

松辽盆地深层中-基性火山岩有利相带及 储层“甜点”逐级识别

李 宁^{1,2}, 李瑞磊², 苗 贺², 曹开芳², 田 军²

(1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130061; 2. 中国石化 东北油气分公司 勘探开发研究院, 吉林 长春 130062)

摘要: 松辽盆地深层下白垩统火石岭组中-基性火山岩广泛发育, 岩性-岩相复杂, 储层横向非均质性强, 储层“甜点”识别难, 制约了油气勘探和开发。以查干花地区为例, 研究了松辽盆地深层中-基性火山岩岩相及储层特征, 提出了火山通道、有利岩相、有利岩性及储层甜点识别方法。研究表明: ①火山岩岩相主要为3相6亚相, 优质储层岩性主要为粗粒、细粒凝灰岩和凝灰质砂岩, 在近-中源相带中火山爆发相储层最为发育, 相带控制了有利岩性凝灰岩的分布区域, 物性和含气性是火山岩“甜点”的主要控制因素。②通过分析每个喷发期次的裂缝密度, 结合蚂蚁体与地震数据的叠合剖面, 识别出了不同喷发期次的火山通道, 以判断火山近源相带, 再结合火山机构厚度和能量半衰时属性划分中源与远源相带的边界, 实现储层“甜点”发育区的定性刻画。③为降低地震反演定量预测中-基性火山岩储层的多解性, 优选出低波阻抗表征沉凝灰岩, 低密度表征高核磁孔隙度储层, 低拉梅常数表征气层, 基于此, 在叠前反演密度预测孔隙度数据体的基础上, 逐级剔除干扰沉凝灰岩、低孔隙度层及非气层, 得到较为可靠的火山岩储层“甜点”空间分布预测结果。经验证, 预测结果符合有利相带分布规律, 且与已钻井气层解释结论吻合。应用有利相带定性认识及逐级定量刻画“甜点”空间分布, 部署井取得较好效果, 该方法可在深层火山岩“甜点”分布地震预测中广泛推广。

关键词: 逐级识别; 火山通道; 有利相带; 储层“甜点”; 中-基性火山岩; 松辽盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Stepwise identification of favorable facies belts and reservoir sweet spots of deep intermediate-basic volcanic rocks in the Songliao Basin

LI Ning^{1,2}, LI Ruilei², MIAO He², CAO Kaifang², TIAN Jun²

[1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Northeast Oil & Gas Branch, SINOPEC, Changchun, Jilin 130062, China]

Abstract: Intermediate-basic volcanic rocks are extensively distributed in the deep Lower Cretaceous Huoshiling Formation of the Songliao Basin. However, their intricate lithologies and lithofacies, as well as the strong lateral heterogeneity of their reservoirs, complicate the prediction of reservoir sweet spots, restricting the exploration and exploitation of hydrocarbon resources. Focusing on the Chaganhua area, we investigate the lithofacies and reservoir characteristics of deep intermediate-basic volcanic rocks in the Songliao Basin and develop a methodology for identifying volcanic conduits, favorable lithofacies and lithologies, and reservoir sweet spots within the volcanic rocks. The key findings are as follows. (1) Three facies with six subfacies are primarily identified in the volcanic rocks. High-quality reservoirs predominantly comprise coarse- and fine-grained tuffs and tuffaceous sandstones. Reservoirs of the volcanic explosive facies are the most extensive in the proximal-middle facies belts. The distribution of tuffs with favorable lithologies is governed by the facies belts. Furthermore, the reservoir sweet spots of the volcanic rocks are primarily governed by their physical and gas-bearing properties. (2) For various volcanic eruptive phases, volcanic conduits are identified based on fracture density, along with the superimposed profiles of ant tracking and seismic data. This helps determine the proximal volcanic facies belts. Then, in combination with the thickness of volcanic edifices and the energy

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-05-20。

第一作者简介: 李宁 (1985—), 女, 副研究员, 油气勘探地震地质综合研究。E-mail: 214260630@qq.com。

基金项目: 中国石化集团公司科技部项目 (P21104)。

half-time attribute, the boundaries between middle-distance and distal volcanic facies belts are identified, facilitating the qualitative characterization of areas containing reservoir sweet spots. (3) To minimize the multiplicity of solutions in the quantitative prediction of intermediate-basic volcanic reservoirs using seismic data inversion, we preferentially employ low wave impedance, low density, and low Lamé constant to characterize tuffs, reservoirs with high porosity as indicated by nuclear magnetic resonance (NMR), and gas layers, respectively. Accordingly, based on the porosity data volumes derived from pre-stack density inversion, we eliminate the interference from the sedimentary tuffs, low-porosity layers, and non-gas layers sequentially, obtaining reliable predictions of the spatial distribution of reservoir sweet spots. It is verified that the predicted results align with the distribution pattern of favorable facies belts and agree with interpretations of drilled gas layers. The qualitative identification and stepwise quantitative characterization of the spatial distribution of reservoir sweet spots based on favorable facies belts, have been successfully applied to well emplacement, yielding encouraging outcomes. Therefore, this methodology is highly applicable in the seismic prediction of sweet spot distribution in deep volcanic rocks.

Key words: stepwise identification, volcanic conduit, favorable facies belt, reservoir sweet spot, intermediate-basic volcanic rock, Songliao Basin

引用格式: 李宁, 李瑞磊, 苗贺, 等. 松辽盆地深层中-基性火山岩有利相带及储层“甜点”逐级识别[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 801-815.

DOI: 10.11743/ogg20240316.

LI Ning, LI Ruilei, MIAO He, et al. Stepwise identification of favorable facies belts and reservoir sweet spots of deep intermediate-basic volcanic rocks in the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 801-815. DOI: 10.11743/ogg20240316.

松辽盆地晚侏罗世—早白垩世,受环太平洋板块拼贴和洋壳俯冲作用,火山活动活跃,断陷期主要发育两期火山喷发旋回^[1-2],第一期旋回以火石岭组中-基性火山岩为主,第二期旋回以营城组晚期酸性流纹岩为主,两期火山岩均是东北地区油气勘探开发的主要阵地。早期勘探以营城组酸性流纹岩、凝灰岩为主,由于上覆和下伏地层均为碎屑岩,火山机构包络的地震反射特征易识别,且酸性火山岩物性较好,岩石物理参数差异大,常规地震参数反演即能预测出物性好的储层,单井产量也较高,多口井日均无阻流量达到 $30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。本次研究深层下白垩统火石岭组中-基性火山岩,埋深4 000~6 000 m,喷发强度大、黏度小、流动性强,上覆为下白垩统沙河子组泥岩地层,强反射特征与火山沉积相特征相似,下伏基岩地震反射特征杂乱,与火山岩爆发相反射特征类似,干扰火山机构和岩性、岩相的识别,且中-基性火山岩物性偏差,已部署井单井产量差异大。如何提高单井经济效益,识别和评价中-基性火山岩储层“甜点”,即找到厚度大于20 m且具有产能的气层,是目前勘探开发需解决的首要问题。

近年来关于储层“甜点”的评价思路和技术方法得到较大发展,采用一维测井岩相和二维平面相联合嵌套约束的分级相控叠前高分辨率地震反演预测礁滩灰岩油藏低渗储层“甜点”,采用 90° 相移技术识别河道外形、模型约束波阻抗反演刻画砂体厚度和子波衰减梯度属

性等方法识别鄂尔多斯煤系地层致密砂岩气“甜点”的地震逐级预测技术^[3-5],也带动了火山岩储层“甜点”逐级预测研究方法的改进和不断深入。火山岩储层反演方法和参数在中国各区应用过程中不断优化和发展,刘小平等^[6]应用伽马和深侧向电阻率曲线构建拟声波曲线,将拟阻抗转化为储层参数结果,并利用贝叶斯算法进行多信息的概率计算预测有效储层;郎晓玲等^[7]在松辽盆地营城组火山岩研究中采用地震瞬时相位、瞬时频率以及相干等切片来识别火山相带,并利用地震反演密度参数来预测储层;王玲等^[8]在徐深气田有效储层评价时侧重运用成像测井(FMI)等特殊测井方法来区分岩性,建立了火山岩相地震反射结构和几何形态等以识别火山岩相,联合纵波阻抗和密度建立了岩石物理解释模板来综合预测有效储层的展布;李忠诚^[9]则是运用密度和纵横波速度比联合反演的方法,分机构单元、分门槛值来降低火山岩储层预测的多解性,运用体控反演、密度反演等反演方法预测火山岩岩相和储层;仇鹏等^[10]考虑到火山喷发旋回地层格架和空间叠置关系,提出体控约束下的地质统计学反演方法。

针对本研究区,前期尝试应用了现有多多种方法,但由于火石岭组下伏基岩地震反射杂乱,干扰火山岩地震特征识别,且火山多期多点喷发、叠置连片,导致岩性变化快、预测吻合率低,前期“甜点”储层钻遇率仅能达到30%~40%。据此,本文重新梳理了火山岩储层的主要特征,结合钻井认识,利用宽方位三维地震资料系

统开展火山岩有利岩相、有利岩性及储层“甜点”的逐级分步预测。基于岩相空间识别准确率低的问题,提出先识别多期喷发火山机构的火山通道、再识别近-中源有利相带的方法;为避免沉凝灰岩和熔岩两种岩性对凝灰岩“甜点”预测结果的干扰,采取精细分析岩性特征、分步剔除的技术方案,以提高火山岩“甜点”识别精度,支撑深层火石岭组的勘探增储和开发提产。

1 区域地质背景

研究区位于松辽盆地中央坳陷区南部查干花次凹,在达尔罕断凸带与双坨子低凸起之间,分别经历断陷期、断-拗转换期、拗陷期和反转期4个构造演化阶段。在断陷期岩浆活动强烈,发育火石岭组、营城组2个喷发旋回的火山岩,目的层为火石岭组,历经3期火山喷发作用,与上覆沙河子组泥岩夹薄砂岩和下伏花岗岩、变质岩呈地层不整合接触关系。火石岭组为盆地裂陷期岩浆向断陷边界上涌形成的大规模叠置连片的火山机构,单机构高度几十米到几千米不等,底部直径几百米至几十千米不等。火山岩是本区天然气藏的重要储集层。晚期沙河子组及营城组强烈拉张形成箕状断陷,查干花次凹边界断裂自南向北可分为3段,断裂活动强度由南向北逐渐增强,控制沉积中心由南向

北迁移,在营城组一段(营一段)及沙河子组沉积时期发育该区主力烃源岩地层。营三段沉积时期,岩浆活动较为强烈,以酸性火山岩为主。至登娄库组沉积末期,查干花次凹构造基本定型,沙河子组、营一段烃源岩与火石岭组火山机构鼻状构造侧向对接,有利油气成藏。晚期盆地东部反转挤压抬升,洼陷带及斜坡区改造活动较弱,形成现今东高西低自西的构造格局(图1)。

根据松南断陷火石岭组火山活动规律及已钻井火山纵向相序,查干花地区火石岭时期历经3个期次火山喷发作用:期次Ⅰ主要以溢流相安山岩为主,顶部发育薄层水下爆发相;期次Ⅱ发育厚层水下爆发相凝灰岩、溢流相熔岩夹薄层沉凝灰岩;期次Ⅲ表现明显分带特点,中南部火山喷发处于间歇期,火山喷发能量较弱,发育有火山沉积相沉凝灰岩与水下爆发相细粒凝灰岩,北部火山喷发相对较强,发育厚层水下爆发相凝灰岩。由于火石岭组内幕每个喷发期次的岩性组合存在明显的差异,不同喷发期次的地震反射特征也存在差异,即期次Ⅰ和期次Ⅱ在地震反射特征上表现为中-弱振幅、不连续-空白反射,期次Ⅲ表现为强振幅、连续反射,以C2井与C2-1井的连井地震剖面为例,各期次地震反射特征具有可对比性(图2)。

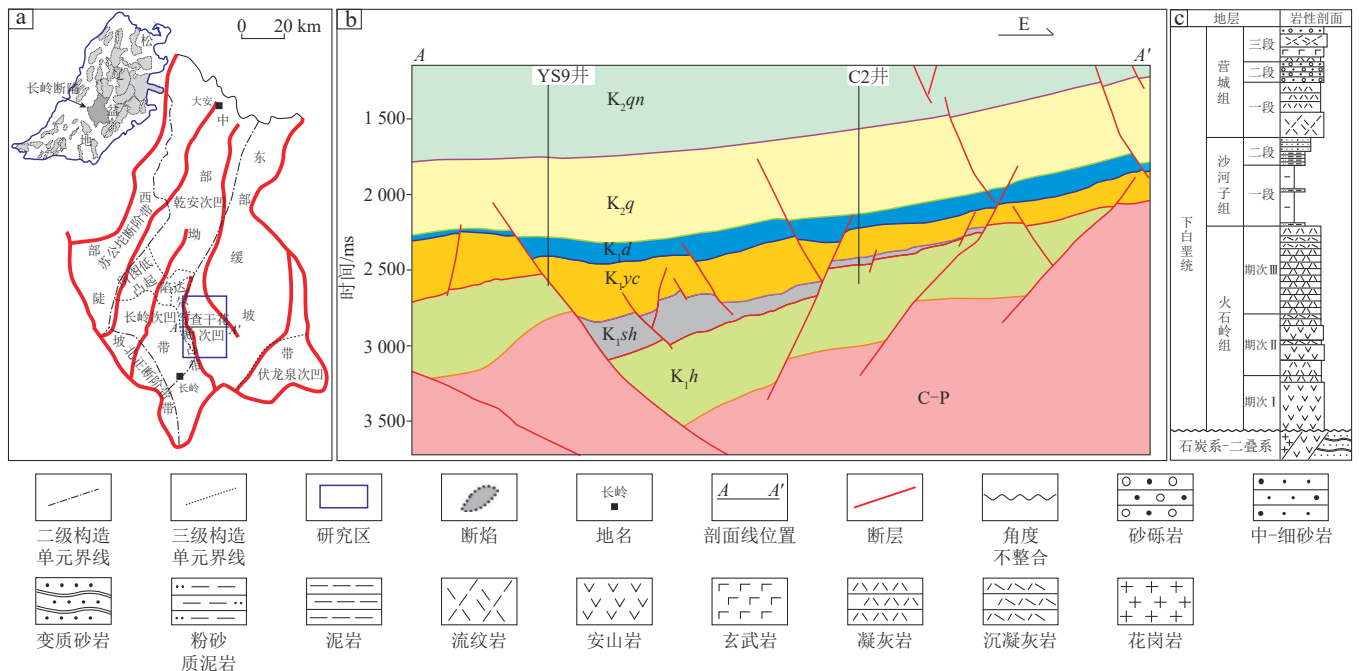


图1 松辽盆地查干花地区构造位置及地层结构(据文献[11]修改)

Fig. 1 Tectonic location and stratigraphic column of the Chaganhua area, Songliao Basin (modified after reference [11])

a. 长岭断陷构造分区及研究区位置; b. 研究区连井地层剖面; c. 断陷层地层综合柱状图

C-P: 石炭系-二叠系; K₁h: 火石岭组; K₁sh: 沙河子组; K₁yc: 营城组; K₁d: 登娄库组; K₂q: 泉头组; K₂qn: 青山口组

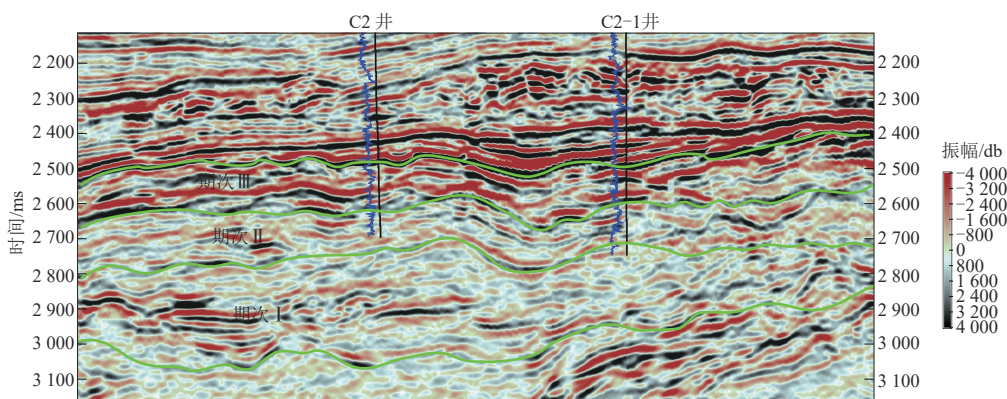


图2 查干花地区火山岩地震剖面

Fig. 2 Seismic cross-section of the volcanic rock in the Chaganhua area

2 中-基性火山岩储层特征

2.1 岩性-岩相特征

准确识别岩性-岩相是火山岩油气藏研究的基础。结合火山岩钻井,在岩心、岩屑、显微薄片观察、测井曲线识别以及地震数据解译等工作的基础上,明确已钻井揭示火山岩相主要包括3相6亚相,即①水下爆发相,包括气携火山碎屑流亚相和水携火山高密度流亚相;②溢流相,包括上部、下部亚相;③火山沉积相,主要为再搬运火山碎屑沉积亚相和含外碎屑火山沉积亚相。从单井测井曲线特征来看,气携火山碎屑流亚相为低伽马值、高电阻率特征,曲线形态呈微齿形,岩性以灰色、浅灰色凝灰岩为主;水携火山高密度流亚相为中-高伽马值、中-高电阻率特征,曲线形态呈高幅指形;含外碎屑火山沉积亚相在本区发育较少,测井曲线为中-低伽马值、低电阻率特征,曲线形态为中幅指形,常与再搬运火山碎屑沉积亚相互层产出。火山沉积相主要发育深灰色、灰黑色沉凝灰岩,从测井曲线特征来看,电阻率整体偏低($<40 \Omega \cdot m$),再搬运火山碎屑沉积亚相为高伽马值、低电阻率特征,曲线以平直、微齿化形态为主;溢流相曲线为低伽马值、中电阻率特征,曲线以平直、箱形为主,岩性以灰色、绿灰色安山岩和紫灰色、深灰色玄武岩为主(表1)。

按岩石结构和成因的差异将研究区火石岭组火山岩岩性划分为3大类:火山熔岩、火山碎屑岩以及沉火山碎屑岩。其中火山熔岩是熔浆喷溢至地表经“冷凝固结”而成的岩石,具有火山熔岩结构,岩石类型主要为安山岩和玄武岩;火山碎屑岩是火山作用形成的各种火山碎屑堆积物经过“压实固结”而成的岩石,主要

包括粗粒、细粒凝灰岩,存在外来碎屑混入而形成的凝灰质砂岩;各种火山碎屑堆积物经过“压实固结”的沉火山碎屑岩类主要为沉凝灰岩。

以录井、岩心及薄片鉴定等资料为依据,在曲线标准化的基础上,选取对岩性反映敏感的测井曲线自然伽马测井值(GR)、深侧向电阻率(LLD),应用数理统计的方法建立岩性与测井数据之间的关系,建立岩心对应的测井响应特征识别图版(图3)。总体而言,火山熔岩(玄武岩、安山岩)为低伽马值、低电阻率特征,沉火山碎屑岩(沉凝灰岩)表现为低电阻率特征,火山碎屑岩(细粒、粗粒凝灰岩和凝灰质砂岩)为中-高伽马值、高电阻率特征。

2.2 火山岩储层物性特征

研究区183块岩心的薄片和孔、渗观察及扫描电镜等资料显示,火石岭组发育脱玻化微孔、基质溶蚀孔及微裂缝储集空间,孔、缝分布不均,非均质性强。岩心实测孔隙度分布在0.25%~7.47%,以低孔隙度为主,平均2.30%,中值1.65%,渗透率分布在 $(0.001 \sim 61.900) \times 10^{-3} \mu m$,以特低渗为主,平均 $0.610 \times 10^{-3} \mu m$,中值 $0.030 \times 10^{-3} \mu m$ 。钻井证实火石岭组火山岩孔隙度大于3%且渗透率大于 $0.01 \times 10^{-3} \mu m$ 的为储层,属于中-低孔、低-特低渗致密储层(图4)。

火山岩储集空间的形成和演化受原生和后期改造等多种因素控制,其中,火山机构控制有利相带的展布,优势岩性和岩相控制有利储层的纵向分布,成岩作用、风化淋滤溶蚀作用以及构造作用是影响和控制松南地区火石岭组火山岩储层发育的主要因素。明确火山岩岩性、岩相与储层物性之间的关系,是定量预测火山岩储层的基础。为避免个别高值和低值影响,统计查干花火石岭组火山岩不同岩性孔隙度中值分布,可

表 1 查干花地区火石岭组火山岩相测井曲线特征

Table 1 Logging curve characteristics of volcanic facies in the Huoshiling Formation , Chaganhua area

岩相	亚相	测井相			典型测井曲线特征	岩性特征
爆发相(水下)	气携水下热碎屑流亚相	GR/API 20 — 220	深度/m 4 600 4 610 4 620	校正 岩性 剖面 LLD/(Ω·m) 1 — 10 000	低 GR, 高 LLD, 曲线形态为微齿, 常与水携火山密度流亚相伴生产出	浅灰色、灰色凝灰岩, 局部含火山角砾, 发育粒序层理
	水携火山密度流亚相				中-高 GR, 中-高 LLD, 曲线形态为高幅指形, 常与热碎屑流亚相互层产出	灰色、深灰色凝灰岩, 夹薄层沉凝灰岩条带, 发育层理构造
火山沉积相	含外碎屑火山沉积亚相	GR/API 20 — 220	深度/m 4 450 4 460	校正 岩性 剖面 LLD/(Ω·m) 1 — 10 000	中-低 GR, 低 LLD(<40 Ω·m), 曲线形态为中幅指形	深灰色-灰黑色凝灰质砂岩、凝灰质泥岩, 局部, 块状构造, 内部结构较均一
	再搬运火山碎屑沉积	GR/API 20 — 220	深度/m 4 520 4 550 4 580	校正 岩性 剖面 LLD/(Ω·m) 1 — 10 000	中-高 GR, 低 LLD(<40 Ω·m) 特征, 曲线形态为微齿-近平滑形态, 局部夹薄层爆发相	深灰色-灰黑色沉凝灰岩, 粒度细, 块状构造, 内部结构较均一
溢流相	上部	GR/API 20 — 200	深度/m 4 580 4 600	校正 岩性 剖面 LLD/(Ω·m) 1 — 10 000	低 GR, 中 LLD 特征, 曲线形态为低幅指化	气孔玄武岩、安山岩, 常呈薄层产出
	下部				低 GR, 中 LLD 特征, 曲线形态为箱形	玄武岩、安山岩, 岩性均一, 与顶底围岩突变接触

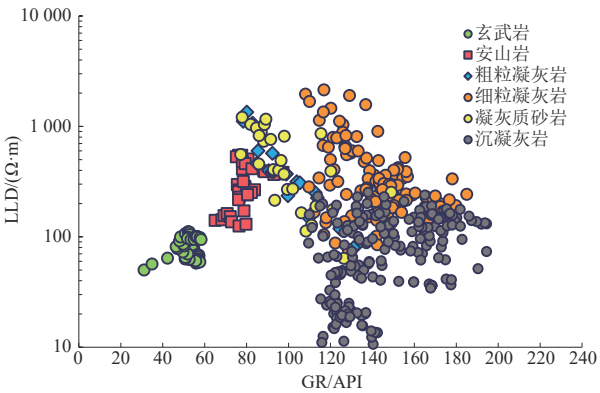


图 3 查干花地区火山岩岩心不同岩性自然伽马值-电阻率交会图

Fig. 3 Cross plot of natural gamma-ray value vs. resistivity of different lithologies of volcanic cores in the Chaganhua area

见优质储层岩性主要为粗粒、细粒凝灰岩和凝灰质砂岩,其中凝灰岩粒度与储层物性具良好的相关性,粒度

越粗,物性越好,极细粒凝灰岩、熔岩和沉凝灰岩总体表现物性偏差(图 5a),钻测井上未见含气显示,为非储层岩性;统计不同岩相孔隙度大于 3 % 的储层占比直方图可知,近喷发源爆发相的储层占比最高(图 5b)。

3 储层空间分布逐级识别方法

由于火山岩岩性复杂,火山岩各类岩性之间、火山岩与碎屑岩之间均存在弹性参数特征叠置,直接通过地震反演岩性或储层的弹性参数存在多解性,因此需要结合火山机构有利相带的认识进行精细分析、逐级预测。根据岩性、岩石组构及成因的差异,火山岩相通常分为爆发相、溢流相、侵出相、火山通道相和火山沉积相等五大相^[12]。研究区主要钻遇爆发相、溢流相和

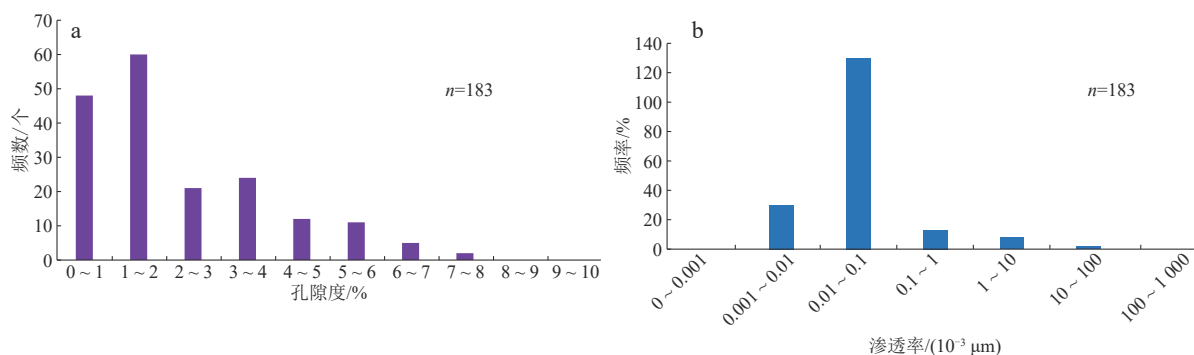


图4 查干花地区火石岭组火山岩孔隙度(a)与渗透率分布频率直方图(b)

Fig. 4 Histograms showing the porosity (a) and permeability (b) of volcanic rocks in the Huoshiling Formation, Chaganhua area

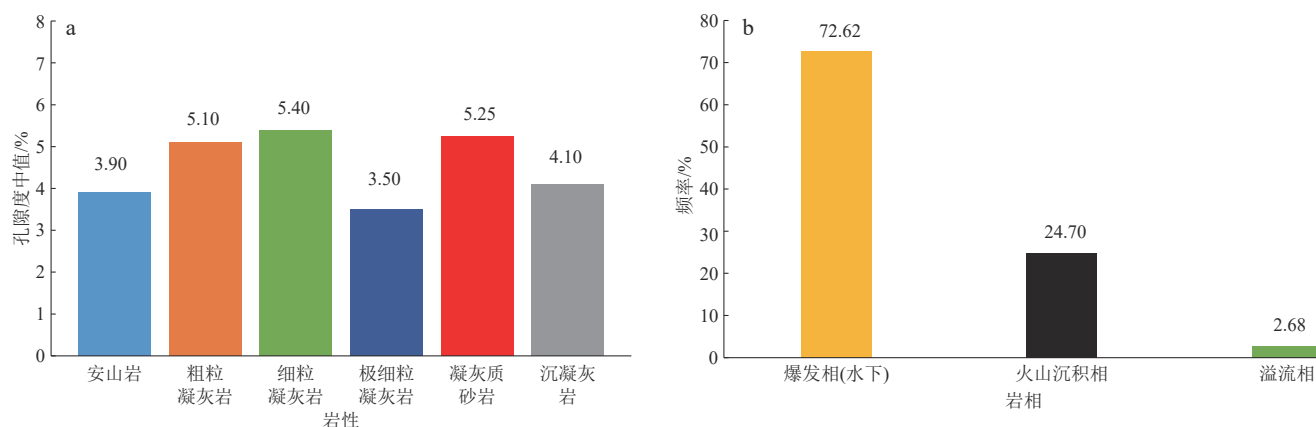


图5 查干花地区不同岩性孔隙度中值分布频率直方图(a)及储层不同岩相分布频率直方图(b)

Fig. 5 Histograms showing the median porosity of different lithologies (a) and the proportions of varying lithofacies in reservoirs (b) of Chaganhua area

火山沉积相,爆发相与基岩、溢流相与烃源岩、火山沉积相与砂泥岩互层的地震反射特征均具有相似性,火山机构内岩相纵、横向均存在变化,已钻井证实直接解释追踪岩相的空间分布多解性、不确定性强。已有大量研究表明^[13-15],近-中源相带是储层发育的有利相带,刻画近-中源有利相带是开展定量预测储层的前提条件。因此,在火山岩勘探开发实践中,一般先进行火山机构识别,按照火山机构与火山喷发中心的距离将其划分为近源相带、中源相带和远源相带,在机构内再进行相带的识别。刻画火山岩相带的关键有两个方面:①能否判断火山喷发中心在哪里;②需要判断火山岩近-中源相带与远源相带的边界。火山机构喷发中心识别主要依靠火山通道,但火山通道在火山机构中占比低,钻井较难钻遇,一般利用火山通道在三维地震资料上有规律错断、裂缝密度高等特点进行识别。火山通道确定近源相带的中心,近-中源相带与远源相带边界则主要依据火山机构厚度、地震反射特征及优选地震属性进行判断。在有利相带基础上开展相关地震反演方法定量预测有利岩性,与有利相带相互验证,

从而降低岩性预测的多解性,随后在有利岩性范围之内再开展物性和含气性的预测,得到更加可靠的储层预测结果。基于此,在研究区逐级开展了火山通道识别、有利相带识别、有利岩性识别和储层“甜点”识别4项研究。

3.1 火山通道识别

火山通道识别是识别火山喷发中心和近源相带的基础。火山通道是岩浆穿过地下岩层经火山口或溢出口流出地面的通道,位于整个火山机构的下部和近中心部位,是岩浆向上运移到达地表过程中滞留和回填在火山通道中的火山岩类组合。地震剖面上火山通道通常呈垂向“烟囱”状杂乱异常条带,地震同相轴连续错断,通道内部呈中-低频、中-弱振幅。近火山通道区域,顶界可见断续强反射,内部可见杂乱、丘状反射。在远通道地区,顶界表现为平行、连续强反射,内部为空白、亚平行反射。目前国内外很多专家、学者对利用地震资料进行火山通道刻画识别进行了研究,多应用地层切片结合地震几何类属性进行通道识别,如相干

属性、分频相干、方差体等^[16-18],如何贤英等^[19]通过波阻抗反演进行火山通道刻画;曹磊等^[20]基于低频数据体、纹理对比属性和最大振幅属性进行属性融合进行火山通道的纵横向识别。以地震属性为主的火山通道识别技术在持续更新发展。

基于三维地震数据,确定研究区火山机构的喷发期次的顶、底面,计算各喷发期次的残余厚度;在期次顶、底面之间提取三维地震蚂蚁体属性,在此基础上计算裂缝密度属性。蚂蚁追踪技术是一种模仿蚁群寻找食物的仿生算法,这种追踪能突出地震数据的不连续性,是一种强化断裂特征的新属性,通常用于快速了解区域内断缝的发育和展布情况,火山机构中应用蚂蚁追踪技术能体现机构内部的杂乱反射的不连续特征,尤其是火山通道。火山通道内裂缝发育,因此基于蚂蚁体进一步计算各喷发期次裂缝密度分布,在裂缝密度分布图上火山通道表现为高值且聚焦的特征。

从最晚期开始,依次把本期次裂缝密度与早期裂缝密度进行叠合显示,进而得到火山通道综合评价平面图。火山喷发3个期次,则第Ⅲ期综合评价图为喷发前、第Ⅰ期、第Ⅱ期和第Ⅲ期的裂缝密度叠合图;第Ⅱ期综合评价图为喷发前、第Ⅰ期和第Ⅱ期的裂缝密度叠合图;第Ⅰ期综合评价图为喷发前地层的裂缝密度与第Ⅰ期的裂缝密度叠合图。结合火山残余厚度中心,本期及早期裂缝密度叠合且裂缝密度比较强的部位,即判断为火山通道。为进一步降低多解性,将每个火山通道与地震纯波-蚂蚁体属性叠合剖面进行对比分析,以确定火山通道,图6为火

山通道地震识别流程。

以期次Ⅰ火山通道预测为例,期次Ⅰ的岩浆从基底开始向上涌,火山通道到达期次Ⅰ地层内为止。由此可以看出,期次Ⅰ的火山通道在基底和期次Ⅰ内均应有响应,因此将两个裂缝密度图叠合,可得到期次Ⅰ的火山通道预测图(图7),依据基底与期次Ⅰ裂缝密度叠合图可以判断叠合部位聚焦的裂缝密度高值点,可能为火山通道。

蚂蚁追踪数据体与地震数据进行剖面叠加利于判断是否为断层,以及火山通道纵向延伸到哪个期次。将裂缝密度叠合平面图预测的裂缝密度高值点,与地震数据-蚂蚁体属性叠合剖面进行对比分析,确定图8a左侧方框内主要是断层,图8b剖面由南向北裂缝密度高值密集圈分别为期次Ⅱ、期次Ⅲ以及期次Ⅰ的通道。

3.2 有利相带识别

火山岩相的识别对厘清火山就位环境、火山地层划分以及火山岩储层的时空分布具有重要意义,火山岩储层物性、储集空间类型特征和变化规律主要受到火山岩岩相的控制,不同岩相储层特征可能存在很大差异,前人已就火山岩岩相的识别做过大量的工作,提出不同的分类方案^[21-24],地震方法在火山岩岩相识别中发挥着重要的作用。唐华风等多位学者对火山岩岩相地震特征及对储层的影响进行解译,建立了松辽盆地、辽河盆地、准噶尔盆地、四川盆地等不同地区火山岩岩相识别模式,总结了火山岩岩相的地震研究方法^[25-32],为火山岩研究提供了良好的借鉴。

研究区火石岭组火山岩主要钻遇爆发相、溢流相

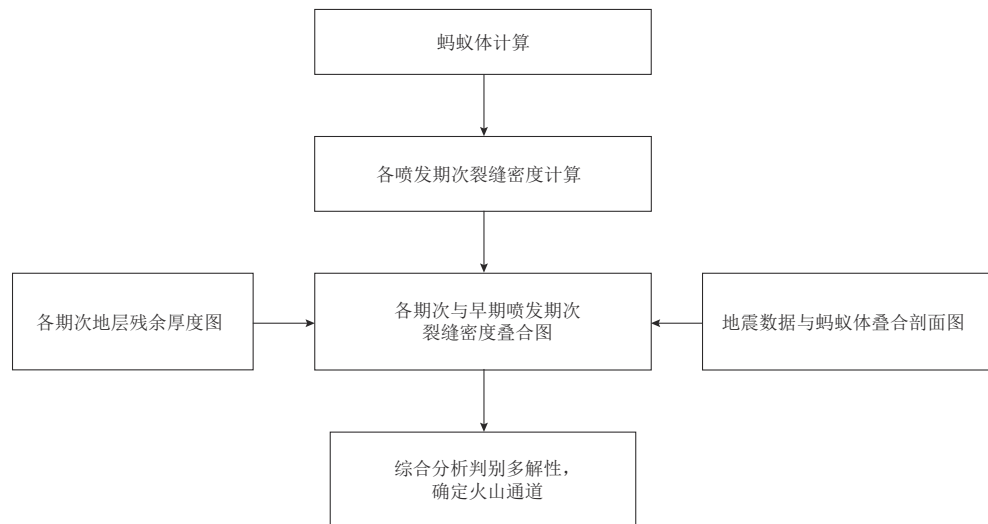


图6 查干花地区火山通道地震识别流程图

Fig. 6 Flow chart showing the seismic identification of volcanic conduits in the Chaganhua area

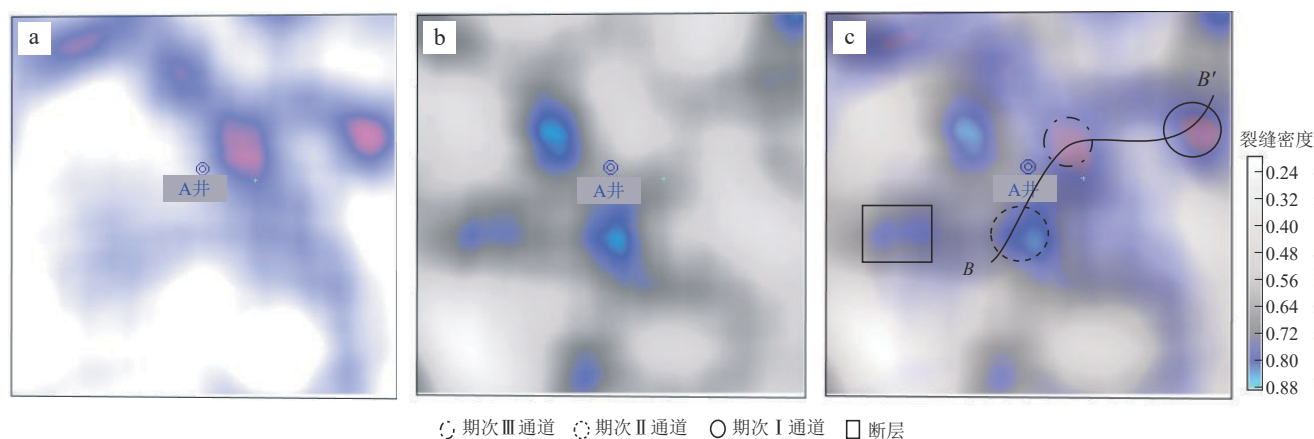


图7 查干花地区期次 I 裂缝密度综合评价

Fig. 7 Maps showing the predicted fracture density of volcanic eruption phase I in the Chaganhua area

a. 基底裂缝密度; b. 期次 I 裂缝密度; c. 基底与期次 I 裂缝密度叠合图

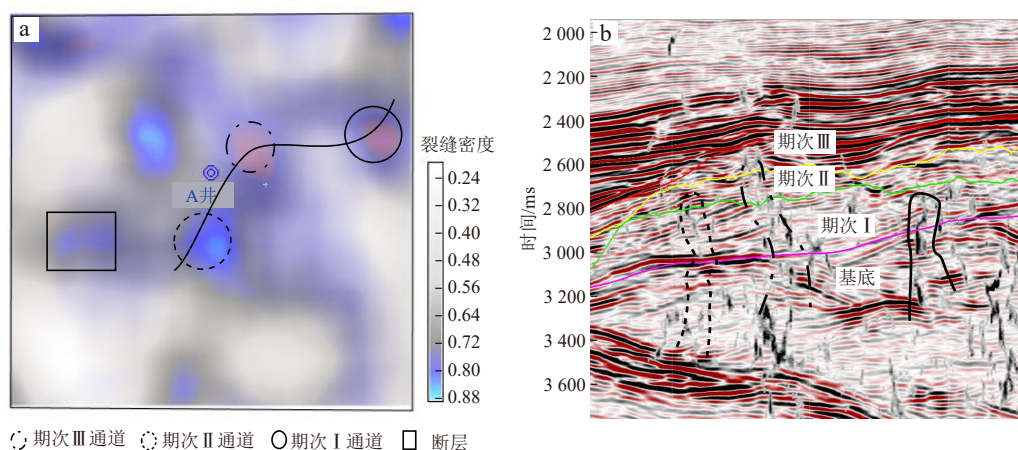


图8 期次 I 火山通道预测平面图(a)及地震剖面与蚂蚁体属性叠合剖面(b)

Fig. 8 Planar map showing the predicted volcanic conduits (a) and the interpretation profile (b)

和火山沉积相,但火山岩相纵、横向叠置,空间上对岩相边界难以量化分析,单层岩相对应地震反射特征横向追踪变化快,预测多解性强。因此,依据地震解释通常将火山机构分为3种主要相带,即近源相带、中源相带和远源相带。相带分布控制着岩相的分布,近源相带靠近火山通道,以爆发相为主,存在溢流相带,地震剖面上主要为高频、杂乱弱反射特征;中源相带以火山爆发相和火山沉积相为主,夹少量溢流相,爆发相占比高,主要地震反射特征为中-高频率、蠕虫状-亚平行中强反射,远源相带火山沉积相占比高,地震反射特征接近沉积岩,一般呈中-低频、平行-亚平行强反射特征。

在火山机构无钻井时,近-中源有利相带刻画主要依赖地震反射特征和地震属性,钻井后可以依据取心和测井进一步标定。火山通道所处位置是判断近源相带的基础,火山通道结合地震杂乱反射特征能够

大致判断近源相带边界。近-中源相带边界对储层认识影响不大,但中、远源相带边界是界定储层发育区的关键,只依据反射特征难以准确识别,因此优选能量半衰时地震属性结合火山机构的残余厚度进行判断。能量半衰时属性主要反映的是地震波能量的变化,一般用来指示沉积环境和岩性岩相的变化,用于识别浊积岩等致密砂岩^[33-34]。火山岩沉积速度较沉积岩高造成火山机构顶包络地震反射能量强、而火山作用导致爆发相地震反射呈杂乱弱反射特点,因此在能量半衰时属性上存在一定差异,同时火山喷发过程中火山物质堆积在火山口附近,近火山口火山岩地层厚度大,因此将二者结合能够作为判断中源与远源相带边界的主要依据。

针对火山机构A提取火山机构残余厚度图以及能量半衰时平面属性,依据上节火山通道判识方法,判断火山通道位于井口南部,能量半衰时值小,为近源相

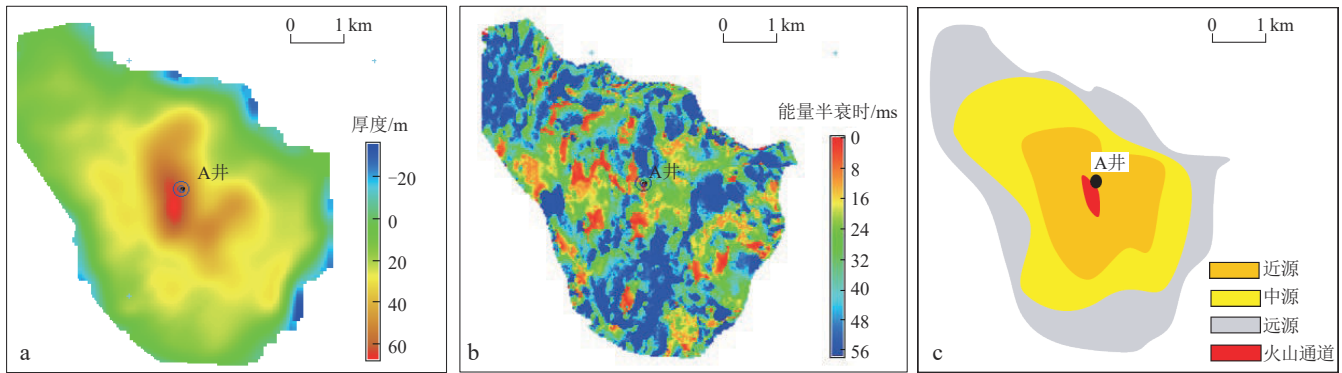


图9 查干花地区火山机构相带划分平面图

Fig. 9 Maps showing the facies belts of volcanic edifices in the Chaganhua area

a. 火山机构等厚图; b. 能量半衰时属性平面图; c. 相带划分平面图

带;机构地层厚度占比一半以上且能量半衰时值小,为中源相带;外围则为远源相带(图9)。

3.3 有利岩性识别

火山岩有利相带识别为寻找储层提供了方向,但仅仅为定性预测结果。为了定量预测储层边界,需要开展岩石物理分析,优选储层敏感参数进行地震反演。火山岩不同岩性骨架差异大导致弹性参数特征存在差异,影响储层识别,因此在进行火山岩油气藏研究时需首先分析火山岩不同岩性弹性参数特征。考虑到地震反演的分辨率有限,将测井曲线识别的各类岩性参照图3岩心交会认识和岩性类别归属进行粗化分类,将自然伽马值小于80 API的玄武岩和安山岩归类为熔岩类,将电阻率小于40 $\Omega \cdot m$ 的沉凝灰岩和极细粒凝灰质岩性归为沉凝灰岩类,粗粒凝灰岩、细粒凝灰岩和凝灰质砂岩归为凝灰岩类,具体分类标准见表2。

钻井证实查干花地区凝灰岩类是主要储层,沉凝灰岩类物性较差,不具备储集能力。通过岩石物理分析,以粗化分类的岩性分析弹性参数交会特征,不同岩性波阻抗与纵/横波速度比交会图(图10)显示,沉凝灰岩类纵波阻抗低,而熔岩与凝灰岩波阻抗高,二者叠置严重,直接将凝灰岩储层从岩性中区分出来难度较大,但可以先开展叠后波阻抗反演来预测沉凝灰岩分布,再在预测储层物性过程中根据熔岩致密性特

点去除熔岩。

3.4 储层“甜点”识别

物性和含气性是表征储层的关键,然而火山岩多期喷发和复杂岩性造成了单步反演的多解性。杨晓利等^[29]提出迭代低频确定性反演和相控地质统计学反演两步法串联工作流程,能解决南堡凹陷2号构造多期火山岩与储层互层沉积模式下隐蔽性油藏岩性识别问题,胡佳等^[30]在松辽盆地王府断陷火山岩储层预测中在有利相带识别的基础上采用了拟声波波阻抗反演预测储层的思路。研究区已钻井分析表明,火山岩波阻抗对物性并不敏感,井控程度也不满足统计学反演的要求,无法直接借鉴现有方法。通过分析,密度与核磁测井解释的有效孔隙度存在负相关关系,是表征物性的敏感参数。去除沉凝灰岩(黑色)与熔岩(绿色)后,凝灰岩的核磁孔隙度与密度线性关系良好(图11),说明如果能去除沉凝灰岩和熔岩干扰,低密度即能表征凝灰岩储层物性条件好。密度是火山岩储层“甜点”的关键参数。

不考虑沉凝灰岩,剩余岩性通过参数交会分析和优选对比,拉梅常数(Lamé constant)对储层含气性较为敏感(图12a为拉梅常数与密度交会图,色标为含水饱和度),含水饱和度越低即含气饱和度越高,低拉梅常数和低密度联合能够表征火山岩“甜点”。将凝灰岩分为储层和非储层,当储层含气时定义为储层,否

表2 查干花地区岩性划分标准
Table 2 Criteria for lithology division in the Chaganhua area

粗化岩类	岩性	测井曲线划分依据
熔岩类	玄武岩、安山岩	GR<80 API
凝灰岩类	粗粒凝灰岩、细粒凝灰岩、凝灰质砂岩	GR>80 API, LLD>40 $\Omega \cdot m$
沉凝灰岩类	沉凝灰岩、极细粒凝灰岩	LLD<40 $\Omega \cdot m$

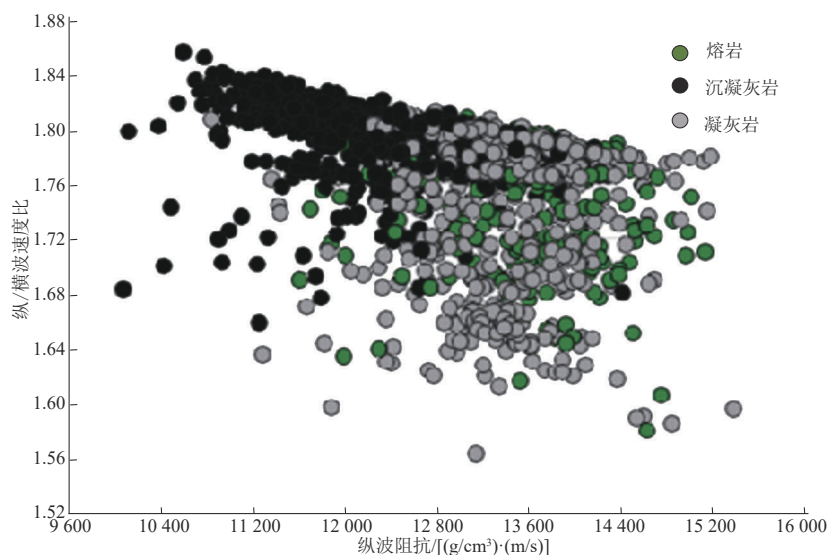


图10 查干花地区不同岩性纵波阻抗与纵/横波速度比交会图

Fig. 10 Cross plot of P-wave impedance vs. P- to S-wave velocity ratio for different lithologies in the Chaganhua area

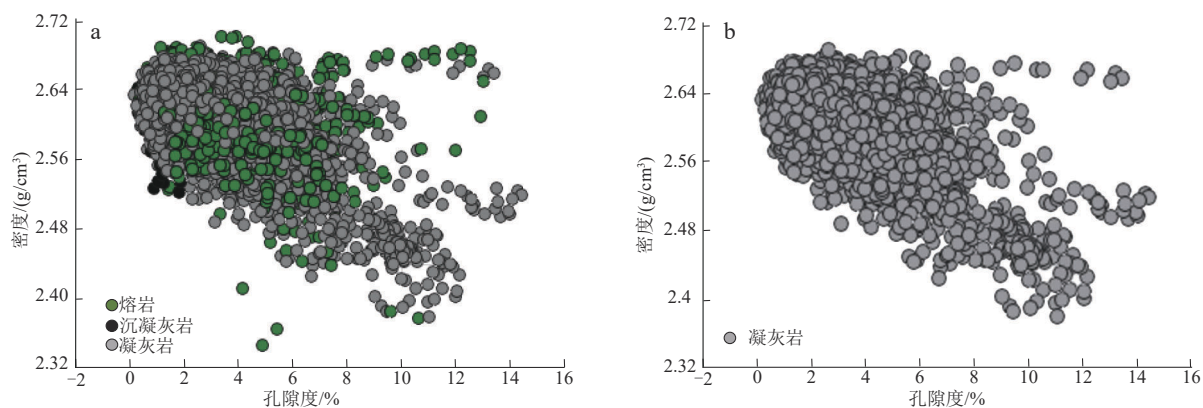


图11 查干花地区有效孔隙度与密度交会图

Fig. 11 Cross plots of effective porosity vs. density in the Chaganhua area

a. 全部岩性; b. 凝灰岩

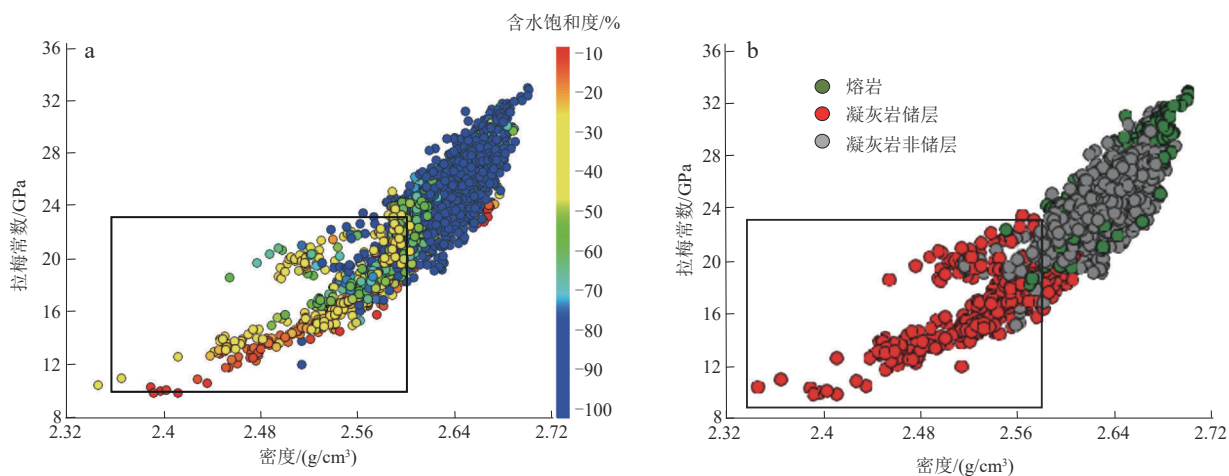


图12 查干花地区拉梅常数与密度交会图

Fig. 12 Cross plots of the Lamé constant vs. density in the Chaganhua area

a. 拉梅常数与密度对含水饱和度的敏感性; b. 拉梅常数与密度对岩性的敏感性
(图中黑框区域表示含水饱和度小于62%,即含气饱和度大于38%的火山岩储层。)

则为非储层,进一步分析剩余岩性储层的敏感弹性参数(图12b为拉梅常数与密度交会图,色标为岩性),凝灰岩储层(红色)表现为低拉梅常数和低密度的特点,而熔岩(绿色)则与致密的凝灰岩(灰色)一样,表现为密度高、拉梅常数高的特点。此步不仅可以通过拉梅常数和密度高值剔除非储层,而且可去除岩性和物性预测中与凝灰岩叠置的熔岩。在物性预测的基础上,先剔除沉凝灰岩,再通过叠前参数反演得到的高拉梅常数,剔除熔岩和凝灰岩非储层层,即能够得到储层“甜点”空间分布。

4 应用效果

研究区火石岭组地层由盆地裂陷期的3期火山作用形成,表现为多点喷发、火山机构之间相互叠置,火山岩相相变快的特点。不同火山岩相带的地震反射特征存在差异,近源喷发以弱振幅、中-高频率、中弱连续-杂乱为主,远源喷发以强振幅、中低频率、连续为主。根据反射特征提取地震能量半衰时属性突出火山岩相带间的差异性,结合火山通道刻画,实现火山岩相带的预测。图13a为火石岭组火山岩相带平面分布图,图中红色为预测的火山通道,橘黄色为近源相带,黄色为中源相带,灰色为远源相带,在C2井区存在两个火山通道,控制整个C2井区的物源,多点喷发相互叠置导致井区内的火山岩相以中源相为主。近、中、远源相带在地形差异、喷发方向等因素的影响下表现出横向非均质性。

岩石物理分析表明,纵波阻抗是区分储层岩性与

非储层岩性的重要参数,密度是区分高孔隙和低孔隙储层的敏感参数,拉梅常数是区优质储层含气与不含气的特征参数,通过叠前三参数反演可以得到纵波阻抗、密度、拉梅常数体,三者综合应用可逐步剔除非储层干扰,进而预测火山岩“甜点”。图14为过C2井分步反演的剖面,a图为过C2井波阻抗反演剖面。图中沉凝灰岩表现为低纵波阻抗特征,其余高纵波阻抗区为凝灰岩类和熔岩类,反演预测结果与井点实钻岩性认识吻合,能够反映出低阻抗沉凝灰岩;b图为过C2井密度反演剖面,可见反演预测气层箭头标识处实际井上钻遇为沉凝灰岩、非气层;c图为剔除沉凝灰岩后的孔隙度反演剖面,孔隙度主要通过图10密度与孔隙度负相关关系转换而来,剔除沉凝灰岩之后,预测高孔隙储层与测井解释气层基本吻合;d图为在c图基础上再剔除熔岩、非气层后的反演剖面,即在前一步基础上剔除密度大于 2.61 g/cm^3 和拉梅常数大于 24.5 GPa 的非储层部分,剩余部分为储层“甜点”,反演剖面展示从绿色到红色表征储层物性依次变好,C2井测井解释气层与反演剖面上预测为黄色和红色的“甜点”层均符合。

为了验证反演结果的可靠性,提取反演结果的“伪井”曲线分析(图15)。储层“甜点”曲线与测井解释结论对比,火石岭顶部薄层预测结果偏厚,分析主要受限于地震资料的分辨率,除此之外,整体上反演结果的高值对应测井解释气层,4 600 m深度以下的主力储层“甜点”段预测基本对应。

提取该期次的储层“甜点”平面图(图13右),有效储层主要在C2井周呈近南北走向条带状分布,在C2-1井周围也有小面积分布,符合近-中源有利相带储层发育的规律,结合相带边界和“甜点”预测结果,部署近南北向水平井1口,水平井气层钻遇率达到76%,验证了逐级预测方法的可靠性。

5 结论

1) 采用裂缝密度高值密集圈特征与蚂蚁体地震叠合剖面联合方法,排除断裂或其他干扰因素,实现了多期火山喷发时不同期次火山通道的识别,降低了识别的多解性。以火山通道识别为基础,运用火山机构残余厚度和能量半衰时属性识别火山近-中源有利相带边界,为寻找火山岩有效储层奠定了基础。

2) 通过分析研究区岩性-物性-含气性弹性参数特征,优选敏感地震属性及反演方法,分步剔除干扰沉

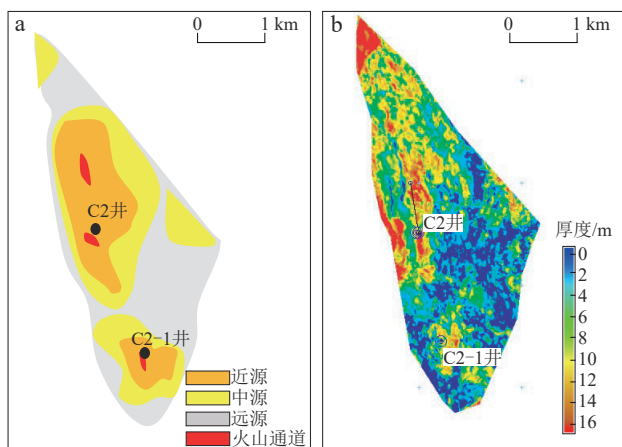


图13 查干花地区火山岩相带预测(a)及火山岩“甜点”预测平面图(b)

Fig. 13 Maps showing predicted volcanic facies belts (a) and reservoir sweet spots (b) of volcanic rocks in the Chaghanhua area

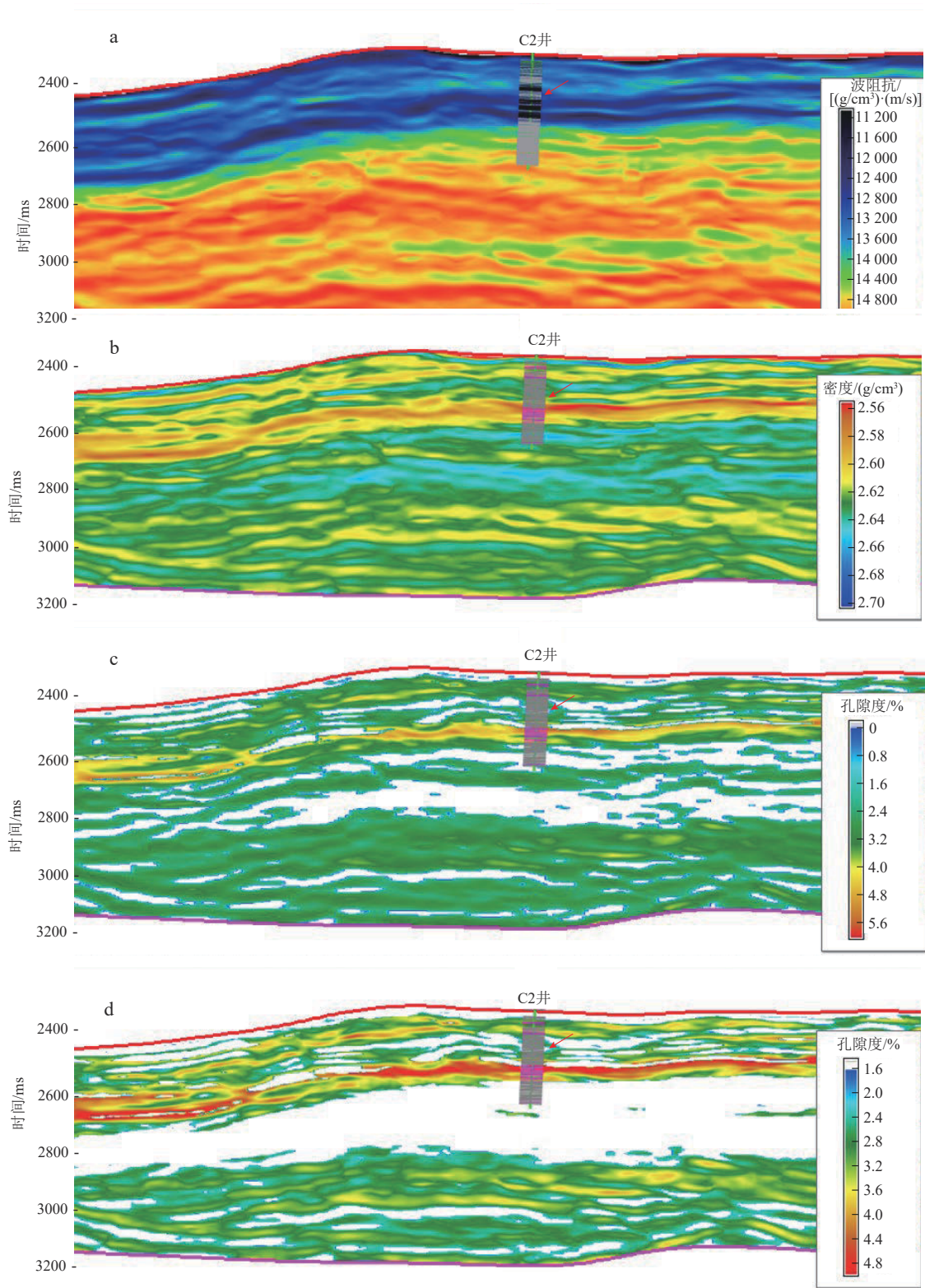


图14 查干花地区过C2井叠前分步反演剖面

Fig. 14 Stepwise pre-stack inversion profiles crossing well C2 in the Chaghanhua area

- a. 叠前同时反演纵波阻抗剖面,井点处为依据岩性粗化的解释结论,其中黑色为沉凝灰岩、灰色为凝灰岩、绿色为熔岩;b. 叠前同时反演密度剖面,井点处为测井气层解释结论,玫红色为气层;c. 剔除沉凝灰岩干扰后的孔隙度剖面;d. 剔除致密层后的火山岩“甜点”剖面

凝灰岩、低孔隙度致密层、熔岩和非气层,逐级聚焦火山岩甜点,能够得到较为可靠的火山岩储层“甜点”空

间分布预测结果,符合近-中源相带控制有利岩性凝灰岩分布、储层发育的认识,与已钻井气测解释结果较

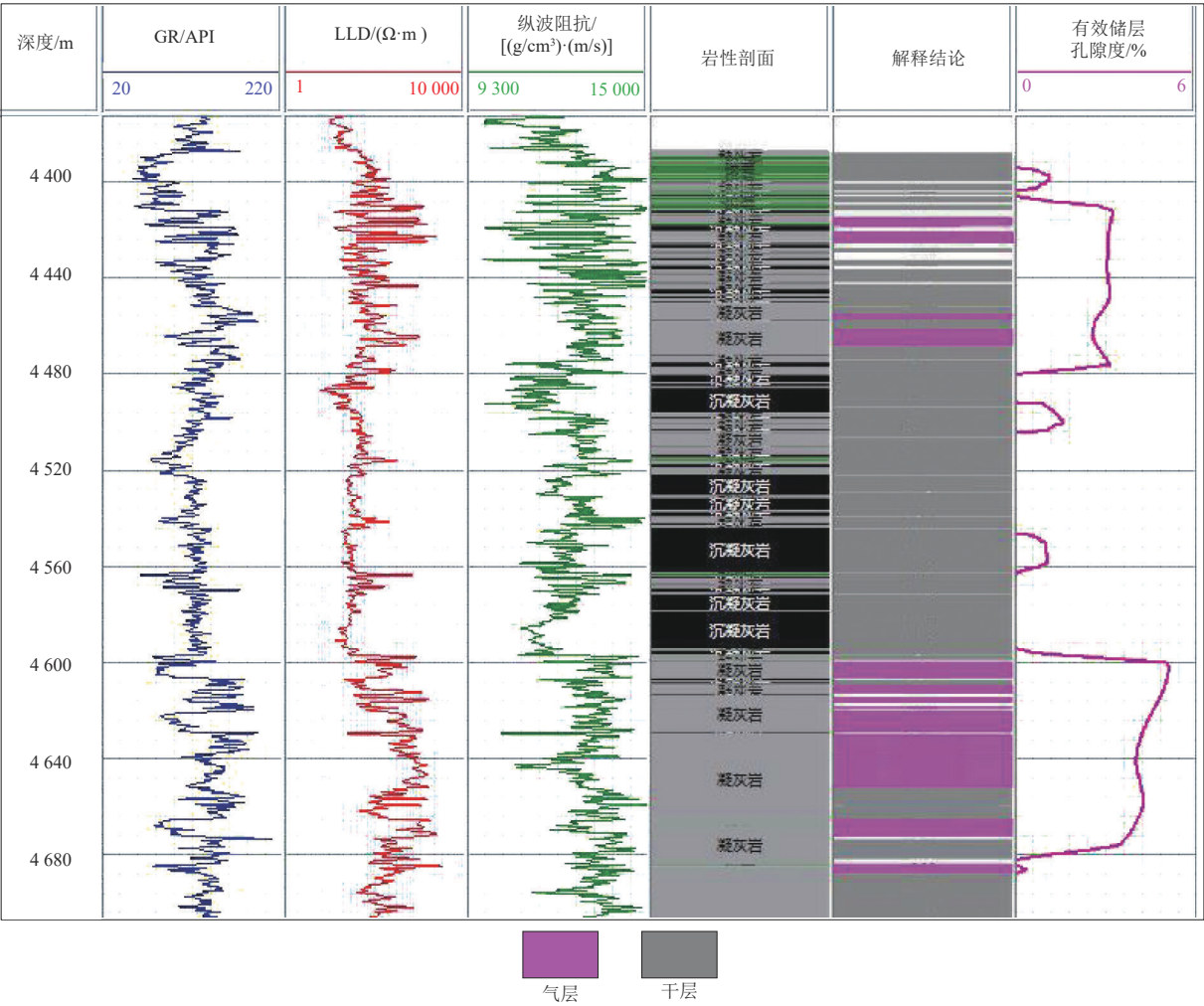


图 15 查干花地区 C2 井反演结果分析

Fig. 15 Inversion result analysis of well C2 in the Chaganhua area

为吻合。

3) 地震属性定性预测有利相带,逐级反演剔除干扰,能定量预测火山岩厚气层“甜点”,基本满足勘探开发需求。但逐级预测过程中仍然存在3个方面的多解性:①现有火山机构的厚度是残余厚度,依据其和能量半衰时识别的有利相带边界存在多解性,需要结合构造演化和剥蚀量恢复才能使其更加精确;②火山岩岩性较为复杂,预测过程中将岩性粗化为三类进行预测,但沉凝灰岩与凝灰岩之间过渡岩性难以辨别,弹性参数特征与“甜点”部分叠置,非气层较难完美剔除;③现有预测用到的叠后、叠前参数反演方法均为确定性反演方法,不足以预测薄层、薄互储层,因此要提高火山岩薄层、薄互储层预测精度,寻找适用于火山岩的高分辨率预测方法是进一步攻关的方向。

参 考 文 献

[1] 李瑞磊,杨立英,朱建峰,等. 松辽盆地南部断陷层火山岩储

层特征及油气成藏主控因素[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 100-111.

LI Ruilei, YANG Liying, ZHU Jianfeng, et al. Volcanic reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation control factors of rift depressions in southern Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 100-111.

[2] 衣健,王璞珺,李瑞磊,等. 松辽盆地断陷层系地震火山地层学研究:典型火山岩地震相与地质解释模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(3): 715-729.

YI Jian, WANG Pujun, LI Ruilei, et al. Seismic volcanostratigraphy of the Songliao Basin, Early Cretaceous: Typical volcanic seismic facies and geological interpretation pattern [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44 (3): 715-729.

[3] 郭飞,李黎,董政,等. 海上少井条件下低渗薄礁滩灰岩储层甜点定量解释——以珠江口盆地A油田为例[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(2): 381-391.

GUO Fei, LI Li, DONG Zheng, et al. Quantitative interpretation of sweet spots in low-permeability limestone reservoirs in thin reef beach with few offshore wells: A case study of A oilfield in Pearl

- River Mouth Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(2): 381-391.
- [4] 刘玲, 王琳霖, 吴疆, 等. 鄂尔多斯盆地南部彬长区块上石盒子组7段储层识别与预测[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1124-1135.
- LIU Ling, WANG Linlin, WU Jiang, et al. Reservoir identification and prediction of He 7 member in Binchang Block, southern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1124-1135.
- [5] 李国斌, 张亚军, 谢天峰, 等. 煤系地层致密砂岩气甜点区地震逐级预测——以鄂尔多斯盆地东南缘下二叠统山西组2³亚段为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 34-42.
- LI Guobin, ZHANG Yajun, XIE Tianfeng, et al. Seismic stepped prediction technology for tight sandstone gas sweet spot in coal measure strata: A case study of the submember 2³ of the Lower Permian Shanxi Formation along the southeastern margin of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5): 34-42.
- [6] 刘小平, 杨晓兰, 曾忠玉, 等. 多参数联合反演在火成岩储集体预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 44-49.
- LIU Xiaoping, YANG Xiaolan, ZENG Zhongyu, et al. Application of multi-parameter joint inversion in prediction of igneous reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(1): 44-49.
- [7] 郎晓玲, 韩龙, 王世瑞, 等. XB地区火山岩岩相划分及储层精细刻画[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(2): 272-277.
- LANG Xiaoling, HAN Long, WANG Shirui, et al. Lithofacies classification and reservoir delineation for volcanic rock in XB area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(2): 272-277.
- [8] 王玲, 张研, 戴晓峰, 等. 徐深气田徐深9井区火山岩气藏有效储层识别方法[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 741-747, 767.
- WANG Ling, ZHANG Yan, DAI Xiaofeng, et al. Identification of effective volcanic gas reservoir in the block of Xushen-9 Well, Xushen Gas Field[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(5): 741-747, 767.
- [9] 李忠诚. 火山岩储层变参数门槛值体控联合反演新方法[J]. 特种油气藏, 2015, 22(3): 55-57.
- LI Zhongcheng. New approach of joint inversion of data volume control by threshold value of variant parameters in volcanic rock reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(3): 55-57.
- [10] 仇鹏, 孔丽娜, 李道清, 等. 基于体控建模的内幕型火山岩气藏有效储层预测——以准噶尔盆地五彩湾凹陷火山岩气藏为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 48-55.
- QIU Peng, KONG Lina, LI Daoqing, et al. Prediction of net pay zones in volcanic reservoirs with inner structures based on rock-mass controlled modeling: A case study of volcanic gas reservoirs in the Wucaiwan sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 48-55.
- [11] 单玄龙, 牟汉生, 刘玉虎, 等. 湖盆水下喷发火山岩相类型、特征与储集意义——以松辽盆地南部查干花地区白垩系为例[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(4): 719-730.
- SHAN Xuanlong, MU Hansheng, LIU Yuhu, et al. Subaqueous volcanic eruptive facies, facies model and its reservoir significance in a continental lacustrine basin: A case from the Cretaceous in Chaganhua area of southern Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 719-730.
- [12] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(5): 805-812.
- WANG Pujun, WU Heyong, PANG Yanming, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2006, 36(5): 805-812.
- [13] 陈树民, 姜传金, 张元高, 等. 盆内火山岩反射地震响应及对油气藏分布的多尺度预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 190-198.
- CHEN Shumin, JIANG Chuanjin, ZHANG Yuangao, et al. Seismic response to intrabasinal volcanic rock reflection and multi-scale prediction of hydrocarbon reservoir distribution[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2014, 33(5): 190-198.
- [14] 唐华风, 边伟华, 王璞珺, 等. 盆地火山岩相分类和模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(06): 1651-1671.
- TANG Huafeng, BIAN Weihua, WANG Pujun, et al. Classification and model of volcanic facies in the basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1651-1671.
- [15] 张姣, 辛朝坤, 张军勇. 火山喷发机构、期次及其控藏作用——以松辽盆地北部莺山凹陷营一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 291-299.
- ZHANG Jiao, XIN Chaokun, ZHANG Junyong. A study on volcanic eruption edifices and stages and their control over hydrocarbon accumulation: A case study of the first member of the Yingcheng Formation in Yingshan Sag, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 291-299.
- [16] 于孝玉, 阮宝涛, 王志文, 等. 火山岩气藏火山口多信息识别技术及应用[J]. 物探化探计算技术, 2011, 33(4): 351-357.
- YU Xiaoyu, RUAN Baotao, WANG Zhiwen, et al. Multi-information identification technique of crater and its application to volcanic gas reservoirs[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 33(4): 351-357.
- [17] 鲁银涛, 王彬, 吕福亮, 等. 南海西北部火山岩地震属性特征及发育模式[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2407-2410.
- LU Yintao, WANG Bin, LYU Fuliang, et al. Seismic attributes and evolutionary models of volcanic rocks in northwest part of South China Sea[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2407-2410.
- [18] 刘学通, 周学锋, 刘传奇, 等. 中心式火山通道边界精细识别技术研究——以渤海A油田为例[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(1): 342-346.
- LIU Xuetong, ZHOU Xuefeng, LIU Chuanqi, et al. Accurate boundary recognition research of central volcanic conduit: An example from Bohai A oilfield[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(1): 342-346.
- [19] 何贤英, 刘勇, 许学龙, 等. 西泉地区石炭系火山岩储层主控因素及有利储层预测[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3): 42-51.

- HE Xianying, LIU Yong, XU Xuelong, et al. Controlling factors of Carboniferous volcanic reservoirs and favorable reservoir prediction in Xiquan area, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(3): 42-51.
- [20] 曹磊, 蔡峰. 基于地震属性融合技术的火山通道识别研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 559-564.
- CAO Lei, CAI Feng. Recognition research of volcanic conduit based on seismic attribute fusion technology [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 559-564.
- [21] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4): 449-456.
- WANG Pujun, CHI Yuanlin, LIU Wanzhu, et al. Volcanic facies of the Songliao Basin: Classification, characteristics and reservoir significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(4): 449-456.
- [22] 舒萍, 丁日新, 曲延明, 等. 徐深气田火山岩储层岩性岩相模式[J]. 天然气工业, 2007, 27(8): 23-27.
- SHU Ping, DING Rixin, QU Yanming, et al. Lithologic and lithofacies patterns of volcanic reservoirs in Xushen Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(8): 23-27.
- [23] 孙圆辉, 宋新民, 冉启全, 等. 长岭气田火山岩岩性和岩相特征及其对储集层的控制[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(1): 68-73.
- SUN Yuanhui, SONG Xinmin, RAN Qiquan, et al. Lithologic and lithofacies characteristics of volcanic rock and their control over reservoirs, Changling Gasfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(1): 68-73.
- [24] 赵耀, 潘虹, 骆飞飞, 等. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层特征及质量控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1129-1140.
- ZHAO Yao, PAN Hong, LUO Feifei, et al. Characteristics and quality determinants of Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche fault zone, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1129-1140.
- [25] 曹鉴华, 姜传金, 赵福海, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷丰乐地区深层营城组有利火山岩储集体预测[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 520-525.
- CAO Jianhua, JIANG Chuanjin, ZHAO Fuhai, et al. Volcanic reservoir prediction of Yingcheng Formation in Fengle area, Xujiaweizi fault depression, northern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 520-525.
- [26] 王岩泉, 胡大千, 蔡国刚, 等. 辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 896-904.
- WANG Yanquan, HU Daqian, CAI Guogang, et al. Characteristics and controlling factors of Cenozoic volcanic reservoirs in Liaohe Basin, NE China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 896-904.
- [27] 徐敏, 梁虹, 邓绍强, 等. 四川盆地二叠系火山岩地震响应特征及分布规律[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 27-32.
- XU Min, LIANG Hong, DENG Shaoqiang, et al. Seismic response characteristics and distribution of Permian volcanic rocks in Sichuan basin [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 27-32.
- [28] 唐华风, 王璞珺, 姜传金, 等. 松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 530-536.
- TANG Huafeng, WANG Pujun, JIANG Chuanjin, et al. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(2): 530-536.
- [29] 唐华风, 胡佳, 李建华, 等. 松辽盆地断陷期火山岩典型地震相的地质解释[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(5): 1075-1084.
- TANG Huafeng, HU Jia, LI Jianhua, et al. Geological significances of typical seismic facies of volcanic rocks of the rifted period in Songliao Basin, NE China [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(5): 1075-1084.
- [30] 于宝利, 刘新利, 范素芳, 等. 火山岩相地震研究方法及应用[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(2): 264-266.
- YU Baoli, LIU Xinli, FAN Sufang, et al. Seismic technique and application of volcanic rock facies [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(2): 264-266.
- [31] 李希元, 景田, 吴昊. 火山岩的地震波场特征及其岩相的识别方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(2): 121-126.
- LI Xiyuan, JING Tian, WU Hao. Identifying method of the seismic wave field characteristics and their lithofacies for the volcanic rocks [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 121-126.
- [32] 陈骁, 何青林, 冉崎, 等. 四川盆地二叠系火山岩地震相特征及识别[J]. 天然气工业, 2019, 39(2): 28-36.
- CHEN Xiao, HE Qinglin, RAN Qi, et al. Features and recognition for seismic facies of Permian volcanic reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(2): 28-36.
- [33] 张营革. 能量半衰时属性在浊积岩储层预测中的应用研究[J]. 石油物探, 2013, 52(6): 662-668.
- ZHANG Yingge. The application of energy half-time attribute to turbidite reservoir prediction [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(6): 662-668.
- [34] 郭迎春, 张军华, 刘磊, 等. 能量半时地震属性的诠释与应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 746-751.
- GUO Yingchun, ZHANG Junhua, LIU Lei, et al. The annotation and application of energy half-time attribute [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 746-751.

(编辑 张 晟)