ant-tracking attribute; (g) variance attribute; (h) dip angle attribute

够有效圈定通道边界。

在综合敏感性分析的基础上,本研究构建了以均方根振幅与方差属性融合的火山通道识别流程。首先,在完成地震数据标准化处理后,分别提取两类属性剖面与切片图像,并进行噪声压制和平滑处理。其次,通过定性分析与定量对比,识别出在火山通道典型发育位置同时具备“高振幅+高方差”双重特征的区域。最后,结合结构一致性约束,对这些复合异常区进行

边界跟踪与三维空间建模,形成火山通道风险体的初步预测结果。

2.3 岩性界面风险层识别方法

在钻井工程中,传统地层预测方法普遍依赖邻井资料进行经验性外推,其预测精度受限于井距稀疏及地层横向非均质性的影响,难以准确刻画未钻区域岩性界面的空间变异特征。特别是在构造起伏大的复杂

构造区，地层突变剧烈，传统测录井曲线的延拓方法往往出现系统性偏差。而基于区域地质规律构建的宏观岩性模型，虽具备整体结构指导意义，但缺乏对局部岩性界面精细定位的能力，易在钻遇突变岩性界面时引发井漏等工程风险。

为提升复杂区域钻前岩性界面的预测精度，本研究引入地震属性分析方法，尝试将地球物理响应特征转化为岩性突变的空间识别指标，构建面向钻前风险预测的地球物理支撑体系。在方法设计上，基于地震波在穿越岩性突变界面过程中在振幅、频率、相位及波形等特征上的响应机制，初步筛选出 6 种关键敏感属性：均方根振幅、相对阻抗、波形变化率、包络、甜点和主频。随后，通过地震多属性交会分析(图 12a)构建了岩性分类特征簇，识别各类岩性单元在多属性空间中的分布特征。为进一步提升属性识别能力并减少冗余信息干扰，本研究对原始属性集进行分析与优选，通过地震属性热力相关性矩阵(图 12b)，揭示了各属性之间的相关程度和信息冗余特性。最终提取出对岩性界面变化最具响应能力的 3 类核心属性：纵波阻抗、波形变化率与主频。

2.4 异常高压风险层识别方法

在海域复杂构造区，异常高压地层是钻井过程中井喷、井漏及井壁失稳等复杂事故的重要诱因，准确识别其空间分布特征对于保障钻井作业安全具有重要意义。异常高压常由快速沉积、欠压实、致密盖层封闭等地质

过程叠加形成，表现为高孔隙度、高流体饱和度与低渗透性的组合特征。以本研究所处的南海 B 工区为例，地层以泥岩为主，压实不足是形成高压的主要原因，因此具备典型的欠压实型异常高压地质背景。

在地震波传播过程中，高压地层的低压实性和高含液性会引起声学阻抗降低、速度减缓、反射增强等一系列响应，从而导致特定地震属性发生异常变化^[46]。均方根振幅作为波形能量累积的指标，在高压地层中通常呈现明显的高幅值响应；而甜点属性由振幅与主频比构成，对波形扰动与非均质性变化高度敏感，可用于捕捉由地层高压流体异常。因此，二者联合可作为识别异常高压层的重要敏感属性。

为实现地层压力的定量预测与反演，本文进一步引入了经典的伊顿法(Eaton Method)^[47]。该方法利用实测地震波速与正常压实趋势之间的偏差，计算孔隙压効率变化，已成为目前工程应用中最为广泛使用的经验模型之一。其具有计算简便、物理意义清晰、适用性强等特点，尤其适用于本工区以泥岩为主的欠压实成因场景。

具体实施流程如下：首先提取均方根振幅和甜点属性体，在剖面与时间切片中识别同步响应的高异常区作为潜在高压候选层；其次，基于地震反演速度体建立伊顿法孔隙压効率剖面，并对候选层进行定量验证；最后，通过将属性异常区与压力异常区叠合分析，建立多源约束下的高压识别模型，实现异常高压性风险层的空间定位。

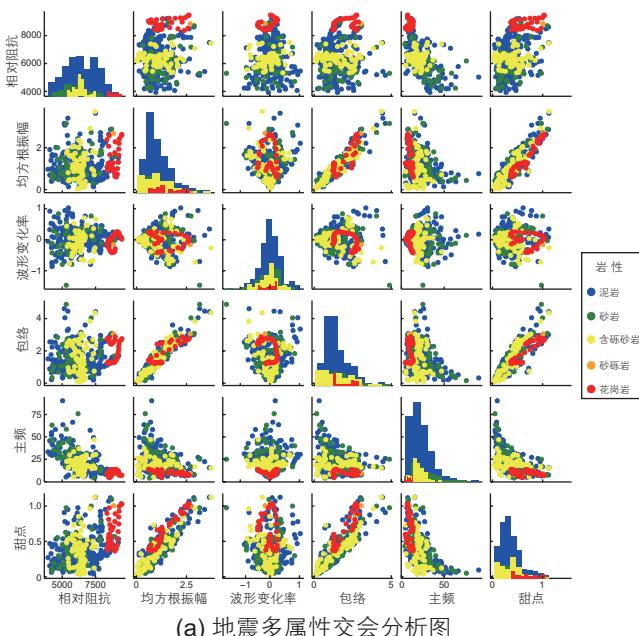
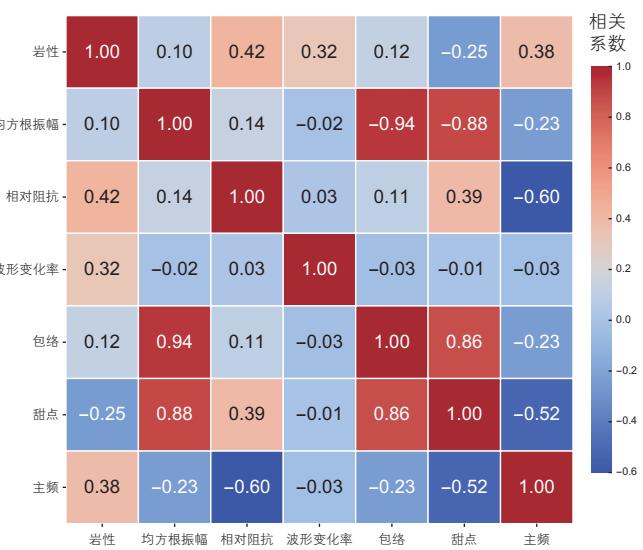


图 12 岩性界面敏感属性优选图

Fig. 12 Sensitive attribute selection for lithologic interfaces



3 应用案例分析

3.1 单一地质漏失风险层预测

(1) 断裂带风险层识别结果

以W6井为例, 基于该井周边电成像测井(FMI)解释成果, 共提取449条经滤波处理后的裂缝富集区作为断裂带的正样本标签, 结合相应井点周围的地震属性数据构建“测井-地震”联合训练集。每个裂缝带标签对应提取井点为中心、半径500 m范围内的四类典型断裂敏感属性数据, 分别为第三代相干体、最大曲率、导向相位与地层倾角, 以构建“断裂-属性”响应样本库。训练集中包含449组正样本与920组背景非断裂样本, 通过监督学习优化贝叶斯融合权重, 实现多属性对断裂发育概率的联合表达。通过监督学习机制优化贝叶斯权重系数, 确定各属性贡献权重为相干体(0.38)、最大曲率(0.27)、导向相位(0.22)及地层倾角(0.13), 确保训练集预测结果与FMI断裂位置的空间重合度达85%以上。

如图13所示, 从左往右依次展示了W6井抽取井旁相干、曲率、相位与倾角的属性结果, 以及计算得到断裂风险概率值。可以看到, 在3100~3150 m深度段, 相干体值出现突下降, 最大曲率出现局部异常, 相位剖面出现相位突变带和地层倾角异常区, 呈现多属性空间耦合断裂特征, 且该处多属性融合后断裂风险概率值最高达到0.87, 则判断该处有较高的漏失风险。经验证, 该时段后期实钻过程中出现钻井液漏失, 瞬时漏速最高达25.6 m³/h。

(2) 火山通道风险层识别结果

图14呈现了W7井周边火山通道的均方根振幅与

方差属性结果。从均方根振幅属性剖面(图14a)来看, 在W7井轨迹在2635 m处穿越一段振幅显著增强的异常高值区, 表明该位置存在较强的反射能量聚集, 可能对应火山通道或岩性突变体。对应位置的方差属性剖面(图14b)显示出明显的高方差响应, 揭示地震波场在该区间存在显著的不连续性和结构扰动, 进一步支持火山构造异常的判断, 二者共同勾勒出了火山通

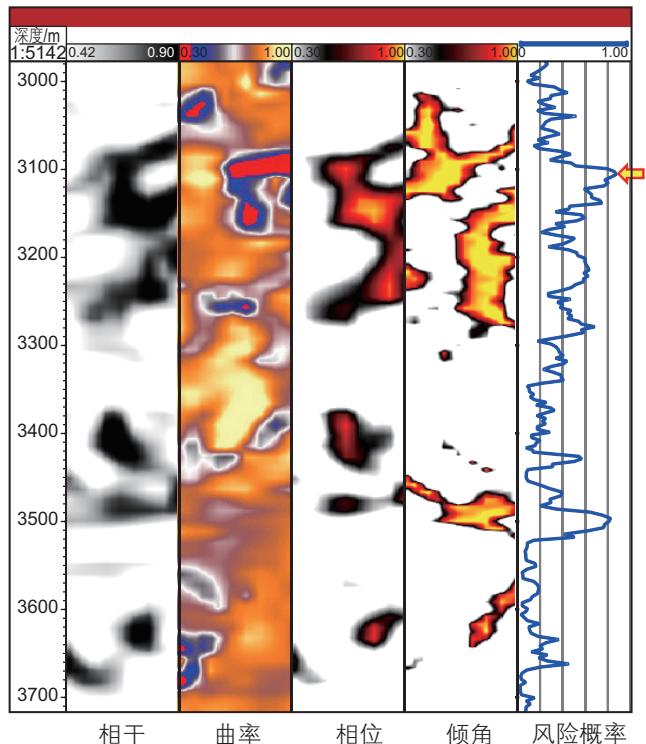


图13 W6井周多属性断裂风险识别结果

Fig. 13 Results of multi-attribute fracture risk identification around well W6

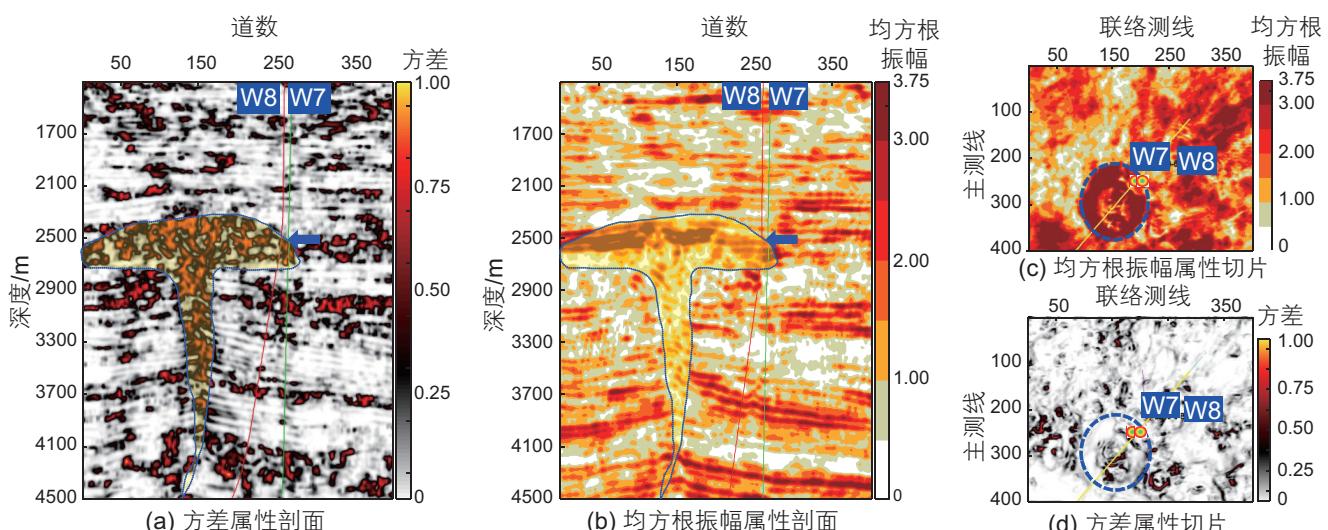


图14 W7和W8井周火山通道风险识别图

Fig. 14 Volcanic conduit risk identification around wells W7 and W8

道的边界(以蓝色虚线标识)。同时,在两者的属性切片(图 14c、图 14d)上,均呈现出近圆形或环状的高值异常分布区,空间轮廓清晰,火山通道构造特征显著结合剖面与切片的综合约束分析,W7 井设计轨迹在 2635~2810 m 段(蓝色箭头)穿越火山通道边缘碎裂带,具备高漏失风险特征,属典型的钻前风险层位。

(3) 岩性界面风险层识别结果

如图 15 所示,W9 井在两类典型岩性界面处表现出明显的多属性响应特征。位于 4567 m 深度的砂泥岩-花岗岩界面处,纵波阻抗曲线出现剧烈跳变,波形变化率同步急剧升高,主频值则出现低频凹陷,三者协同反映出界面处存在特征响应异常,指示该段为刚性花岗岩与上覆塑性沉积岩的强反差接触带,具备高应力集中与井壁破裂的钻井风险。在厚泥夹砂层段,纵波阻抗与波形变化率同样呈现急剧升高,表明泥岩与薄层砂体之间存在明显的力学非均质性和波阻抗突变,主频属性亦表现为一定程度的响应突变,具有较高的不稳定性。通过属性联合判别,共标定出 5 处潜在的岩性界面型漏失风险层位(图中绿色箭头标识),为钻前避让提供了量化依据。

(4) 异常高压风险层识别结果

在南海 B 工区,高压地层中的孔隙结构和物性的

异常会导致甜点属性的急剧变化。以 W10 井为例,如图 16a 均方根振幅剖面,在 3890~3940 m 深度区间内(黄色箭头所示),均方根振幅值相较于上下地层明显增大;在相对应深度位置,从图 16b 甜点属性中可以看出,甜点属性值也出现急剧变化。结合均方根和甜点属性分析,该地层孔隙结构和物性的异常,这与异常高压地层的存在具有高度相关性,标定该处为潜在钻井漏失风险层位。

如图 16c 所示,W10 井的地层压力剖面清晰地展示了不同深度处地层压力的变化情况,在 3890~3940 m 深度区间内(黄色箭头所示),地层压力显著高于正常压实趋势,形成突出的超压异常带。综合属性响应与压力剖面分析,3890~3940 m 段被明确识别为异常高压性风险层位。识别结果表明,该方法能够在缺乏实时井下压力数据条件下,预测定位钻前高压致险段,为后续控压钻井设计与井控预案提供了关键地质依据。

3.2 综合地质漏失风险层预测

本研究对 4 主控地质致险因素的识别结果进行了整合,构建了融合断裂、火山通道、岩性突变界面及异常高压地层信息的多维地质漏失风险评估框架,对钻前复杂地层中漏失风险进行系统性预测。综合测试

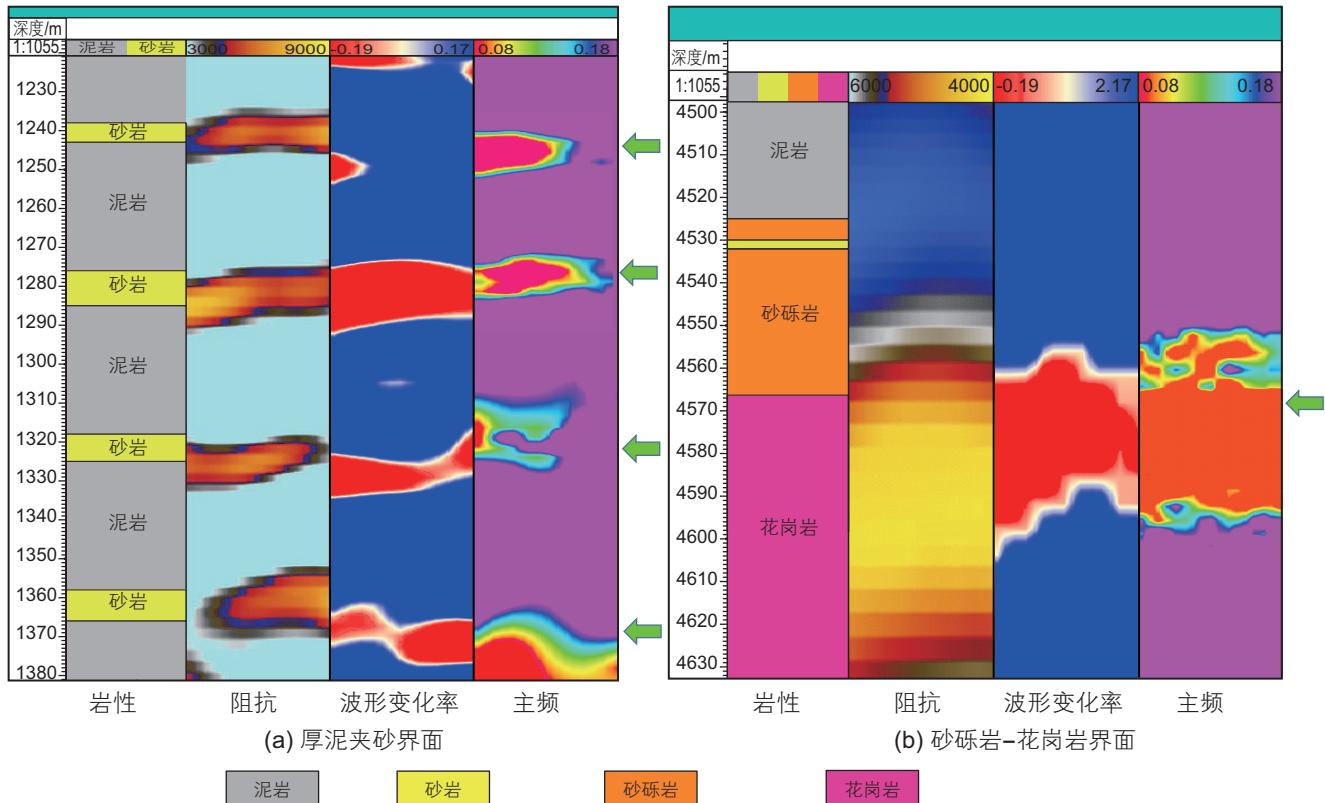


图 15 W9 井岩性界面风险识别图

Fig. 15 Lithologic interface risk identification around Well W9

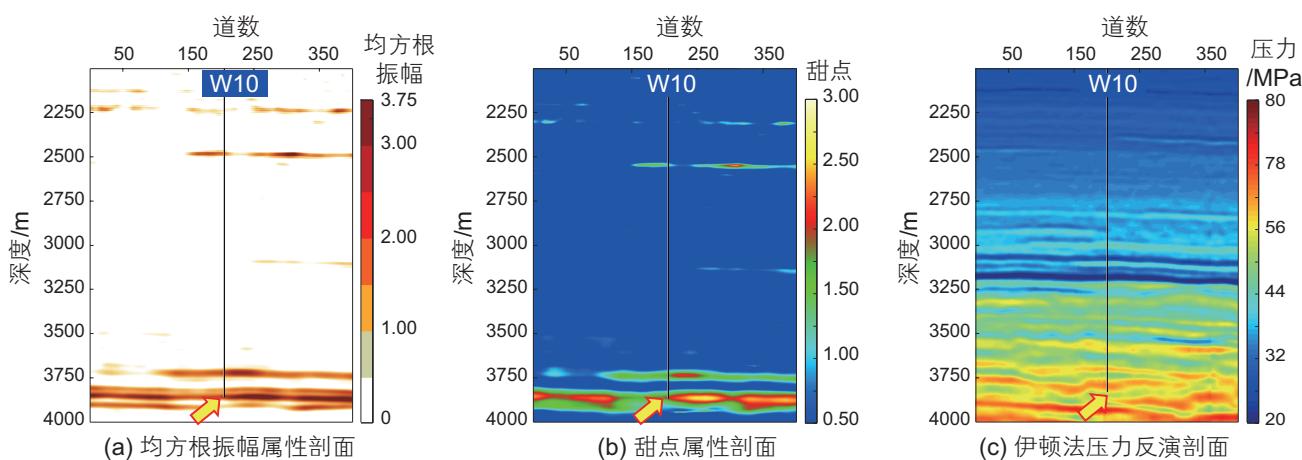


图 16 W10 井异常高压地层风险识别图

Fig. 16 Abnormal overpressure risk identification in Well W10

选取渤海 A 工区 H1 井作为典型验证井，该井所在区块集成了断裂带、火山通道、岩性突变层与异常高压等多类致险因素，具有典型的“四元致险”叠加特征，能够全面检验所构建方法在复杂致险场景下的适应性与准确性。南海 B 工区虽然存在典型的异常高压地层，但工区内已未发现断裂带、火山通道等多元致险地质构造，难以作为综合预测体系的全面验证对象，异常高压地层的相关分析已在前文 W10 井高压层识别中展开。因此，本节以渤海 A 工区 H1 井为例，开展识别结果与实际井漏记录的对比验证，评估综合风险预测模型在实际工程中的适用性。

渤海 A 工区 H1 井预测结果如图 17 所示，背景为

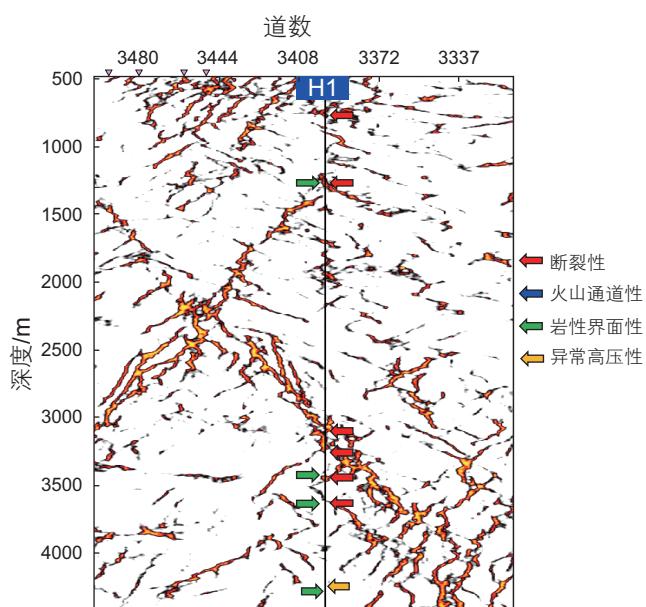


图 17 H1 井综合地质漏失风险层预测

Fig. 17 Integrated prediction of lost circulation risk zones in Well H1

过 H1 井的相干属性剖面，分别用红色、蓝色、绿色和黄色箭头来标识不同深度的断裂性、火山通道性、岩性界面性以及异常高压性的地质漏失风险层。其中，H1 井周围未识别到明显的火山通道响应特征，与相关地质资料所述一致。

将地质漏失风险层预测结果(表 1)与实际钻井漏失记录(表 2)对比分析可知，H1 井累计发生 10 次漏

表 1 H1 井综合地质漏失风险层预测表

Table 1 Integrated prediction of lost circulation risk zones in Well H1

风险层	深度 /m	预测主因
1	642~668	断裂
2	1256~1286	断裂+岩性界面
3	2987~3090	断裂+岩性界面
4	3204~3252	断裂
5	3462~3535	断裂+岩性界面
6	3576~3618	断裂
7	4368~4407	岩性界面+异常高压

表 2 H1 井漏失实钻记录

Table 2 Actual lost circulation events in Well H1

漏失点	深度 /m	瞬时漏速 /(m³/h)	预测结果
1	3044	60	正确
2	3055	30	正确
3	3065	90	正确
4	3214	80	正确
5	3407	6	遗漏
6	3482	30	正确
7	3529	6	正确
8	3602	6	正确
9	3644	5	遗漏
10	4389	15.6	正确

失，其中 8 个漏失点进行了有效的风险预测，从实钻角度来计算，该井漏失层预测准确率约为 80%。具体而言，预测 2987~3090 m 为断裂发育叠加厚泥夹砂互层有较高的漏失风险，实际钻井过程中在 3044 m、3055 m 和 3065 m 发生三次严重漏失，最高瞬时漏速达 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ ，造成了巨大安全隐患；预测 3204~3252 m 为断裂性漏失风险层，实钻于 3214 m 发生严重漏失，瞬时漏速达 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ ；同理，对 3482 m、3529 m、3602 m 以及 4389 m 漏失点都进行了有效钻前预测。但是对 3407 m 和 3644 m 的漏失，并未能够进行有效预测，分析原因可能是该位置的地质构造的地震响应特征较弱，未能进行有效预测，这表明预测模型在处理隐蔽性风险时仍存在提升空间。

总体来看，验证井 H1 井的漏失主要集中发生在断裂带以及岩性界面过渡地带，且多种因素叠加，使漏失风险程度显著增加。尤其是在预测的 3462~3535 m 漏失区间内，断裂带与岩性过渡层的叠加，最终导致较大漏失量的发生。

4 讨论

本研究以“四元致险”理论为框架，建立了涵盖断裂带、火山通道、岩性突变界面与异常高压地层的地震导向多类型地质漏失风险识别体系，突出体现了多种地震属性的集成应用与跨学科风险建模思路。整体来看，本文的创新更多体现在跨学科交叉应用，即：将地质机理分析与应用成熟的地球物理方法相结合，服务于钻前漏失风险预测，而在单一风险体预测方法上尚未形成原理上的突破。

此外，钻井工程技术在漏失风险的形成与演化中具有显著影响，如钻井液性能调控、封堵技术部署与井控策略等，均可改变风险时段的响应强度与失稳路径。由于资料来源受限，本文未能系统纳入工程因素的量化分析，未来可基于现场实测工况参数，进一步构建“地质-工程”双因素协同预测模型，提升风险识别的适应性与可控性。

未来研究可针对不同类型地质致险单元，结合钻

井过程中多源数据(如测井、录井、钻时参数、压力反馈等)，开展多维度、多时相的数据融合分析，并引入机器学习等手段实现定量化、可解释的风险等级预测。同时，考虑钻进过程中的信息动态更新特征，构建随钻识别与风险实时迭代机制，将静态预测拓展为动态预警，为复杂区井控设计与地质导向决策提供更具工程适应性的支撑。

5 结论

本文面向海上典型海域研究区钻井中常见的地质致险问题，提出并构建了基于“四元致险”模型的地震导向漏失风险层识别方法体系，以实现钻前阶段对高风险时段的精准预测。研究工作主要取得以下结论：

1) 通过对渤海 A 区与南海 B 区共 36 口井的漏失事件统计与典型井分析，系统归纳出断裂带、火山通道、岩性突变界面与异常高压地层四类高致险地质单元，构建了“四元致险”理论框架。分析表明，4 类单元在构造属性、岩性组合与力学响应方面均具有明显非均质性，且与实钻漏失时段存在高度对应关系，明确了其空间分布特征与致险机制，为复杂地层下的漏失风险层预测提供了理论基础。

2) 针对 4 类高致险地质体，分别构建了断裂带的贝叶斯融合风险概率模型、火山通道的振幅-方差联合识别流程、岩性界面的主成分优化敏感属性集，以及异常高压地层的属性-压力联合反演方法。上述模型均以地震属性为主导，结合典型地质机理与测井约束，提升了钻前风险体的空间识别能力。

3) 实际案例显示，W6 井断裂风险概率值达 0.87 时，预测为钻井漏失地质风险层，实钻验证该时段发生漏失，瞬时漏速达 $25.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。在渤海 H1 井应用中，综合预测模型对 10 个漏失层实现 8 处精准预测，准确率达 80%，尤其是，成功预测 3044 至 3065 m 断裂带复合岩性界面高风险层位，实钻记录该时段后发生 3 次最高瞬时漏速达 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 的严重漏失，验证了所提方法流程在的适应性与可靠性。

参考文献

- [1] PU L, XU P, XU M B, et al. Lost circulation materials for deep and ultra-deep wells: A review[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 214: 110404.
- [2] CHEN X Y, WENG C K, TAO L, et al. A novel method for predicting formation pore pressure ahead of the drill bit by embedding petrophysical theory into machine learning based on seismic and logging-while-drilling data[J]. Petroleum Science, 2025, 22(4): 1–12.

- [3] FENG K, LIU S, YIN Z, et al. Gas kick and lost circulation risk identification method with multi-parameters based on support vector machine for drilling in deep or ultradeep waters[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2025, 64: 102007.
- [4] SUN J S, BAI Y R, CHENG R, et al. Research progress and prospect of plugging technologies for fractured formation with severe lost circulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 732–743.
- [5] SABAH M, MEHRAD M, ASHRAFI S B, et al. Hybrid machine learning algorithms to enhance lost-circulation prediction and management in the Marun oil field[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 198: 108125.
- [6] PANG H W, MENG H, WANG H Q, et al. Lost circulation prediction based on machine learning[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208: 109364.
- [7] WU L W, WANG X P, ZHANG Z Y, et al. Intelligent monitoring model for lost circulation based on unsupervised time series autoencoder[J]. Processes, 2024, 12(7): 1297.
- [8] GENG Z, WANG Y F. Physics-guided deep learning for predicting geological drilling risk of wellbore instability using seismic attributes data[J]. Engineering Geology, 2020, 279: 105857.
- [9] XU Y Q, LIU K, HE B L, et al. Risk pre-assessment method for regional drilling engineering based on deep learning and multi-source data[J]. Petroleum Science, 2023, 20(6): 3654–3672.
- [10] YIN Q S, YANG J, TYAGI M, et al. Field data analysis and risk assessment of gas kick during industrial deepwater drilling process based on supervised learning algorithm[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 312–328.
- [11] 徐同台, 刘玉杰, 申威, 等. 钻井工程防漏堵漏技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. [XU T T, LIU Y J, SHEN W, et al. Drilling engineering leakage prevention and plugging technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.]
- [12] 赵良孝. 重泥浆压裂漏失的机理和测井诊断方法[J]. 天然气工业, 1996, 16(2): 19–22. [ZHAO L X. Mechanism of heavy mud fracturing loss and logging diagnosis methods[J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(2): 19–22.]
- [13] 曾义金. 塔北地区碳酸盐岩储层欠平衡压力钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(2): 7–9. [ZENG Y J. Underbalanced pressure drilling technology for carbonate reservoirs in Tabei area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2001, 29(2): 7–9.]
- [14] OZDEMIRTAS M, BABADAGLI T, KURU E. Effects of fractal fracture surface roughness on borehole ballooning[J]. Vadose Zone Journal, 2009, 8(1): 250–257.
- [15] PORDEL SHAHRI M, ZEYGHAMI M, MAJIDI R. Investigation of fracture ballooning and breathing in naturally fractured reservoirs: Effect of fracture deformation law[C]. Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Abuja: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [16] LI P, CAI M F, MIAO S J, et al. Accurate measurement techniques and prediction approaches for the in-situ rock stress[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 13226.
- [17] GUGLIELMI Y, MCCLURE M, BURGHARDT J, et al. Using in-situ strain measurements to evaluate the accuracy of stress estimation procedures from fracture injection/shut-in tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 170: 105521.
- [18] YONG R, WU J F, HUANG H Y, et al. Complex in situ stress states in a deep shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin, China: From field stress measurements to in situ stress modeling[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 141: 105702.
- [19] 邓金根, 张洪生. 钻井工程中井壁失稳的力学机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. [DENG J G, ZHANG H S. Mechanical mechanism of wellbore instability in drilling engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.]
- [20] 黄荣樽, 陈勉, 邓金根, 等. 泥页岩井壁稳定性力学与化学的耦合研究[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(3): 15–21, 25. [HUANG R Z, CHEN M, DENG J G, et al. Coupling study of mechanical and chemical effects on shale wellbore stability[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1995, 12(3): 15–21, 25.]
- [21] ZHANG W J, MENG X K, ZHANG W B, et al. Dynamic risk assessment of deepwater drilling using data-based and probabilistic approach[J]. Ocean Engineering, 2023, 268: 113414.
- [22] DUPRIEST F E, KOEDERITZ W L. Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy[C]// SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [23] ELMGERBI A, THONHAUSER G. Holistic autonomous model for early detection of downhole drilling problems in real-time[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 164: 418–434.
- [24] REMMERT S M, WITT J W, DUPRIEST F E. Implementation of ROP management process in Qatar North Field[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [25] 史玉升, 梁书云. 基于目标函数的钻压优化模型建模方法[J]. 地质与勘探, 2000, (2): 7–9, 12. [SHI Y S, LIANG S Y. Modeling method of weight on bit optimization based on objective function[J]. Geology and Exploration, 2000, (2): 7–9, 12.]
- [26] 樊洪海, 冯广庆, 肖伟, 等. 基于机械比能理论的钻头磨损监测新方法[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 116–120. [FAN H H, FENG G Q, XIAO W, et al. A new method for bit wear monitoring based on mechanical specific energy theory[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 116–120.]
- [27] 崔猛, 李佳军, 纪国栋, 等. 基于机械比能理论的复合钻井参数优选方法[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 66–70. [CUI M, LI J J,

- JI G D, et al. Optimization method of composite drilling parameters based on mechanical specific energy theory[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 66–70.]
- [28] LIU Z K, MA Q, SHI X W, et al. A dynamic quantitative risk assessment method for drilling well control by integrating multi types of risk factors[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 167: 162–172.
- [29] 卢运虎, 金衍, 王汉青, 等. 井漏风险层位钻前智能识别方法研究[J]. 石油科学通报, 2024, 9(4): 574–585. [LU Y H, JIN Y, WANG H Q, et al. Research on intelligent identification method for pre-drilling lost circulation risk zones[J]. Petroleum Science Bulletin, 2024, 9(4): 574–585.]
- [30] 聂臻, 夏朝辉, 吴波鸿, 等. 中东地区碳酸盐岩油藏钻井工程技术现状及发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 1–9. [NIE Z, XIA Z H, WU B H, et al. Current status and development trends of drilling engineering technologies for carbonate reservoirs in the Middle East[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(1): 1–9.]
- [31] 金衍, 卢运虎, 李再均. 一种井漏层位钻前风险预测新方法[J]. 石油钻采工艺, 2008, (3): 24–28. [JIN Y, LU Y H, LI Z J. A new method for pre-drilling risk prediction of lost circulation zones[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, (3): 24–28.]
- [32] PANG H W, WANG H Q, XIAO Y T, et al. Machine learning for carbonate formation drilling: Mud loss prediction using seismic attributes and mud loss records[J]. Petroleum Science, 2023, 20(6): 1–15.
- [33] DING Y, CUI M, WANG H G, et al. Predicting seismic-based anisotropy for prevent pre-drill risk using a novel type neural network[C]// SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Virtual: Society of Petroleum Engineers, 2021.
- [34] 周长所, 杨进, 谢仁军, 等. 渤中区域裂缝性漏失风险量化评价方法[J]. 钻采工艺, 2023, (6): 14–20. [ZHOU C S, YANG J, XIE R J, et al. Quantitative evaluation method for fractured lost circulation risk in Bohzhong area[J]. Drilling & Production Technology, 2023, (6): 14–20.]
- [35] 张野, 程飞, 张鑫, 等. 渤中潜山油气藏压力控制钻井技术应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(13): 160–161. [ZHANG Y, CHENG F, ZHANG X, et al. Application research on pressure control drilling technology in Bohzhong subsurface oil and gas reservoirs[J]. China Petrol Chem Stand Qual, 2017, 37(13): 160–161.]
- [36] 马英文. 渤中地区复杂易塌地层安全钻井技术研究与实践[R]. 天津: 中海石油, 2018. [MA Y W. Research and practice of safe drilling technology in complex collapsible strata in Bohzhong area[R]. Tianjin: CNOOC, 2018.]
- [37] 张玉强, 孙晓飞, 韩雪银, 等. 渤中地区深井钻井配套钻具技术[J]. 内江科技, 2019, 40(2): 25–26. [ZHANG Y Q, SUN X F, HAN X Y, et al. Supporting drill string technology for deep well drilling in Bohzhong area[J]. Neijiang Science and Technology, 2019, 40(2): 25–26.]
- [38] 李中, 陈浩东, 刘和兴, 等. 深水窄密度窗口地层封堵承压钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(4): 428–434. [LI Z, CHEN H D, LIU H X, et al. Plugging and pressure-bearing drilling fluid technology for narrow density window formation in deepwater[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(4): 428–434.]
- [39] 谢仁军, 李中, 刘书杰, 等. 南海陵水 17-2 深水气田开发钻完井工程方案研究与实践[J]. 中国海上油气, 2022, 34(2): 116–124. [XIE R J, LI Z, LIU S J, et al. Research and practice of drilling and completion engineering for LS17-2 deepwater gas field in South China Sea[J]. China Offshore Oil Gas, 2022, 34(2): 116–124.]
- [40] 李振宇, 何碧竹, 负晓瑞, 等. 共和盆地东北部花岗岩型干热岩井下裂缝系统及其构造成因[J]. 岩石学报, 2024, 40(12): 3964–3983. [LI Z Y, HE B Z, YUN X R, et al. Subsurface fracture systems and their tectonic genesis of granite-type hot dry rock in northeastern Gonghe Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(12): 3964–3983.]
- [41] 贾利春, 陈勉, 侯冰, 等. 裂缝性地层钻井液漏失模型及漏失规律[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 95–101. [JIA L C, CHEN M, HOU B, et al. Lost circulation model and laws in fractured formations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 95–101.]
- [42] 钟高明, 赵向原, 石磊, 等. 松南长岭断陷查干花次凹火石岭组火山碎屑岩储层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(1): 84–95. [ZHONG G M, ZHAO X Y, SHI L, et al. Characteristics and main controlling factors of volcaniclastic reservoirs in Huoshiling Formation of Chaganhua Subsag, Changling Fault Depression, Southern Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(1): 84–95.]
- [43] 刘永贵, 宋涛, 徐用军. 高温深井微裂缝封堵评价方法及其应用——以松辽盆地徐深气田为例[J]. 天然气工业, 2016, 36(2): 78–83. [LIU Y G, SONG T, XU Y J. Evaluation method and application of micro-fracture plugging in high-temperature deep wells: A case study of Xushen Gas Field in Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(2): 78–83.]
- [44] 邓津辉, 谭忠健, 袁亚东, 等. 渤海海域古近系—新近系裂缝性漏失断缝体系特征及力学机理研究[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(5): 84–98. [DENG J H, TAN Z J, YUAN Y D, et al. Characteristics and mechanical mechanisms of fractured lost circulation fault-fracture systems in Paleogene-Neogene of Bohai Sea area[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(5): 84–98.]
- [45] LI M X, CAO H, YANG Z F, et al. Intelligent prestack multitrace seismic inversion constrained by probabilistic geologic information[J]. Geophysics, 2025, 90(2): IM15–IM34.
- [46] 杨海军, 李勇, 唐雁刚, 等. 塔里木盆地克深气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(3): 399–414. [YANG H

- J, LI Y, TANG Y G, et al. Accumulation conditions and key exploration & development technologies of Keshen Gas Field in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(3): 399–414.]
- [47] EATON B A. The equation for geopressure prediction from well logs[C]//Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME. Dallas, Texas: Society of Petroleum Engineers of AIME, 1975.

(编辑 付娟娟)

第一作者: 陈帅(1995年—), 博士研究生, 从事地球物理勘探与地震导向钻井等方面研究, Dr_ShuaiChen@126.com。

通信作者: 袁三一(1983年—), 博士, 教授, 从事地球物理勘探、油气人工智能以及地震地质工程一体化等方面的研究, yuansy@cup.edu.cn。