基于常规测井曲线的火山岩裂缝预测：以渤海湾盆地渤南地区中生界为例

邵志远[a]，何杰[b*]，廖远涛[b]，佟殿君[b]，任建业[b]，陈文强[a]，王华[a]

中国地质大学（武汉）a. 资源学院；b. 海洋学院，武汉 430074

第一作者，E-mail：2929749542@qq.com

* 通信作者，E-mail：jiehe19920402@163.com

2025-03-31 收稿；2025-05-28 修回；2025-06-27 接受

基金项目：中国石油（中国）有限公司天津分公司科技项目“渤南地区走滑断裂控缝机制与潜山优质储层发育规律”（CCL2024TJX0NST0044）

中图分类号：P618.13；P631.8　　文章编号：2096-8523(2025)05-0082-13　　doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250144

摘　要：构造成因裂缝对改善深层火山岩潜山储层物性和提高油气产能具有重要意义，由于其非均质性较强，需要对断裂带不同部位的裂缝发育密度进行精细刻画。实际生产中由于岩心和成像测井资料获取成本较高，因此引入基于常规测井曲线计算的综合裂缝指数，据此划分断裂带内部结构，定量识别裂缝发育密度，为火山岩裂缝型储层勘探提供依据。通过声波时差（*AC*）、中子孔隙度（*CN*）、密度（*DEN*）、井径（*CAL*）、深侧向电阻率（*RD*）、浅侧向电阻率（*RS*）和微侧向电阻率（*RMLL*）7 种测井参数，构建了渤海湾盆地渤南地区中生界火山岩综合裂缝指数（*CFI*）模型；利用累计 *CFI* 曲线斜率变化定量划分了裂缝发育密集段边界，将断裂带内部分别划分为断核、损伤带和围岩，裂缝在损伤带内发育密度最大，其次为围岩，在断核内几乎不发育。研究区中生界火山岩中 7 种常见测井曲线在裂缝发育带中分别表现为 *AC*、*CN* 和 *CAL* 值增大，*DEN*、*RD*、*RS* 和 *RMLL* 值减小的响应特征，*CFI* 值在裂缝发育位置出现明显上升。结合成像测井和岩心资料表明，*CFI* 曲线高值区与裂缝发育段呈对应关系。结合地震解释确定断核后，可以明确损伤带及围岩分布范围并进一步对渤南地区中生界火山岩中的裂缝进行有效预测。基于测井曲线计算的 *CFI* 模型能有效量化火山岩裂缝发育强度，定位裂缝发育密集带的井下空间位置，通过累计 *CFI* 曲线可实现断裂带内部结构的有效识别。

关键词：火山岩储层；渤海湾盆地；综合裂缝指数；测井曲线；裂缝带；损伤带；断核；围岩

火山岩油气藏作为全球油气勘探的重要目标，广泛分布于多个含油气盆地。我国火山岩油气资源潜力较大，已探明储量约为 6 亿 t 原油和 5 800 亿 m^3 天然气[1-4]。目前，在松辽盆地、渤海湾盆地及准噶尔盆地等区域已发现规模性火山岩油气藏[5]，其中渤海湾盆地近年来火山岩储层勘探进展尤为突出。然而，火山岩储层因岩性复杂、裂缝非均质性强[6-7]，现有技术对裂缝带的系统化识别与定量评价仍存在明显不足，制约了储层有效开发[8]。

针对上述问题，本研究基于岩心照片、成像测井及地震资料，选取声波时差、中子孔隙度、密度、井径、电阻率等裂缝敏感测井参数[9]，构建综合裂缝指数（*CFI*）模型，实现裂缝发育强度的定量表征；结合地震断层解释与累计 *CFI* 曲线分析，建立损伤带边界的划分方法，进而对断裂带的内部结构和裂缝发育密度进行划分。该方法在成像测井资料有限的条件下，通过常规测井与地震数据融合，可低成本、高效识别裂缝带展布规律，为火山岩裂缝型储层评价

著录信息：邵志远，何杰，廖远涛，等. 基于常规测井曲线的火山岩裂缝预测：以渤海湾盆地渤南地区中生界为例［J］. 地质科技通报，2025，44(5)：82-94.
SHAO Zhiyuan，HE Jie，LIAO Yuantao，et al. Prediction of volcanic rock fractures based on conventional logging curves：A case study of the Mesozoic in the Bonan area，Bohai Bay Basin［J］. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(5)：82-94.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

提供技术支撑。

1 区域地质概况

渤海湾盆地位于中国东部，火山岩油气藏的勘探开发已有 40 多年的历史，目前已发现火山岩油气藏 30 个[10-12]。渤海湾盆地中生代火山活动主要活跃在晚侏罗世和早白垩世 2 个时期，以早白垩世为主，火山岩主要发育在中生界下白垩统义县组，形成时代为 133 ~ 118 Ma[7, 13]。义县组火山岩垂向序列可划分为 3 个喷发旋回：旋回Ⅰ以基性−中基性火山岩为主体，发育玄武岩−玄武安山岩组合；旋回Ⅱ以中性火山岩为特征，形成玄武安山岩−安山岩−凝灰岩组合；旋回Ⅲ则以酸性火山岩为主导，发育英安岩−流纹质火山碎屑岩组合[14-16]。中生界火山岩在环渤中构造带广泛分布(图 1a)，且厚度较大，含油气资源量非常丰富，勘探潜力较大，但火山岩含油气性横向变化较大，失利井较多。近年来，随着渤海海域中生界火成岩潜山勘探认识的持续深入，中生界火成岩勘探已获得多个突破，证实了中生界火成岩潜山具有较好的勘探潜力。

研究区位于渤南探区东部，地处郯庐走滑断裂的中支与东支之间，涵盖渤南低凸起东段、黄河口凹陷中东洼、莱北低凸起及莱州湾凹陷 4 个构造单元(图 1b)，总面积约 2 400 km^2。该区域潜山普遍呈现“双层结构”，即太古宇潜山之上广泛覆盖中生界。受复杂地质条件和勘探认识限制，研究区中生界火山岩潜山长期未被作为主要勘探目标，勘探程度相对较低。

目前，工区内渤中 29-6 油田和垦利 16-1 油田在勘探评价过程中，中生界潜山已取得一定油气发现，其中垦利 16-1 油田中生界共探明储量约 450 万 t。2023 年以来，渤中 8-3 南与龙口 7-1 2 个潜山相继在中生界火山岩中获得了突破。BZ8-3S-B 井测试获日产油 84.0 m^3、日产气 16.7×10^4 m^3；BZ8-3S-C 井测试获日产油 885.1 m^3、日产气 54.3×10^4 m^3；LK7-1-A 井测试获日产油 208.8 m^3、日产气 95.9×10^4 m^3[18]，展现了研究区中生界火成岩潜山良好的勘探前景。

2 基于裂缝发育密度差异的断裂内部结构划分

断裂不同内部结构的裂缝发育密度存在显著差异，直接影响储层物性和油气分布规律，损伤带中发育的裂缝带是重要的储集空间和运移通道。由于断裂带内部裂缝发育非均质性强烈，需通过断裂结构精细划分明确裂缝发育规律。断裂内部结构具有侧向分带性，从断面向外依次可划分为断核、损伤带和围岩[19-21]，裂缝在损伤带内发育密度最大，其次为围岩，在断核内几乎不发育。本研究以 BN-1 井、BN-2 井、BN-3 井、BN-4 井、BN-7 及 BN-9 共 6 口井的中生界火山岩储层作为主要研究对象，通过整合地震资料解释、成像测井数据解析与岩心资料对比分析，对这些井的垂向裂缝带分布进行有效划分。

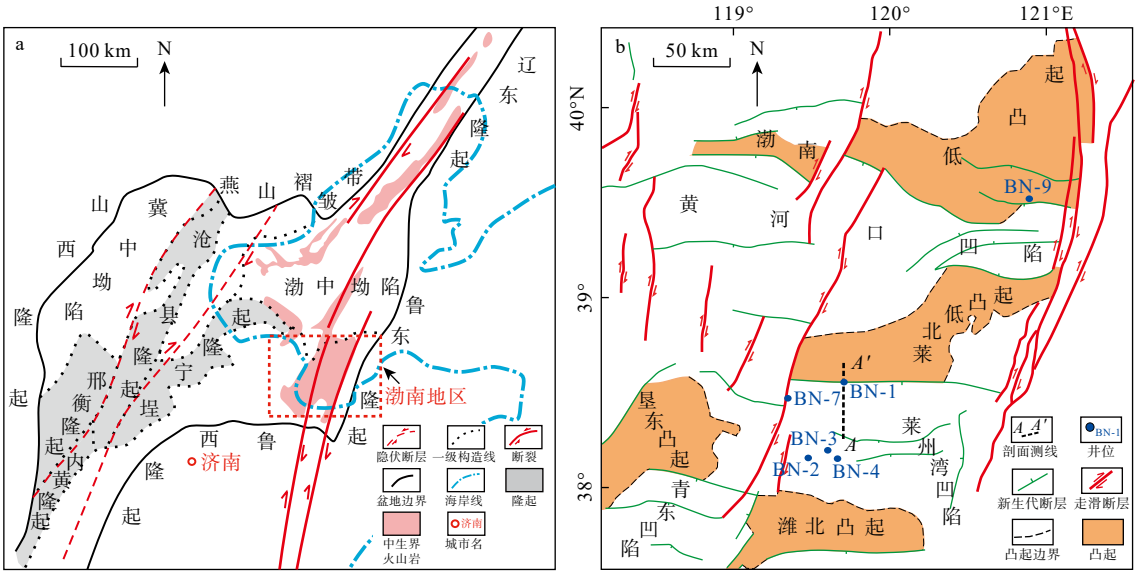


图 1 渤海湾盆地位置及中生界火山岩分布图（a）以及渤南地区构造地质图（b）[6, 17]

Fig. 1 Location of the Bohai Bay Basin and distribution map of Mesozoic volcanic rocks (a) and structural geological map of the Bonan area (b)

2.1　断　核

在渤南地区中生界火山岩中，位于断核部分的测井曲线与周围损伤带相比波动出现负异常，并且通过测井曲线分析可以得出，在小型和活动历史较短的断层中，断核宽度约为几米到十几米，在大型和长期活动的断层中，断核可达数十米甚至到上百米的范围[19, 22-23]（图 2）。

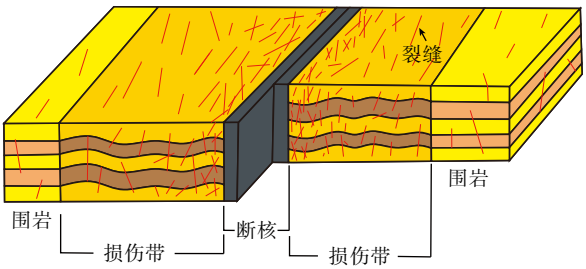


图 2　断裂带内部结构（断核、损伤带和围岩）划分示意图[19]

Fig. 2　Schematic illustrating of the internal structure of a fault zone (fault core, damage zone, and host rock)

2.2　损伤带

损伤带位于断核与未变形或弱变形的围岩之间，其特征是由断层活动引起的次级破裂网络（如裂隙、节理、小断层、变形带等），但变形强度低于断核[19]。在渤南地区中生界火山岩中，构造缝为损伤带发育的主要储集空间[24]。在损伤带结构中，靠近断核的部位裂缝数量较多，随着与断核距离的增加，裂缝密度（*FD*）逐渐降低。根据损伤带内主导的地质特征，可将其分为两类：变形带主导型和裂缝主导型。变形带主导型的损伤带主要发育于多孔岩石中，其内部岩石经历显著的塑性变形，导致孔隙度和渗透率显著降低，严重阻碍流体运移，通常出现在应力集中且持续时间较长的断层区域。裂缝主导型的损伤带则以密集发育的裂缝为特征，这些裂缝为流体提供了额外的运移通道，使渗透率在一定程度上升高[19, 25-26]。裂缝主导型损伤带在测井曲线中能较为敏感地反映出来，因此，本研究主要基于测井曲线识别和划分裂缝主导型损伤带。

定义损伤带边界一般使用裂缝密度（*FD*）数据来判别，裂缝密度通常会随着远离断核而逐渐减少，裂缝出现频率也会随着与断核距离的增加而降低。最外层区域的裂缝密度趋于稳定，这一稳定值可以作为背景值，用于帮助确定损伤带的边界。在某些情况下，局部区域可能会出现陡峭的斜率变化，这可能是由于次级断层或其他因素（如变形带聚集）引起的[19]。

2.3　围　岩

损伤带边界以外的区域定义为围岩区域（图 2）。与损伤带相比，围岩内裂缝发育程度显著降低，表现为裂缝密度低且分布相对均匀。围岩的裂缝密度特征可作为划定损伤带边界的背景值。

3　裂缝带测井的响应特征

研究区主要测井曲线类型包括声波（*AC*）、井径（*CAL*）、中子孔隙度（*CN*）、密度（*DEN*）、自然伽马（*GR*）、自然电位（*SP*）、深侧向电阻率（*RD*）、浅侧向电阻率（*RS*）、微侧向电阻率（*RMLL*）。

基于研究区 BN-2 井和 BN-7 井裂缝带与非裂缝带的测井交会图可知，自然伽马（*GR*）和自然电位（*SP*）对裂缝带的响应特征不显著[27]，而其余测井曲线在裂缝带与非裂缝带之间呈现出显著的响应差异（图 3）。因此，在裂缝识别过程中，选取对裂缝响应较为敏感的 7 条测井曲线（*AC*、*CN*、*CAL*、*DEN*、*RD*、*RS*、*RMLL*）作为计算依据[28]。

3.1　声波时差（*AC*）测井曲线响应特征

声波时差是声波在地层中的传播时间。研究区火山岩中，声波在致密岩石中，传播较快，时差较低。当遇到开口且含流体的裂缝时，声波会发生折射或散射，导致传播路径变长，时差增大。如果是闭合裂缝或填充了硬质矿物，则声波由于裂缝周围的压实作用导致时差降低。对于高角度裂缝，声波按照最短时间传播声程的原则导致曲线响应不明显。一般认为声波时差在裂缝发育处增加，呈现为短小的锯齿状。

3.2　中子孔隙度（*CN*）测井曲线响应

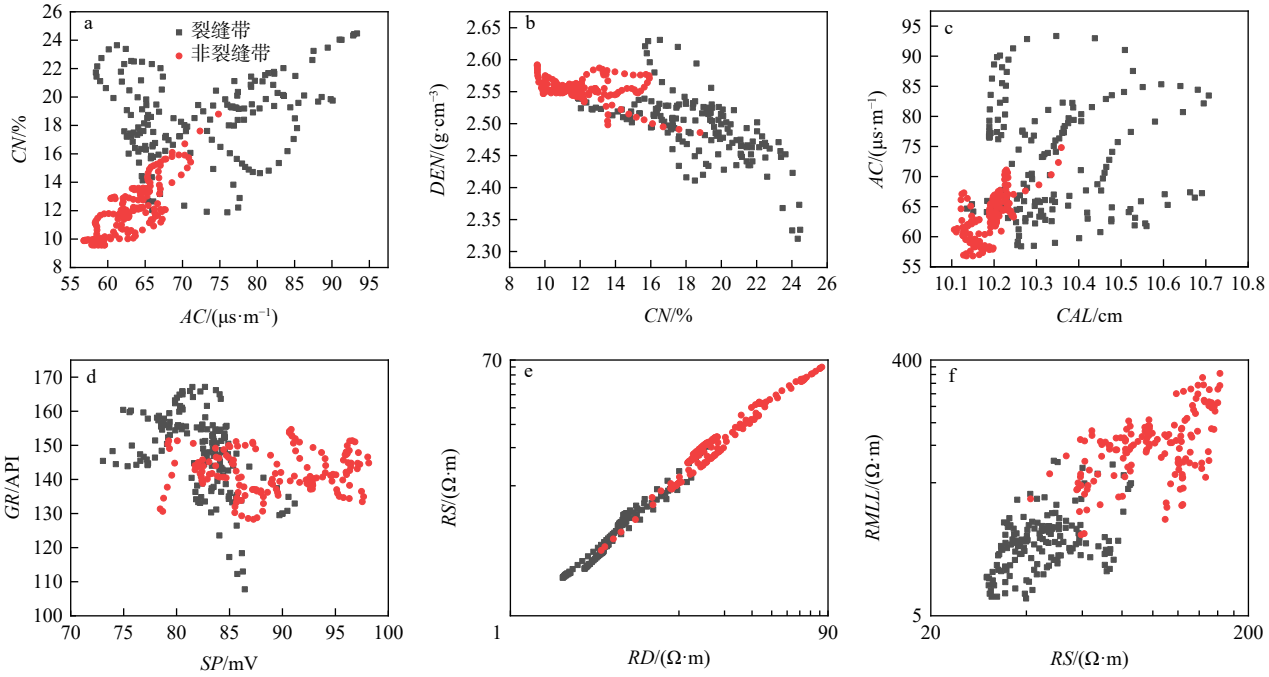
中子测井曲线是通过中子源发射快中子，测量其减速为热中子的能力，反映地层含氢量的曲线。在研究区裂缝发育处，如果裂缝中含有流体，则含氢量增加，导致中子孔隙度响应值增高（*CN* 测井值增大）。如果裂缝被填充或不含流体，中子孔隙度将不变或减小。在研究区未被填充的裂缝段处表现为中子孔隙度增加。

3.3　密度（*DEN*）测井曲线响应

密度测井测量的是地层的体积密度。研究区中生界火山岩密度较高，而当火山岩中发育裂缝时，如果含有流体（密度较低）或气体（密度更低），会导致 *DEN* 测井响应值降低，所以 *DEN* 在裂缝发育处减小；但如果是闭合裂缝或者有矿物填充，则密度变化不明显。

3.4　井径（*CAL*）测井曲线响应

井径测井曲线是指测量井眼直径的曲线。在研究区储层裂缝发育处，由于裂缝段井壁易坍塌导致井径扩大或缩小，在本研究区计算中，通常认为在裂缝发育处，井径增大。



CN. 中子孔隙度；*AC*. 声波时差；*DEN*. 密度；*CAL*. 井径；*GR*. 自然伽马；*SP*. 自然电位；*RS*. 浅侧向电阻率；*RD*. 深侧向电阻率；*RMLL*. 微侧向电阻率；下同

图 3　基于 BN-2 和 BN-7 井测井曲线在裂缝带与非裂缝带响应测井交会图

Fig. 3　Cross-plots of logging responses for fracture zones and non-fracture zones using logs from wells BN-2 and BN-7

3.5　电阻率（*RD*，*RS*，*RMLL*）测井曲线响应

在研究区电阻率测井分为深侧向电阻率(*RD*)和浅侧向电阻率(*RS*)以及微侧向电阻率(*RMLL*)。在裂缝发育处，由于泥浆滤液的存在，使得电阻率降低。微侧向电阻率是高精度测量的井壁附近冲洗带电阻率，导电流体会使电阻率显著降低[29]。

在研究区 BN-3 井(图 4a)和 BN-4 井(图 4b)的裂缝识别工作中，通过综合分析测井曲线及岩心照片识别出它们的裂缝带：BN-3 井 1 463 ~ 1 469 m 裂缝带裂缝带范围和 BN-4 井 1 620 ~ 1 629 m 裂缝带范围内，裂缝带的测井响应特征均表现出 *AC*、*CN*、*CAL* 增大，以及 *DEN*、*RD*、*RS*、*RMLL* 降低的特征。基于上述测井曲线的协同响应特征，可有效实现裂缝发育层段的定性识别[30-33]。

4　构建综合裂缝指数（*CFI*）

尽管测井曲线可通过特征响应定性指示裂缝发育层段，但其多解性常导致解释结果存在不确定性。前人[34]研究表明从单一曲线难以准确地对裂缝进行有效识别。为了从测井曲线中提取更多的裂缝相关信息，人们提出了各种数据处理方法，如综合概率指数法[35]、常规曲线重构概率法[36]，大多数方法都是针对有限的测井资料和特定的地质条件，且主要集中在碎屑岩中，而对于火山岩识别仍然较少研究。为提升裂缝识别精度，本研究引入综合裂缝指数(*CFI*)[37]，通过多测井参数融合计算实现火山岩中裂缝概率的定量评价。

4.1　声波时差（*AC*）测井曲线处理

声波时差值的差异比率反映了岩石孔隙度的变化，基于声波时差建立特征声波时差差异比率(*CACR*)的计算方法，具体为：

$$CACR_i=\begin{cases}0, & AC_i<AC_{\min}\\ 1, & AC_i>AC_{\max}\\ \dfrac{AC_i-AC_{\min}}{AC_{\max}-AC_{\min}}, & AC_{\min}\leqslant AC_i\leqslant AC_{\max}\end{cases},\tag{1}$$

式中：$AC_{\max}$ 为裂缝强度最大的裂缝带的平均声波时差值；$AC_{\min}$ 为非裂缝带的平均声波时差值；AC_i 为某一深度 i 的声波时差值；$CACR_i$ 为某一深度 i 的声波时差差异比率，范围在 0 ~ 1 之间，随着裂缝强度的增加而增大。

根据声波时差差异化比率(*CACR*)，计算归一化的声波时差差异比率($NACR^*$)。

$$NACR_i^*=\frac{CACR_i-CACR_{\min}}{CACR_{\max}-CACR_{\min}},\tag{2}$$

式中：$NACR_i^*$为某一深度 i 的归一化声波时差差异比率；$CACR_{\max}$ 和 $CACR_{\min}$ 分别为 *CACR* 值的最大值和最小值。

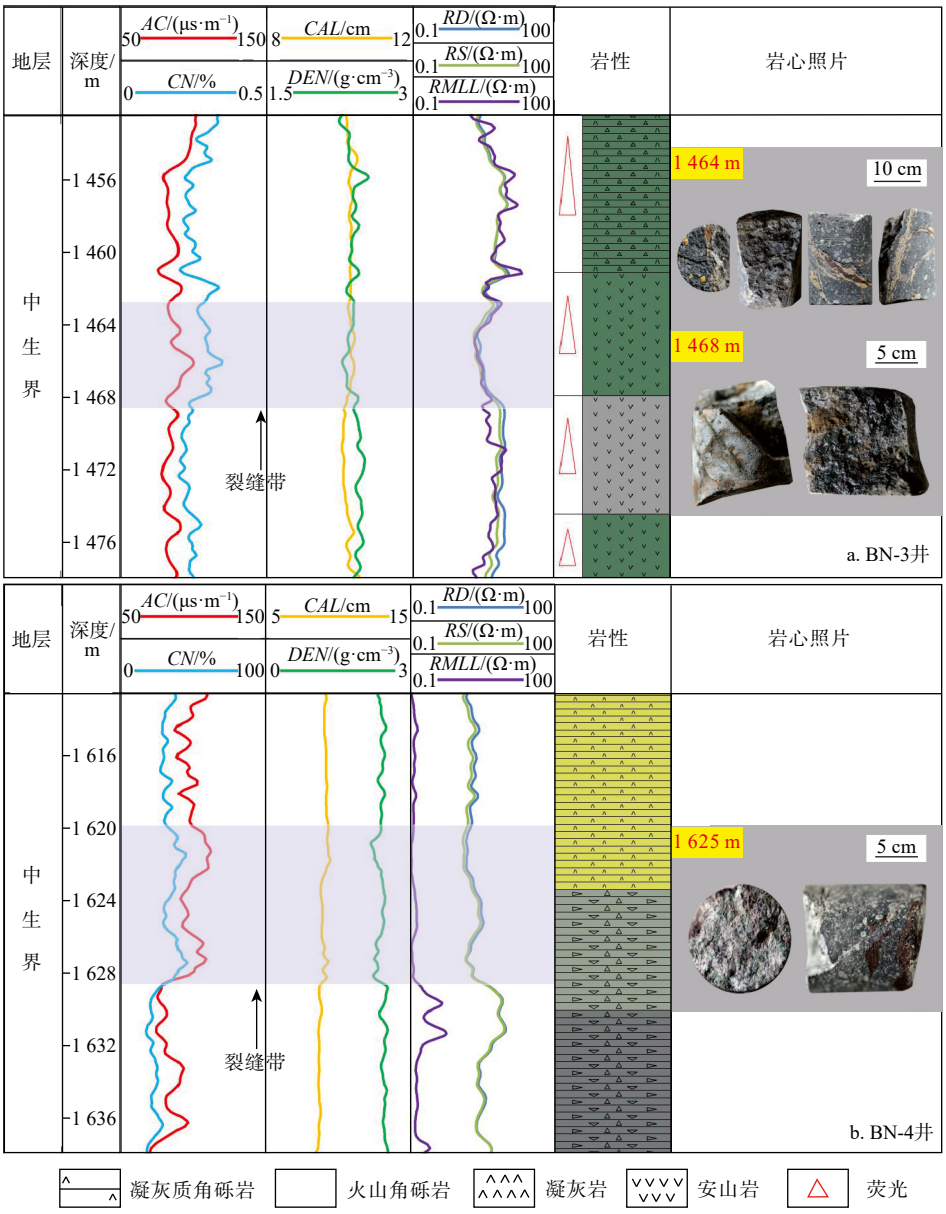


图 4　测井曲线在裂缝带的响应特征

Fig. 4　Logging-response characteristics in fractured zones

通过此计算可以消除不同数据集之间的范围差异，使得结果在多井或不同地质区域的应用中更具有可比性。

由于测井数据会受到裂缝以及其他多种因素的影响，由裂缝引起的异常值会大于某个基础值。因此，裂缝的 *NACR* 由以下公式给出：

$$NACR_i=\begin{cases}0, & NACR_i^*\leqslant NACR_u\\ NACR_i^*, & NACR_i^*>NACR_u\end{cases}\quad (3)$$

式中：$NACR_i$ 为某一深度 i 的 *NACR* 值；$NACR_u$ 为 $NACR_i$ 的基本储层值，可以根据实际数据（如岩心资料和图像测井资料）获得。

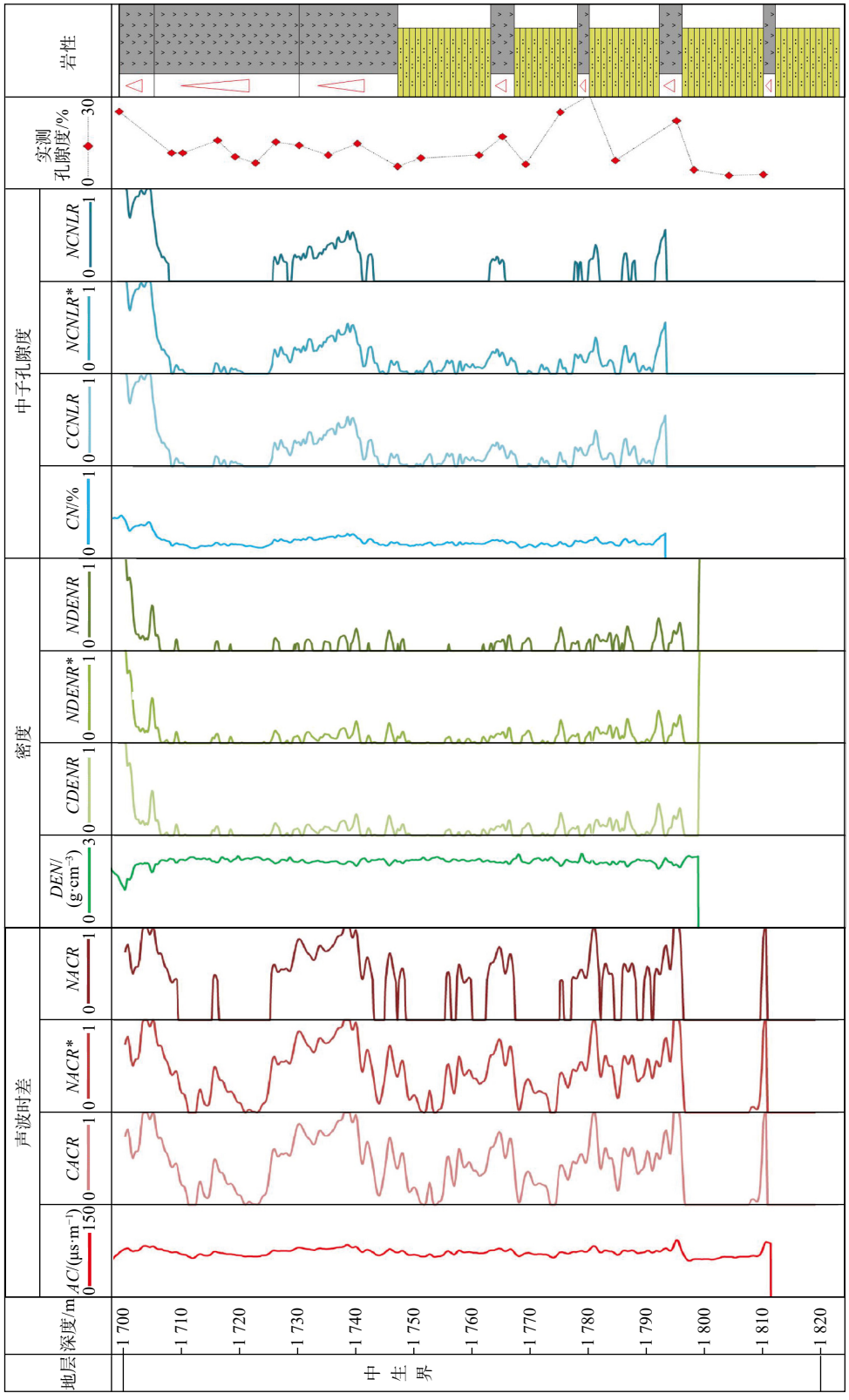
在 BN-9 井中生界火山岩中的安山岩层段内发现了明显的油气显示（图 5）。数据表明，含油气段对应的实测孔隙度值显著升高，且通过 *NACR* 推测的裂缝发育特征与实测孔隙度高值区域及油气显示位置吻合。

4.2　中子孔隙度（*CN*）测井曲线数据处理

计算中子孔隙度差异比率（*CCNLR*）：

$$CCNLR_i=\begin{cases}0, & CNL_i<CNL_{min}\\ 1, & CNL_i>CNL_{max}\\ \dfrac{CNL_i-CNL_{min}}{CNL_{max}-CNL_{min}}, & CNL_{min}\leqslant CNL_i\leqslant CNL_{max}\end{cases},\quad (4)$$

式中：CNL_{max} 为裂缝强度最大的裂缝带的平均中子测井值；CNL_{min} 为非裂缝带的平均中子测井值；CNL_i



CACR. 声波时差差异比率; *NACR**. 归一化声波时差差异比率; *NACR*. 声波时差裂缝指数; *CCNLR*. 中子孔隙度差异比率; *NCNLR**. 归一化中子孔隙度差异比率; *NCNLR*. 中子孔隙度裂缝指数; *CDENR*. 密度差异比率; *NDENR**. 归一化密度差异比率; *NDENR*. 密度裂缝指数; 下同

图 5　BN-9 井声波时差、中子孔隙度和密度测井曲线处理与实测孔隙度曲线对比图

Fig. 5　Comparison of processed acoustic travel-time, neatron porosity, density logging curves with measured porosity curve in Well BN-9

为某一深度 i 的中子测井值；$CCNLR_i$ 为某一深度 i 的中子孔隙度差异比率，范围在 0 ~ 1 之间，并且随着裂缝强度的增加而增大。

类似地，将上述第 4.1 节的处理流程应用于 *CN* 测井数据，以评估裂缝对中子孔隙度的响应特征，得到数据归一化中子孔隙度差异比率（$NCNLR^*$），中子孔隙度裂缝指数（*NCNLR*）。

在 BN-9 井中生界火山岩中，基于中子测井构建的参数 *NCNLR* 与实测孔隙度和油气分布较为吻合（图 5），能够有效识别裂缝带位置分布。

4.3　密度（*DEN*）测井曲线数据处理

对密度曲线计算其差异比率（*CDENR*），由于密度数值在裂缝发育处减小，故计算差异比率方法如下：

$$CDENR_i=\begin{cases}0, & DEN_i>DEN_{\min}\\ 1, & DEN_i<DEN_{\max}\\ \dfrac{DEN_{\max}-DEN_i}{DEN_{\max}-DEN_{\min}}, & DEN_{\min}\leqslant DEN_i\leqslant DEN_{\max}\end{cases},\quad(5)$$

式中：DEN_i 为某一深度 i 的 *DEN* 值；$DEN_{\max}$ 为在非裂缝带密度的大小；$DEN_{\min}$ 为在裂缝带密度的大小；$CDENR_i$ 为某一深度 i 的密度差异比率，范围在 0 ~ 1 之间，$CDENR_i$ 值越大，裂缝强度可能越大。

将上述第 4.1 节的处理流程应用于 *DEN* 测井数据，以评估裂缝对密度的响应特征，得到数据归一化密度差异比率（$NDENR^*$），密度裂缝指数（*NDENR*）。

在 BN-9 井中生界火山岩中，*DEN* 曲线对裂缝的响应特征与实测孔隙度数据具有较为明显的相关性（图 5）。裂缝发育层段对应的 *DEN* 值普遍降低，反映裂缝导致的岩石体积密度下降。然而，受测井岩性因素的影响，*DEN* 曲线对裂缝的敏感性较 *AC* 和 *CN* 有所减弱，其响应随岩性波动呈现局部干扰现象。*DEN* 曲线需要结合 *AC*、*CN* 等多参数融合分析，为裂缝性储层识别提供辅助依据。

4.4　井径（*CAL*）测井曲线处理

对井径测井曲线进行差异化处理，得到井径差异比率（*CCALR*）。建立裂缝特征测井的主要计算公式如下：

$$CCALR_i=\begin{cases}0, & CAL_i<CAL_{\min}\\ 1, & CAL_i>CAL_{\max}\\ \dfrac{CAL_i-CAL_{\min}}{CAL_{\max}-CAL_{\min}}, & CAL_{\min}\leqslant CAL_i\leqslant CAL_{\max}\end{cases},\quad(6)$$

式中：CAL_i 为某一深度 i 的 *CAL* 值；$CAL_{\max}$ 为在裂缝带井径的大小；$CAL_{\min}$ 为在非裂缝带井径的大小；$CCALR_i$ 为某一深度 i 的井径差异比率，范围在 0 ~ 1 之间，$CCALR_i$ 值越大，裂缝强度可能越大。

第 4.1 节的处理流程应用于 *CAL* 测井数据，以评估裂缝对井径的响应特征，得到数据归一化井径差异比率（$NCALR^*$），井径裂缝指数（*NCALR*）。

在 BN-9 井裂缝识别中，*CAL* 曲线对裂缝发育层段表现出一定的响应特征（图 6）。在实测孔隙度高值部分能出现对应。*CAL* 曲线对裂缝的指示作用需要与其他数据综合分析以排除干扰，提高裂缝解释的可靠性。

4.5　电阻率（*RD*，*RS*，*RMLL*）测井曲线处理

由于电阻率等曲线具有非线性特征[38]，故计算对数差异比率，处理得到电阻率差异比率（*CXR*（*X* 为 *RD*, *RS*, *RMLL*））。

$$CXR_i=\begin{cases}0, & X_i>X_{\max}\\ 1, & X_i<X_{\min}\\ \dfrac{\lg X_{\max}-\lg X_i}{\lg X_{\max}-\lg X_{\min}}, & X_{\min}\leqslant X_i\leqslant X_{\max}\end{cases},\quad(7)$$

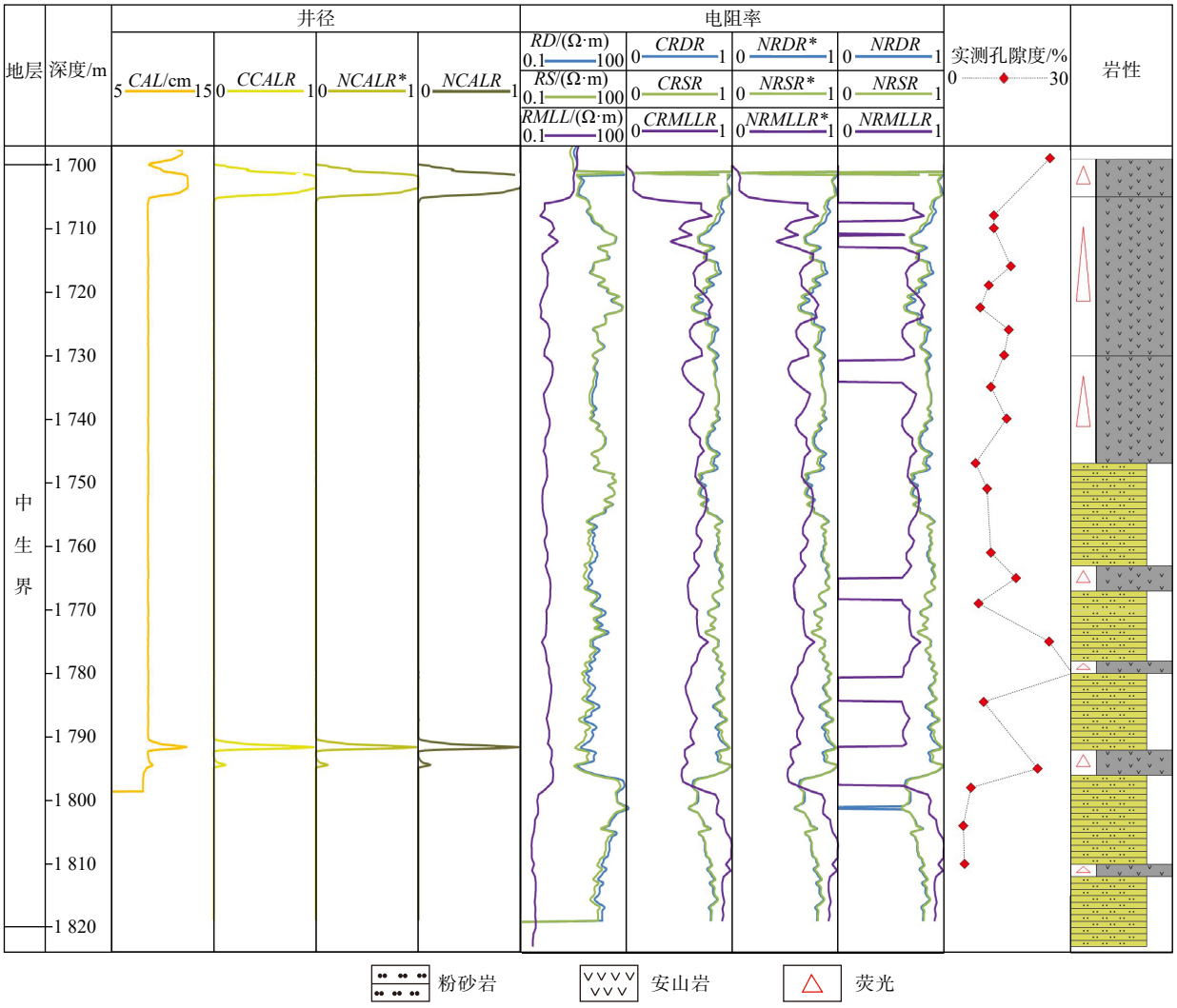
式中：X_i 为井中某深度 i 的电阻率值；$X_{\max}$ 为裂缝带的电阻率平均值；$X_{\min}$ 为非裂缝带的电阻率平均值；CXR_i 为电阻率差异比率，范围在 0 ~ 1 之间，CXR_i 值越小，裂缝强度可能越大。

在分别进行对数差异比率计算处理后，电阻率数据（*RD*, *RS*, *RMLL*）呈现为线性特征，用第 4.1 节的方法对电阻率数据进行归一化及消除低值处理，最后得到特征曲线微侧向电阻率裂缝指数（*NRMLLR*）、深侧向电阻率裂缝指数（*NRDR*）、浅侧向电阻率裂缝指数（*NRSR*）。

在 BN-9 井中，电阻率各项曲线数据与实测孔隙度呈现出良好的相关性（图 6），但是由于其响应受非裂缝因素影响较多，故需要和其他的测井曲线进行综合对比分析，以提高裂缝识别的准确性。

4.6　综合裂缝指数（*CFI*）处理

裂缝的存在、填充状况和岩性等多种因素都可能造成测井曲线数据变化。例如，若是矿物中富含氢离子，而不是由于裂缝中的水导致氢离子增加，那么测井曲线中 *CN* 值也会增加，故当 *CN* 值升高时，难以准确判断这一变化是否是由于裂缝导致。为了削弱非裂缝因素的干扰，可以利用加权系数整合多种测井曲线来体现储层的不同特性[39]。通过结合多个能够揭示裂缝存在的测井曲线，可以减少非裂缝因素的干扰，并推测裂缝是导致某一曲线值发生变化的原因。不同测井曲线特征值的加权系数取决于它们在裂缝识别中的灵敏度和受非裂缝因素影响程



CCALR. 井径差异比率; *NCALR**. 归一化井径差异比率; *NCALR*. 井径裂缝指数; *CRDR*. 深侧向电阻率差异比率; *CRSR*. 浅侧向电阻率差异比率; *CRMLLR*. 微侧向电阻率差异比率; *NRDR**. 归一化深侧向电阻率差异比率; *NRSR**. 归一化浅侧向电阻率差异比率; *NRMLLR**. 归一化微侧向电阻率差异比率; *NRDR*. 深侧向电阻率裂缝指数; *NRSR*. 浅侧向电阻率裂缝指数; *NRMLLR*. 微侧向电阻率裂缝指数; 下同

图 6　BN-9 井井径和电阻率测井曲线处理与实测孔隙度曲线对比图

Fig. 6　Comparison of processed caliper, and resistivity logging curves with measured porosity curve in Well BN-9

度。因此, 可以通过以下步骤计算综合测井指数(*CI*)数据:

$$CI_j = \sum_{j=1}^{m} w_j \times CV_j , \tag{8}$$

式中: CV_j 为某一深度上第 j 种裂缝特征测井值; w_j 为第 j 种裂缝特征测井的加权系数; CI_j 为某一深度上的综合测井指数值。

在岩心和成像测井资料的基础上, 通过对不同裂缝特征测井资料的裂缝检测分析, 得出本研究区权重系数(w_j)如下: *AC*, 0.3; *CN*, 0.25; *RD*, 0.05; *RS*, 0.05; *RMLL*, 0.1; *DEN*, 0.12; *CAL*, 0.08。

由于测井数据受到裂缝以及其他多种因素的影响, 因此反映裂缝发育的 *CI* 值会大于某个基础值。因此, *CFI* 数据可以通过以下公式给出:

$$CFI_i = \begin{cases} 0, & CI_i < CI_{\mathrm{u}} \\ I_i, & CI_i \geqslant CI_{\mathrm{u}} \end{cases} , \tag{9}$$

式中: CFI_i 为某一深度 i 上的 *CFI* 值; 变量 CI_{u} 为 *CI* 的基础储层值, 可以根据实际数据(如岩心和成像测井数据)得出。

CFI_i 值越大, 表示裂缝强度越大。测井分析表明(图 7), *CFI* 曲线能够有效识别裂缝发育的主要深度段。虽然 *CFI* 值会出现随着深度的增加而减小的情况, 但其是由于中生界顶部受风化作用影响, 出现较多裂缝而导致 *CFI* 增大。虽然 *CFI* 值随深度变化而受到影响, 但是压实作用导致 *CFI* 的变化较小, 且其本质是由裂缝发育程度的差异所导致, 而非其他干扰因素引起。与实测孔隙度数据和油气显示层位的对比表明, *CFI* 高值区与裂缝发育段高度吻合, 证实该方法通过将多种测井曲线融合, 降低了单一曲

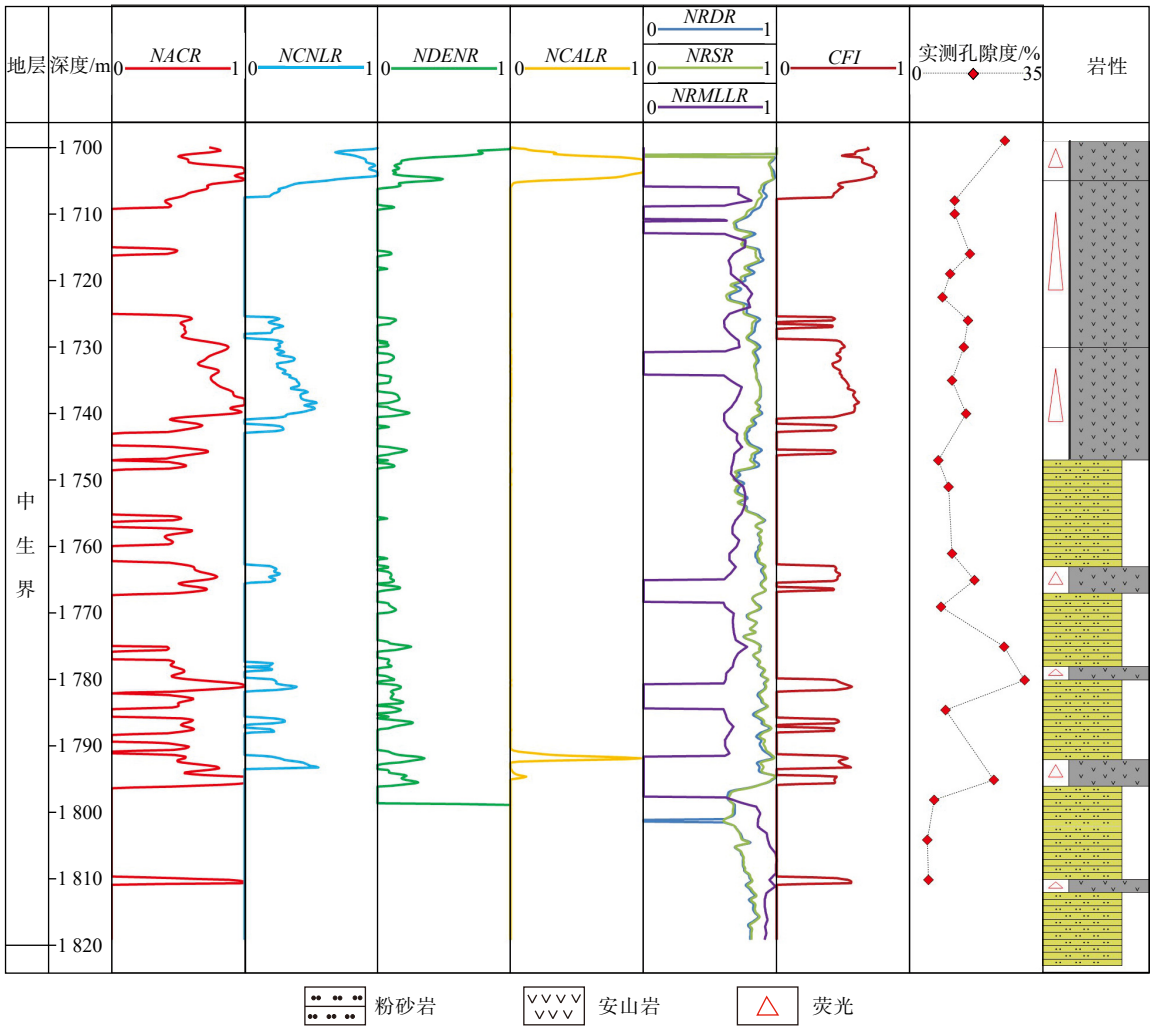


图 7　BN-9 井综合裂缝指数（*CFI*）与实测孔隙度对比图

Fig. 7　Comparison of the comprehensive fracture index (*CFI*) and measured porosity in Well BN-9

线非裂缝因素的干扰，提高了可靠性。

5　中生界火山岩断裂内部结构划分及裂缝预测

对渤南地区中生界火山岩断裂内部结构划分的前提是有效识别损伤带边界，并以此分别划分断核、损伤带和围岩。损伤带边界可以通过裂缝密度（*FD*）来划分，已有的相关研究证明[40-42]*FD* 与 *CFI* 成正相关，因此可以通过统计累计 *CFI* 上升曲率判断损伤带边界位置。但仅靠 *CFI* 无法判断断核位置，需要通过地震的断层解释综合分析判断出断核大致位置（图 8）。

基于 BN-1 井测井数据（BN-1 井缺少 *CAL* 曲线），计算出综合裂缝指数（图 9）。分析表明，*CFI* 曲线高值段与实测孔隙度高值段呈现良好的对应关系，结合成像测井和岩心资料分析，可以较为准确地定位出裂缝发育的空间位置。

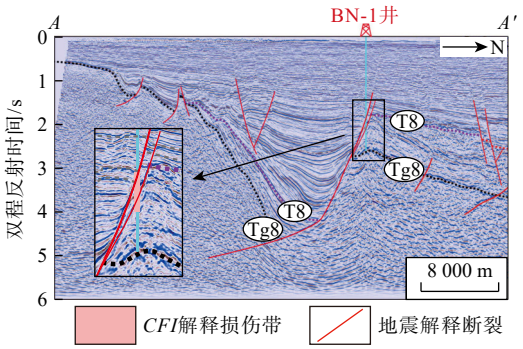


图 8　BN-1 中生界断裂地震剖面解释图（T8，Tg8 分别为中生界顶、底界面，剖面位置见图 1b）

Fig. 8　Seismic-profile interpretation of the Mesozoic fault in Well BN-1

结合地震剖面与测井曲线资料表明，在 BN-1 井中生界火山岩中发育 2 处断核，分别位于 2 575 ~ 2 590 2 675 ~ 2 705 m 范围内。在断核范围内，*AC* 和 *CN* 测井曲线呈现了明显的低值，*DEN* 测井曲线无明显变化，电阻率曲线呈现相对高值，*CFI* 值显著降低。

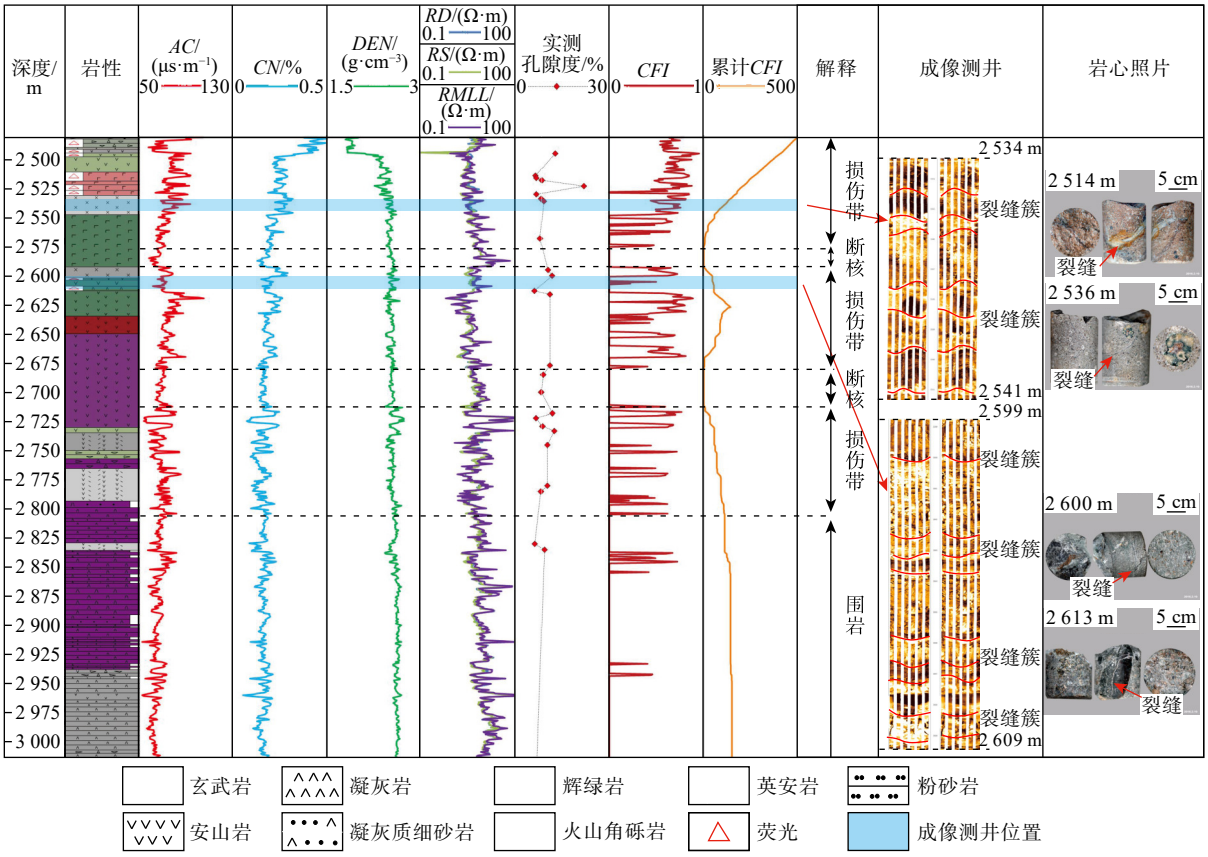


图 9　BN-1 井中生界断裂内部结构划分

Fig. 9　Internal-structure division of the Mesozoic fracture zone in Well BN-1

通过 *CFI* 曲线高值区与成像测井、岩心资料的综合分析，在 BN-1 井中共识别出 3 段损伤带，分别位于：2 483 ~ 2 575，2 590 ~ 2 675，2 705 ~ 2 805 m 深度范围内。损伤带内裂缝发育程度较高，表现为 *AC* 与 *CN* 测井值显著增大、*DEN* 值降低，且电阻率呈现低值响应特征，而 *CFI* 曲线在裂缝密集段呈现连续高值。岩心证据显示，在上述损伤带范围内多个岩心上可见明显裂缝发育，成像测井在划分的损伤带处揭示出多处裂缝簇。

损伤带边界之外则是围岩范围，在围岩中，由于出现裂缝频率降低，各个曲线出现波动频率也会相应减少，*CFI* 高值出现频率减少，因此损伤带边界定量判识可通过累计 *CFI* 曲线梯度分析实现。在 BN-1 井中，以断核为中心向围岩方向构建累计 *CFI* 曲线。随着与断核距离增加，*CFI* 数值逐渐降低，相应地，累计 *CFI* 曲线的增长速率也逐渐衰减。当该梯度衰减至接近围岩中 *CFI* 值的自然波动幅度（即背景变化范围）时，所对应的位置即判定为损伤带边界。

6　结　论

（1）渤南地区中生界火山岩裂缝带的测井响应呈现显著差异。*GR* 和 *SP* 对裂缝响应微弱，难以作为裂缝带位置的判别依据。*AC*、*CN*、*DEN*、*CAL*、*RS*、*RD*、*RMLL* 对裂缝发育段敏感，说明此类参数可作为研究区裂缝识别的依据。

（2）通过渤南地区多测井参数综合分析可准确预测火山岩储层裂缝，有效识别发育较好的裂缝带空间位置。在单一曲线因其自身特征难以区分裂缝响应与非裂缝干扰时，构建多参数融合的 *CFI* 模型，通过 *AC*、*CN*、*DEN*、*RS*、*RD*、*RMLL* 敏感曲线的加权计算，可实现火山岩裂缝有效识别和预测。该模型可以显著降低非裂缝因素干扰的影响，提升裂缝识别的准确度。

（3）结合 *CFI* 以及地震断层解释明确断核位置后，通过累计裂缝综合指数曲线可有效界定断层损伤带的边界，对渤南地区火山岩储层断裂的内部结构和裂缝发育密度进行有效划分。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1]　徐长贵，杨海风，王清斌，等. 火山岩油气藏勘探进展 [J]. 地球科

学, 2025, 50(2): 363-376.
XU C G, YANG H F, WANG Q B, et al. Progress in exploration of volcanic oil and gas reservoirs[J]. Earth Science, 2025, 50(2): 363-376. (in Chinese with English abstract)

[2] 胡见义, 陈英, 郑俊章. 东北亚天然气资源及其发展趋势 [J]. 石油学报, 2003, 24(1): 1-8.
HU J Y, CHEN Y, ZHENG J Z. Natural gas resources and its development trend in Northeast Asia[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)

[3] WANG X, ZENG J H, LIU B, et al. Insights into the wetting mechanisms in low-permeability sandstone reservoirs and its evolution processes: The Shahejie Formation in the Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2025, 171: 107179.

[4] ZHOU X H, WANG D Y, YU H B, et al. Major controlling factors and hydrocarbon accumulation models of large-scale lithologic reservoirs in shallow strata around the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 758-769.

[5] ZHANG X N, YAO Y B, ZHANG G B, et al. Natural fractures in a metamorphic buried hill reservoir, Bozhong 19-6 area, Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 155: 106402.

[6] 陆国超. 渤海湾盆地莱州湾凹陷南斜坡带中生界火山岩储层特征与分类评价 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
LU G C. Characteristics and classification evaluation of Mesozoic volcanic reservoivs in the southern slope of Laizhouwan Sag, Bohai Bay Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese with English abstract)

[7] 单玄龙, 徐长贵, 衣健, 等. 中国近海典型含油气盆地中生代岩浆活动与岩浆岩潜山油气藏 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1773-1787.
SHAN X L, XU C G, YI J, et al. Mesozoic magmatic activities and hydrocarbon accumulations in magmatic buried hills in typical offshore oil and gas basins of China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1773-1787. (in Chinese with English abstract)

[8] 陈秀娟, 冯镇涛, 曾芙蓉, 等. 页岩地层测井岩性识别技术发展现状 [J]. 新疆石油地质, 2024, 45(6): 742-752.
CHEN X J, FENG Z T, ZENG F R, et al. Development status of logging-based lithology identification technology for shale formations[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(6): 742-752. (in Chinese with English abstract)

[9] XU H R, JU W, NIU X B, et al. Prediction of natural fracture in shale oil reservoir based on R/S analysis and conventional logs[J]. Frontiers of Earth Science, 2021, 15(3): 705-718.

[10] YANG C, HOU L H, YANG F, et al. Controlling factors of volcanic hydrocarbon reservoirs in Bohai Bay Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2017, 2(4): 219-228.

[11] YANG T, CUI R, CAO Y C, et al. Characteristics and diagenetic model of hyperpycnite reservoirs in the gentle slope of a lacustrine rift basin: A case study from the Third Member of the Eocene Shahejie Formation, Bonan Sag, Bohai Bay Basin, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2024, 108(11): 2093-2125.

[12] 王文华. 四川盆地西部二叠系火山岩岩性、岩相和储层控制因素研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2024.
WANG W H. Lithology, lithofacies and reservoir control factors of Permian volcanic rocks in western Sichuan Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese with English abstract)

[13] 陈井胜, 李斌, 姚玉来, 等. 辽东北-吉南中生代火山岩地层与辽西义县组的对比 [J]. 地质学报, 2016, 90(10): 2733-2746.
CHEN J S, LI B, YAO Y L, et al. Comparison between Mesozoic volcanic rock strata in northeast of Liaoning-south of Jilin and Yixian Formationg in west of Liaoning[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(10): 2733-2746. (in Chinese with English abstract)

[14] 潘玉啟, 黄志安, 吴子杰, 等. 辽宁阜新地区义县组火山岩特征及喷发旋回划分 [J]. 地质与资源, 2014, 23(增刊1): 21-26.
PAN Y Q, HUANG Z A, WU Z J, et al. Characteristics of volcanic rocks and division of eruption cycles of the Yixian Formation in Fuxin, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2014, 23(S1): 21-26. (in Chinese with English abstract)

[15] 吴庆勋, 王粤川, 韦阿娟, 等. 渤海海域中生代火山岩喷发旋回划分及与油气的关系 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(2): 18-26.
WU Q X, WANG Y C, WEI A J, et al. Division of the Mesozoic volcanic rock eruption cycle and its relationship with oil and gas in the Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 18-26. (in Chinese with English abstract)

[16] 蔡冬梅, 叶涛, 鲁凤婷, 等. 渤海海域中生界火山岩岩相特征及其识别方法 [J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 112-120.
CAI D M, YE T, LU F T, et al. Lithofacies characteristics and identification methods of Mesozoic volcanic rocks in Bohai Sea[J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(1): 112-120. (in Chinese with English abstract)

[17] 岳庆友. 渤中凹陷中生界火山岩成储机理及分布规律研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
YUE Q Y. Formation mechanism and distribution of the Mesozoic volcanic reservoir in Bozhong Sag[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[18] 杨海风, 叶涛, 燕歌, 等. 渤中凹陷及周边地区中生界大中型火山岩油气田成藏条件及模式 [J]. 中国海上油气, 2025, 37(1): 1-12.
YANG H F, YE T, YAN G, et al. Reservoir-forming conditions and models of large-and medium-sized Mesozoic volcanic oil and gas fields in the Bozhong Sag and its surrounding areas[J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37(1): 1-12. (in Chinese with English abstract)

[19] CHOI J H, EDWARDS P, KO K, et al. Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 152: 70-87.

[20] QUEVEDO R, DE ANDRADE T J, SANTOS L, et al. Assessment of fault damage zones in carbonate rocks based on numerical and sensitivity analyses[J]. Tectonophysics, 2023, 864: 230023.

[21] BALSAMO F, CLEMENZI L, STORTI F, et al. Tectonic control on vein attributes and deformation intensity in fault damage zones affecting Natih Platform carbonates, Jabal Qusaybah, North Oman[J]. Journal of Structural Geology, 2019, 122: 38-57.

[22] NUNES K, QUEVEDO R, ROEHL D, et al. Assessment of link-

ing damage zones of geological faults through numerical modeling[J]. Journal of Structural Geology, 2025, 195: 105381.

[23] FOSSEN H, ROTEVATN A. Fault linkage and relay structures in extensional settings: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154: 14-28.

[24] 任梦怡, 范洪军, 陆国超, 等. 渤海莱州湾凹陷南斜坡中生界火山岩储层特征和控制因素 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2025, 55(1): 15-30.
REN M Y, FAN H J, LU G C, et al. Characteristics and controlling factors of Mesozoic volcanic rock reservoir in southern slope of Laizhou Bay Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 15-30. (in Chinese with English abstract)

[25] STERLING J C L J L. Natural fractures in the spraberry formation, Midland Basin, Texas: The effects of mechanical stratigraphy on fracture variability and reservoir behavior[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(3): 505-524.

[26] ZENG L B, LI X Y. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(4): 461-477.

[27] 赖锦, 苏洋, 肖承文, 等. 地球物理测井在地质领域应用经典案例解析 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 279-288.
LAI J, SU Y, XIAO C W, et al. Analysis of typical applications of geophysical well logs in geological fields[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(5): 279-288. (in Chinese with English abstract)

[28] 孟玉净, 陈红汉, 赵彦超, 等. 鄂尔多斯盆地南部泾河油田延长组板内走滑断裂内部结构刻画 [J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2281-2293.
MENG Y J, CHEN H H, ZHAO Y C, et al. Characterization of architecture of intraplate strike-slip faults in Yanchang Formation of Jinghe oilfield in southern Ordos Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2281-2293. (in Chinese with English abstract)

[29] 邓攀, 陈孟晋, 高哲荣, 等. 火山岩储层构造裂缝的测井识别及解释 [J]. 石油学报, 2002, 23(6): 32-36.
DENG P, CHEN M J, GAO Z R, et al. Log response and explanation of structural fractures in volcanic rock reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 32-36. (in Chinese with English abstract)

[30] 刘粤蛟, 赖富强, 徐浩, 等. 基于测井曲线深程度耦合的页岩岩相智能识别方法 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(1): 308-320.
LIU Y J, LAI F Q, XU H, et al. Intelligent identification methods for shale lithology based on the coupling deeply of logging curves[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(1): 308-320. (in Chinese with English abstract)

[31] 张苗. 渤海海域潜山火山岩储层有效性测井评价方法研究: 以M构造为例 [D]. 武汉: 长江大学, 2024.
ZHANG M. Investigation into the Bohai Sea's buried hill volcanic reservoir's efficient logging assessment method: An analysis of the M structure[D]. Wuhan: Yangtze University, 2024. (in Chinese with English abstract)

[32] 蒲俊伟, 罗彤彤, 陈维铭, 等. 利用常规测井曲线辅助探究深层页岩气井产量差异 [J]. 石化技术, 2024, 31(12): 267-269.
PU J W, LUO T T, CHEN W M, et al. Using conventional logging curve to explore the production difference of deep shale gas wells[J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(12): 267-269. (in Chinese with English abstract)

[33] WANG S, WANG G W, ZENG L B, et al. New method for logging identification of natural fractures in shale reservoirs: The Fengcheng Formation of the Mahu Sag, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2025, 176: 107346.

[34] AGUILERA R. Analysis of naturally fractured reservoirs from sonic and resistivity logs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1974, 26(11): 1233-1238.

[35] 王奇. 综合概率指数法识别裂缝型储层 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(1): 134.
WANG Q. Identification of fractured reservoirs by comprehensive probability index method[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 32(1): 134. (in Chinese with English abstract)

[36] 邹雪峰. 碳酸盐岩裂缝识别及定量评价 [D]. 武汉: 长江大学, 2013.
ZOU X F. The fractured carbonate identification and quantitative evaluation[D]. Wuhan: Yangtze University, 2013. (in Chinese with English abstract)

[37] LYU W Y, ZENG L B, LIU Z Q, et al. Fracture responses of conventional logs in tight-oil sandstones: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in Southwest Ordos Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(9): 1399-1417.

[38] 李逸. 测井裂缝识别方法研究及软件开发 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
LI Y. Methodology of fracture identification and software development based on log data[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017. (in Chinese with English abstract)

[39] TOKHMECHI B, MEMARIAN H, NOUBARI H A, et al. A novel approach proposed for fractured zone detection using petrophysical logs[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2009, 6(4): 365-373.

[40] MENG Y J, CHEN H H, LUO Y, et al. Architecture of intraplate strike-slip fault zones in the Yanchang Formation, southern Ordos Basin, China: Characterization and implications for their control on hydrocarbon enrichment[J]. Journal of Structural Geology, 2023, 170: 104851.

[41] RAFIQ A, EATON D W, MCDOUGALL A, et al. Reservoir characterization using microseismic facies analysis integrated with surface seismic attributes[J]. Interpretation, 2016, 4(2): 167-181.

[42] 孟玉净, 骆杨, 赵彦超, 等. 泾河油田走滑断裂带长8–长6段致密砂岩构造成岩作用及控储分析 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(1): 74-89.
MENG Y J, LUO Y, ZHAO Y C, et al. Structural diagenesis and reservoir control analysis of tight sandstone in the strike-slip fault zones of the Chang 8 to Chang 6 members in the Jinghe oilfield[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(1): 74-89. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于常规测井曲线的火山岩裂缝预测：以渤海湾盆地渤南地区中生界为例”

Prediction of volcanic rock fractures based on conventional logging curves: A case study of the Mesozoic in the Bonan area, Bohai Bay Basin

SHAO Zhiyuan[a]，HE Jie[b*]，LIAO Yuantao[b]，TONG Dianjun[b]，REN Jianye[b]，CHEN Wenqiang[a]，WANG Hua[a]

a. School of Resources；b. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

First author，E-mail：2929749542@qq.com

* Corresponding author， E-mail：jiehe19920402@163.com

Abstract：[**Objective**] Tectonic fractures play a significant role in enhancing the physical properties and hydrocarbon productivity of deep volcanic buried-hill reservoirs. Due to their strong heterogeneity, precise characterization of fracture density across different parts of the fault zone is required. In practical production, the high cost of core acquisition and imaging logging data motivates the use of a comprehensive fracture index (*CFI*) calculated from conventional logging curves to delineate the internal structure of fault zones and quantitatively identify fracture density, providing a basis for exploring fractured volcanic reservoirs. [**Methods**] A *CFI* model was constructed for Mesozoic volcanic rocks in the Bonan area of the Bohai Bay Basin using seven logging parameters: Acoustic travel time (*AC*), neutron porosity (*CN*), bulk density (*DEN*), caliper (*CAL*), deep lateral resistivity (*RD*), shallow lateral resistivity (*RS*), and micro-lateral resistivity (*RMLL*). The cumulative *CFI* curve slope was used to define the boundaries of fracture-dense zones, partitioning the fault zone into the fault core, damage zone, and host rock. The damage zone exhibits the highest fracture density, followed by the host rock, while the fault core is nearly fracture-free. [**Results**] In the Mesozoic volcanic rocks of the study area, the seven conventional logging curves show distinct responses in fracture-developed zones: *AC*, *CN*, and *CAL* increase, whereas *DEN*, *RD*, *RS*, and *RMLL* decrease. The *CFI* curve shows a pronounced rise in fracture-rich intervals. Comparison with imaging logs and core data confirms that high *CFI* values correlate with fracture zones. By integrating seismic interpretation to identify the fault core, the distribution of the damage zone and host rock can be delineated, enabling effective fracture prediction in Mesozoic volcanic rocks in the Bonan area. [**Conclusion**] The *CFI* model, derived from logging curves, can effectively quantify the intensity of fracture development in volcanic rocks, locate the downhole spatial distribution of fracture-dense zones, and enable the reliable identification of internal-zone structures via cumulative *CFI* curve analysis.

Key words: volcanic reservoir；Bohai Bay Basin；comprehensive fracture index；logging curve；fracture zone；damage zone；fault core；host rock

Received：2025-03-31；Revised：2025-05-28；Accepted：2025-06-27

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20250144