

P1井区石炭系岩相带地震识别及预测技术研究

王若羽

中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营

收稿日期: 2025年6月4日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月23日

摘 要

P1井区石炭系储层作为准噶尔盆地西北缘重点勘探层系, 受火山岩相带横向变化快、储层非均质性强影响, 油气藏预测精度亟待提升。文章针对这一难题, 基于高分辨率三维地震资料, 结合钻井、测井相及岩石物理分析结果, 建立石炭系火山岩岩相测井-地震响应模板, 明确其不同岩相带地震反射特征; 在地球物理特征识别基础上, 进行多属性井震相关性分析, 在工区内识别出近火山口相、溢流相及火山沉积相3类优势相带。本次研究实现了对岩相带空间展布的高精度预测, 显著提高了识别与预测的准确性和可靠性, 为石炭系下步勘探方向提供了重要的技术范式。

关键词

准噶尔盆地, 石炭系, 火山岩相

Seismic Identification and Prediction Technology of Carboniferous Lithofacies Belts in P1 Well Block

Ruoyu Wang

China Petrochemical Shengli Oilfield Branch Institute of Geophysical Exploration, Dongying Shandong

Received: Jun. 4th, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 23rd, 2025

Abstract

The Carboniferous reservoirs in the P1 well block, as a key exploration target in the northwestern margin of the Junggar Basin, exhibit rapid lateral variations in volcanic lithofacies and strong reservoir heterogeneity, leading to an urgent need for improved hydrocarbon prediction accuracy. To address this challenge, this study utilizes high-resolution 3D seismic data combined with drilling, logging facies, and petrophysical analysis to establish a logging-seismic response template for

Carboniferous volcanic lithofacies, clarifying the seismic reflection characteristics of different lithofacies belts. Based on geophysical feature identification, multi-attribute seismic-well correlation analysis was conducted, identifying three dominant lithofacies belts in the study area: proximal crater facies, effusive facies, and volcanic sedimentary facies. This research achieves high-precision spatial prediction of lithofacies distribution, significantly enhancing identification accuracy and reliability, and provides an important technical paradigm for further exploration of the Carboniferous system.

Keywords

Junggar Basin, Carboniferous, Volcanic Lithofacies

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国火山岩油气藏的不断勘探与开发，火山岩油气藏的基础研究和勘探开发方法技术取得了很大进步[1]-[5]。准噶尔盆地车排子地区石炭系广泛发育火山岩油藏，目前已在胜利西部探区取得良好钻探效果，相继上报地质储量，潜在资源量超过 15×10^8 t，表明石炭系仍将是盆地西北缘地区今后的重点勘探层系之一。前人研究发现，在盆地西北缘火山岩岩性、岩相决定了储层的发育程度和规模[6]-[10]，多口井钻遇凝灰岩储层，日油峰值高。因此，寻找有利岩相成为勘探工作的重点。

P1 井区石炭系作为准噶尔盆地西北缘的重要勘探层系，目前勘探程度相对较低。区内火山岩储层具有显著的“岩性控储、岩相控产”特征，其中凝灰岩、安山岩、玄武岩及火山角砾岩等多类岩性均已发现工业油气流。该区经历了多期次、多方式的火山喷发活动，加之后期强烈的构造改造，造成岩性岩相

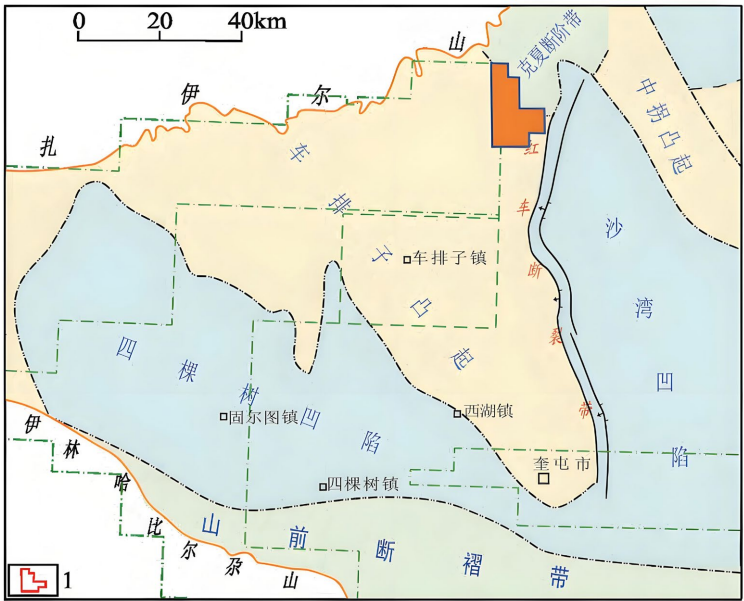


Figure 1. Structural position map of Chepai area
图 1. 车排子地区构造位置图

纵横向变化剧烈,储层非均质性突出,给有利储层预测带来了巨大挑战[11]-[13]。在此背景下,深入开展火山岩岩相展布规律研究,不仅能为储层精细预测提供理论依据,更对该区火山岩油藏的高效勘探开发具有重要指导意义[14]-[18]。

2. 研究区概况

车排子地区属于准噶尔盆地西部隆起的次一级构造单元,地理位置处于新疆克拉玛依市和沙湾县,一级构造单元属准噶尔盆地西部隆起,包括红车断裂带和车排子凸起东部。其东面以红车断裂带为界与沙湾凹陷及中拐凸起相接,南面以艾-卡断裂为界与四棵树凹陷相接,西北侧为扎伊尔山,北面与克-夏断褶带相接(图 1)。从平面形态上看,车排子凸起呈倒三角形,其主体走向为北西-南东向。该凸起具有不平衡隆升特点,在西北部扎伊尔山前隆起最高,向东部、南部隆起幅度逐渐降低,其东南至奎屯-安集海一带逐渐隐伏消失。P1 井区构造上位于车排子凸起东北部,钻井揭示该区石炭系主要发育火山岩与沉积岩两大类岩性。其中,火山岩类以火山角砾岩、安山岩、玄武岩及凝灰岩为主,沉积岩类则主要包括泥岩、沉凝灰岩和凝灰质泥岩,展现了典型的火山-沉积岩互层特征。

3. 火山岩岩相识别

3.1. 火山岩性岩相研究流程

本次研究拟结合丰富钻井资料及前人认识成果,重点借助地震资料开展岩相划分。划分火山岩岩相的具体步骤是,首先进行单井岩性岩相解释,然后在此基础上进行地震相标定分析,总结地震相特征,根据地震属性及地震相结合的方法优先圈画出火山口相,再依据岩性岩相组合和地震相依次外推圈画近源相、远源相和混源相。

3.2. 火山岩性岩相理论模型

王璞珺等在其编著的《盆地火山岩》一书中阐述了火山岩相的分布模式,该观点是据多个盆地火山岩研究的结果而后又改进提出的。本工区与之情况相似。根据岩性划相,将火山岩相划分为火山通道相、爆发相、喷溢相、侵出相和火山沉积相等几类,对于在纵向剖面上对单个火山岩体火山相的划分有十分重要的意义。另外,平面划相是根据火山机构分布层次进行划分,火山岩相在平面上可划分为火山口相、

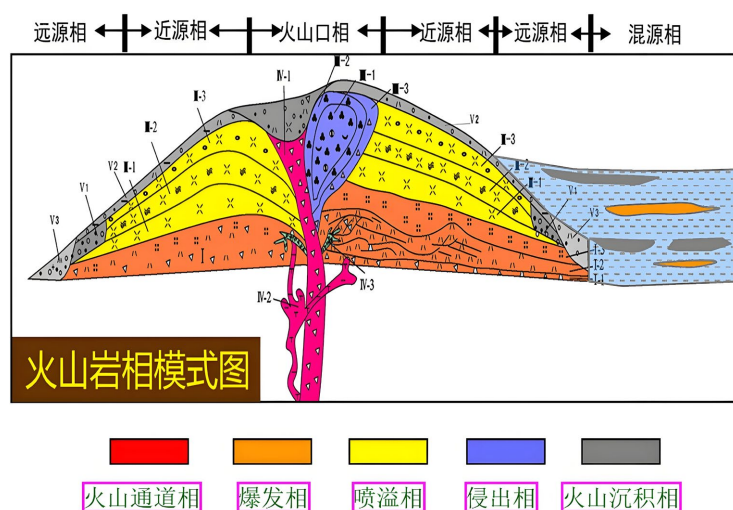


Figure 2. Model map of volcanic rock facies (modified by Wang Pujun)
图 2. 火山岩岩相模式图(据王璞珺改)

Table 1. P1 well area Carboniferous lithology classification statistics tablet
表 1. P1 井区石炭系岩性分类统计表

火山机构相带	基本岩石类型	典型井
近火山口相	火山角砾岩	P664 P66 P675 P744 P745
源溢流相	安山岩	P675 P66 P745 P106 P668 P666 P661 P746 P674 P675
远源溢流相	玄武岩、凝灰岩	P674 P742 P61 P63 P655 P687 P690 P684 P662 P743 P742 P747
混源相	泥岩	P67 P671 P669 P676 P688 P638 P68
	沉凝灰岩	P746 P753 P687

近源相、远源相和混源相(图 2)。基于火山机构的岩相划分方法划分出 4 个大相(王璞珺)，综合统计认为近源部位的物性更好。

3.3. P1 井区火山岩岩性岩相分类

P1 井区石炭系地层发育三类岩性，分属不同相带：火山碎屑岩 - 爆发相、火山熔岩 - 近源溢流相、远源溢流相、沉积岩 - 碎屑岩沉积相。基于火山机构的岩相划分方法划分出 4 个大相。火山岩画相典型岩性相标志如下：

- 近火山口相标志：火山角砾岩、侵入岩。
- 近源溢流相：安山岩。
- 远源溢流相：玄武岩、凝灰岩。
- 混源相：沉凝灰岩、砂泥岩等碎屑沉积岩。

3.4. P1 井区单井岩性统计及平面分布

以作为相标志的岩性岩相作为单井主体相，对石炭系岩性分类统计(表 1)，开展平面分析，明确 P1 井区石炭系岩性平面分布特征(图 3)，研究区火山岩主要分布在工区东部。

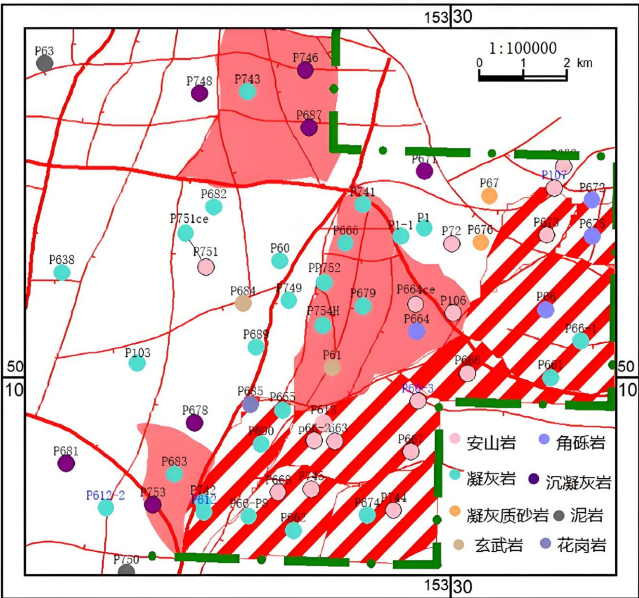


Figure 3. P1 well area Carboniferous lithology distribution map
图 3. P1 井区石炭系岩性分布图

3.5. 井震结合 - 明确单井主体相

对于不同组段的火山岩沉积，并非一种岩性，而是不同岩性的组合，不同的岩性组合与火山岩相具

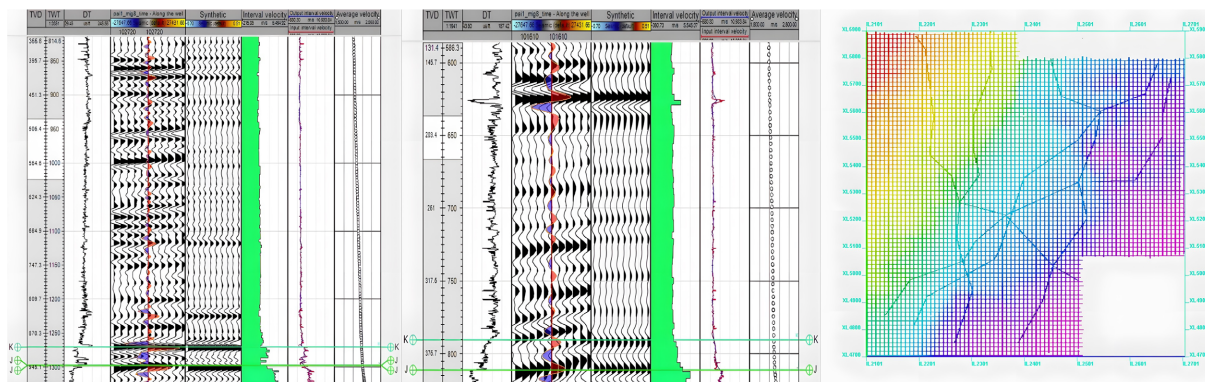


Figure 4. Synthetic records and stratigraphic interpretation

图 4. 合成记录与层位解释

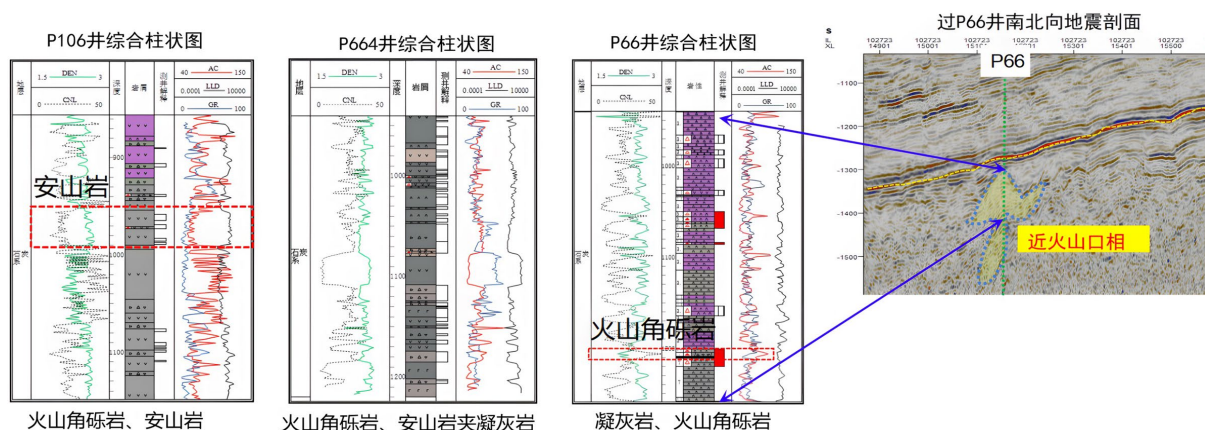


Figure 5. Seismic characteristics near the crater

图 5. 近火山口相井震特征

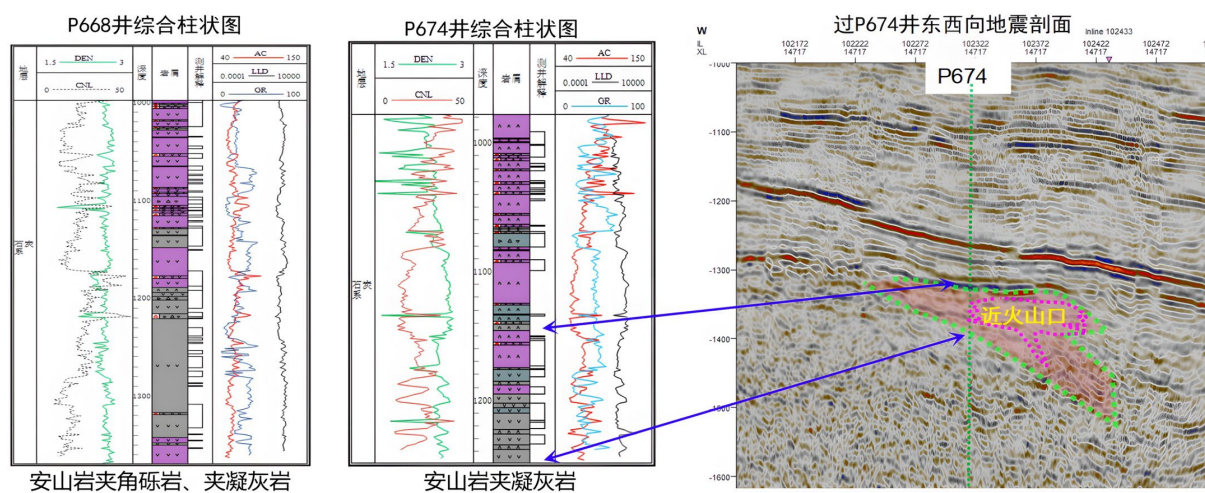


Figure 6. Seismic characteristics of near-surface overflow phase well

图 6. 近源溢流相井震特征

有一定的对比规则,这种对比规则是指导平面划相的重要依据,需要对火山岩相与测井相的相关性进行分析。通过精细制作 36 口井合成地震记录(图 4),解释石炭系顶层位(16×8)一套(图 4),明确了不同岩性组合反射特征,结合实际井对近火山口相、近源溢流相、远源溢流相及混源相进行分析。

近火山口相:岩性组合为火山角砾岩、安山岩;凝灰岩、火山角砾岩;火山角砾岩及安山岩夹凝灰岩。测井曲线反应特征:安山岩呈现“两低两高”特点,低 GR,低中子,高电阻,高密度,曲线形态呈箱型;火山角砾岩呈现低 GR,中电阻,中子密度曲线呈指形突起。互层特征为指形突变。地震反射特征:蘑菇状,内幕杂乱或空白反射,低频,弱振幅,连续性较差反射特征(图 5)。

近源溢流相:岩性组合为安山岩夹凝灰岩、夹角砾岩;玄武安山岩、玄武岩夹凝灰岩、玄武岩。测井曲线反应特征:安山岩表现为“两低一高”的特点,中低 GR,AC 值较低,一般低于 80 $\mu\text{s}/\text{ft}$;中高电阻,形态平稳。地震反射特征:中频、中-弱振幅、连续性较差反射特征(图 6)。

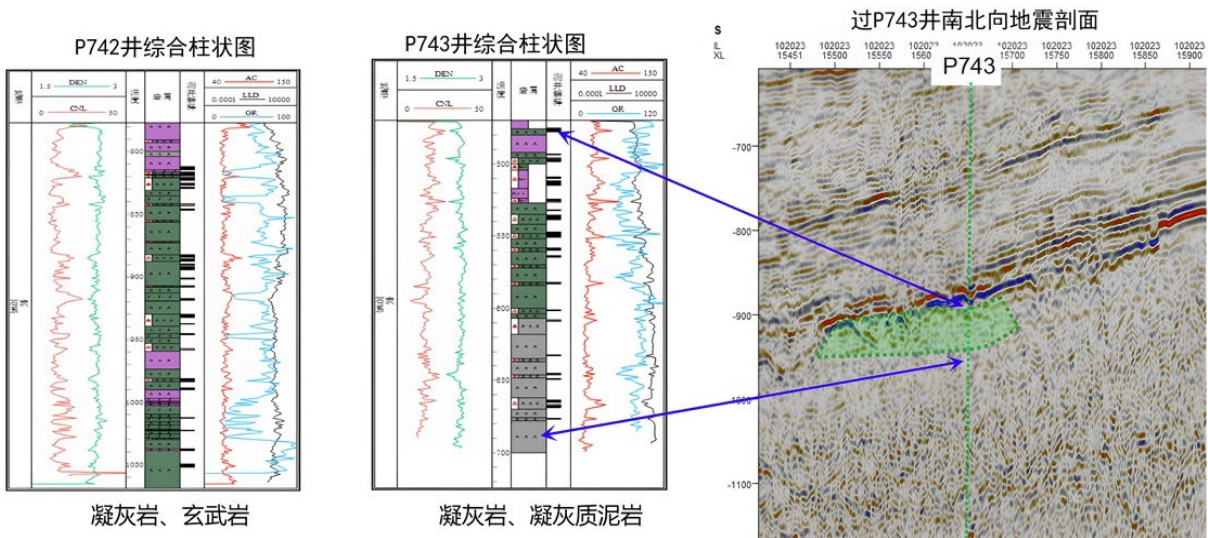


Figure 7. Seismic characteristics of remote overflow phase well
图 7. 远源溢流相井震特征

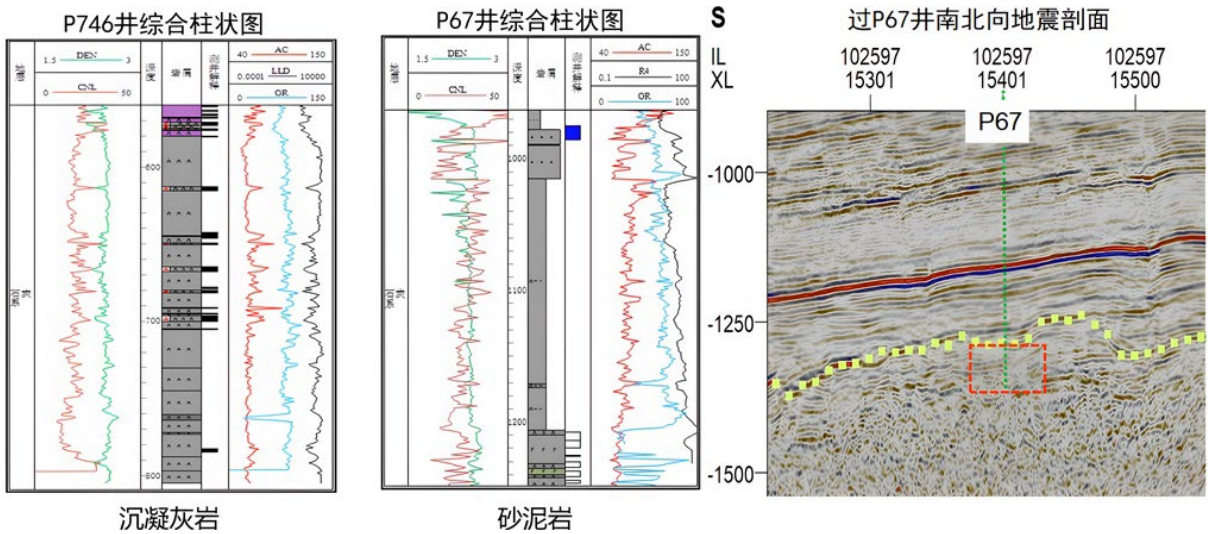


Figure 8. Characteristics of mixed source well seismic
图 8. 混源相井震特征

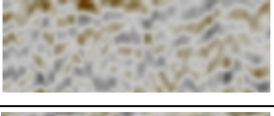
岩相	典型岩性	测井曲线特征	测井曲线数值区间	地震反射特征	地震剖面
近火山口相	角砾岩	低GR, 中RT, 中子密度呈指针凸起	GR: 15-33API AC: 97-80ft/ μ s DEN: 2.0-2.3g/cm ³	蘑菇状, 内幕杂乱或空白反射, 低频, 弱振幅, 连续性较差反射特征	
近源溢流相	安山岩	中低GR, 低AC, 高R	GR: 29-47API AC: 51-60ft/ μ s DEN: 2.68-2.74g/cm ³	中频、中-弱振幅、连续性较差反射特征	
远源溢流相	玄武岩、凝灰岩	高GR, 低AC, 高RT, 高DEN	GR: 32-81API AC: 51-66ft/ μ s DEN: 2.6-2.7g/cm ³	中高频、中弱振幅、连续性较差反射特征	
混源相	沉凝灰岩、泥岩	高GR, 低AC, 高DEN, 高RT	GR: 84-96API AC: 67-77ft/ μ s DEN: 2.5-2.6g/cm ³	高频、中振幅、相对连续反射特征	

Figure 9. Template for study of petrography and seismic characteristics of igneous rocks in Carboniferous strata of P1 well area

图 9. P1 井区石炭系火成岩岩相井 - 震特征研究模板

远源溢流相：岩性组合包括凝灰岩、泥质凝灰岩、玄武岩，火山碎屑含量大于 50%。凝灰岩呈现“三高一低”特点，电阻率值中高，DEN 值高，2.5~2.7 g/cm³，GR 值较高，一般大于 60API，AC 值低，一般小于 50 μ s/ft。地震反射特征：中高频、中弱振幅、连续性较差反射特征(图 7)。

混源相：一般以碎屑岩沉积为主，其岩性组合主要为沉凝灰岩、凝灰质泥岩、砂泥岩，火山岩含量小于 50%。电性特征表现为“三高一低”的特征，电阻率值中高，DEN 值高，一般在 2.5~2.6 g/cm³；GR 值较高，一般大于 50API，AC 值低，一般小于 80 μ s/ft，据此可区分火山岩与沉积岩。地震反射特征：高频、中振幅、相对连续反射特征(图 8)。

3.6. 建立 P1 井区火成岩岩相井震特征研究模板

P1 井区石炭系火山岩的地震反射特征研究显示，不同火山岩岩性与岩相组合在地震属性(振幅、频率、连续性等)上呈现出显著差异。本研究基于研究区内石炭系全井段钻井资料的精准标定，并结合测井相分析成果，证实伽马测井(GR)曲线可作为有效识别不同岩相的关键要素。通过对 GR 曲线数值区间的系统分析发现，近火山口相、近源溢流相、远源溢流相及混源相的 GR 曲线数值呈现出近火山口相 < 近源溢流相 < 远源溢流相 < 混源相的递增规律。在地震反射特征方面，振幅与频率属性对火山岩相具有良好的识别能力。具体表现为：在振幅属性上，近火山口相振幅值最低，其次为近源溢流相和远源溢流相，混源相振幅值最高；频率属性方面，同样呈现出近火山口相 < 近源溢流相、远源溢流相 < 混源相的分布特征。基于上述研究成果，系统整合钻井、测井及地震资料，构建了 P1 井区石炭系火成岩岩相井 - 震特征研究模板(图 9)，为火山岩储层预测及油气勘探提供了可靠依据。

4. 火山岩岩相地震预测

4.1. 地震属性分析

火山岩与沉积岩之间及不同岩性、岩相火山岩之间的岩石物理特征存在一定的差异，这种差异必然会在地震属性上有所反映。因此通过厘清不同岩性、岩相与地震属性之间的关系，可以预测火山岩岩性

及岩相的平面分布特征。基于各类地震属性对特定地质地球物理参数的响应差异，通过系统分析 P1 井区已钻井的火山岩岩性、岩相特征及其对应的地震属性响应，建立了火山岩地质参数与地震属性的定量对应关系表(表 2)。振幅类地震属性主要对火山岩岩性有较好反映，其中均方根振幅属性反映火山岩岩性比较有效。频率类属性可以反映火山岩体厚度的变化，优化属性为平均瞬时频率，对应的火山岩厚度由薄变厚。波形相关类属性可以较好反映火山岩岩相的变化，其中包络属性最适用。

提取地震属性时，选择合适的时窗是岩相预测的关键。为避免顶部风化壳干扰且覆盖目标层段，利用 P1 三维地震资料沿石炭系顶面向下开 160 ms 时窗提取提取均方根振幅属性切片、瞬时频率属性切片、包络属性切片(图 10)。包络属性能够反映能量的分布，有助于识别地震记录中能量较高的区域，对于平

Table 2. Table of relationship between volcanic rock geological parameters and seismic properties
表 2. 火山岩地质参数与地震属性关系表

属性类型	振幅类	频率类	波形类
地球物理特征	火山岩岩性	火山岩厚度	火山岩岩相
	振幅能量	瞬时相位	平均信噪比
	最大峰值振幅	平均反射强度	第二代相干
地震属性	平均绝对振幅	有效带宽	振幅变化率
	均方根振幅	瞬时频率	包络

面上岩相分布具有明显的指导意义：东部靠近北西向油源断层及东北向封堵断层处能量较高，与有利相带吻合较好。

4.2. 波形聚类分析

波形聚类分析是根据地震道波形及其特征变化，对某一储层内的实际地震数据道进行逐道对比，细致刻画地震信号的横向编号，建立地震相模式，同时结合单井相划分结果，建立地震相与测井相关系，解决无井区域沉积相的空间相序组合问题，利用地震相预测火山岩有利相带，主要是根据波形分类方法原理：地震信号任何物理参数的变化总是对应反映地震道形状的变化，地震波形是地震勘探中最可靠最直接的地下信息，也是地下岩性、岩相等发生变化的最直接反映。石炭系地层不同岩性具有一定频率差异性，利用频率域地震波形聚类技术对岩性进行预测，与实钻井较吻合，火成岩与沉积岩分类较明显(图 11)，但岩相划分效果欠佳。

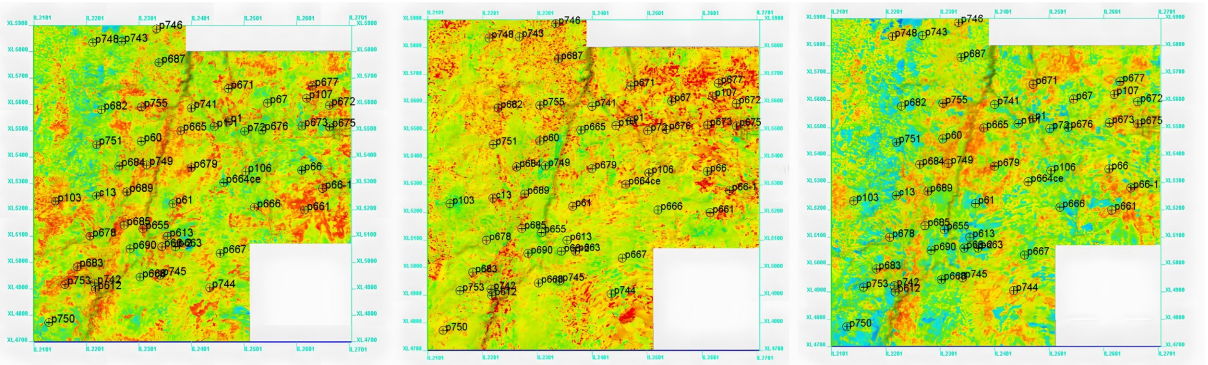


Figure 10. Three attribute slices (root mean square amplitude, instantaneous frequency, and envelope in sequence)
图 10. 三种属性切片(依次为均方根振幅，瞬时频率、包络)

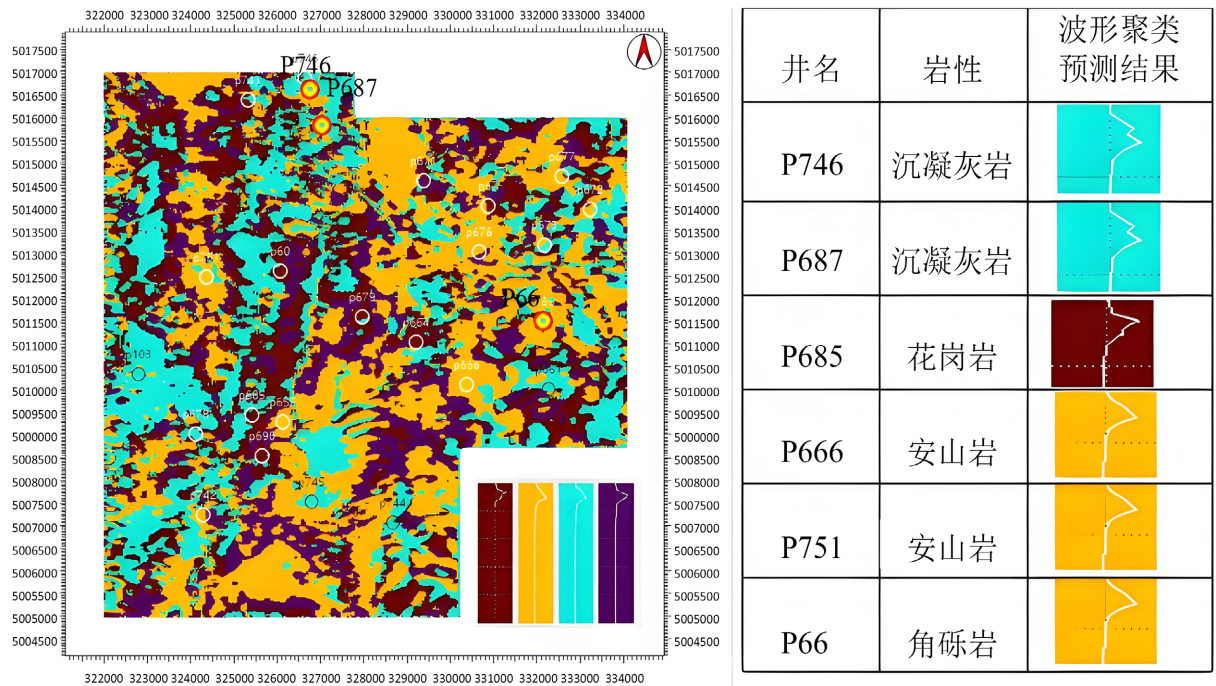


Figure 11. Coal series C frequency domain waveform clustering properties (down 0 ms down 160 ms) (4 categories)
图 11. 石炭系 C 频率域波形聚类属性(向下 0 ms 向下 160 ms) (4 分类)

4.3. 三色混相分频技术刻画火山岩相

三色混相分频技术利用时频变换算法对原始地震数据体进行分频处理，得到一系列单频数据体，优选互不重叠的三套频段(一般为低、中、高频段)进行三色混相模式混合显示，在形成的具有通频信息的色彩数据体开展地质分析。本次研究首先对石炭系目标处理地震体进行高通滤波，去除随机噪音，再进行分频处理，得到多个单频数据体。由于本次研究要涵盖目的层主频，选择目的层频带宽度内低(刻画粗粒岩相)、中(分辨岩相过渡带)、高(识别薄层)三个单频体(图 12)进行混相融合得到三色混相融合数据体。通过提取沿层切片(图 13)，与工区内实钻井进行对比可知，近火山口相、近源相、远源相、混源相识别较为明显(表 3)，吻合率达到 72% (26/36)。

4.4. 多属性融合聚类分析

由于火山岩地震反射连续性受火山喷发方式和岩相组合的影响，地震反射特征复杂，规律性差，导致常规地震属性分析方法在识别火山岩相时准确率不高，预测困难。本次研究集成均方根振幅(岩性识别)、瞬时频率(厚度反映)、包络属性(岩相识别)三类优化属性，通过机器学习算法建立加权融合模型。相比传

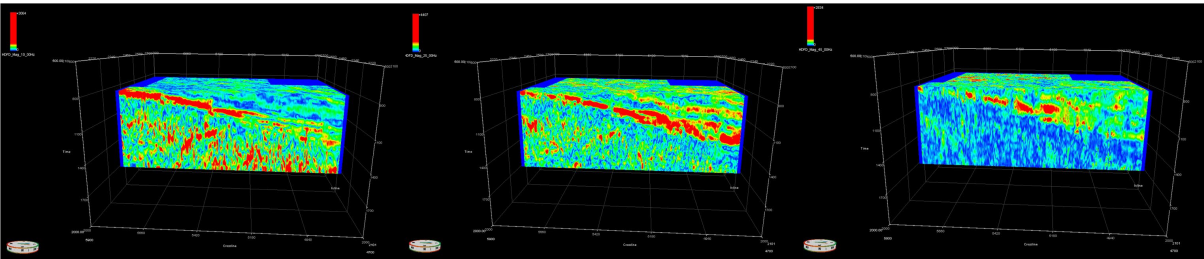


Figure 12. The coal series target processes 10 Hz, 25 Hz and 35 Hz single frequency data bodies
图 12. 石炭系目标处理 10 Hz、25 Hz、35 Hz 单频数据体

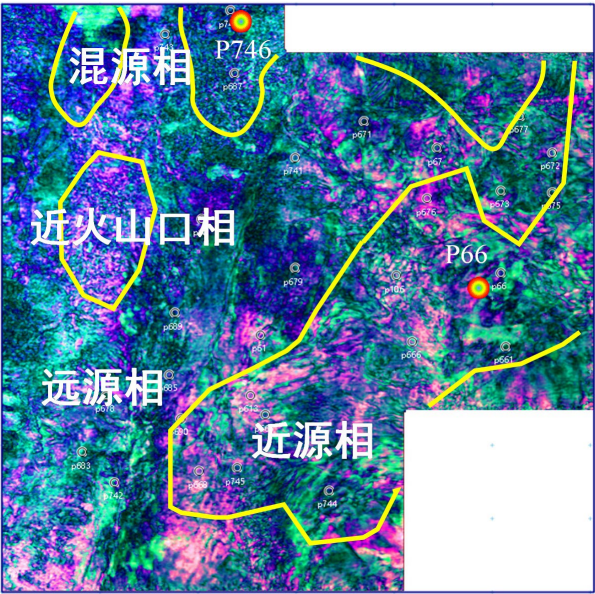


Figure 13. The three-color mixed phase frequency division fusion was sliced down 160 ms along the C top
图 13. 三色混相分频融合沿 C 顶向下 160 ms 切片

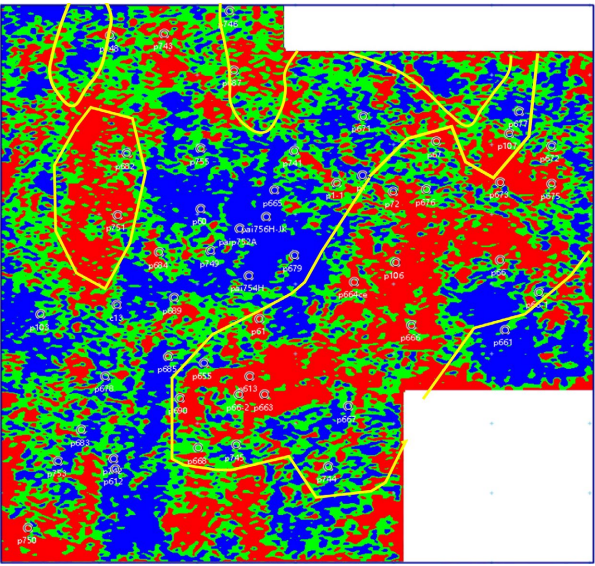


Figure 14. The three-color mixed phase frequency division fusion was sliced down 160 ms along the C top
图 14. 三色混相分频融合沿 C 顶向下 160 ms 切片

统单属性分析，属性融合聚类法将预测准确率从 62%提升至 80% (表 4)，尤其改善了溢流相与混源相的区分度，从而预测本区石炭系火山岩相分布(图 14)。

4.5. P1 井区火山岩相预测

前人针对该地区火山岩相的识别研究主要基于测井资料的分析与解释，通过井点数据外推岩相分布特征。这种方法虽然具有一定的可靠性，但其主要依赖有限的地质信息，存在明显的空间局限性和多解性问题。本次研究创新性地采用井震结合的技术思路，以具有横向连续性的地震信息为主体框架进行岩

相识别，同时利用测井资料提供的高精度地质信息进行标定与校正，从而显著提高了火山岩相识别精度和空间预测的可靠性。

本次研究以测井相作为约束，以三色混相分频融合切片、三种振幅类属性聚类切片为指导，厘清研究区石炭系火山岩相分布特征(图 15)，明确 P1 井区岩性岩相平面展布范围，火山岩相分布图明确了本区发育大面积火山岩，凝灰岩在西部连片分布，安山岩在东部呈条带状分布，角砾岩呈小面积块状，多分布于工区东部。通过对研究区火山岩相分布特征的系统研究，进一步厘清了勘探有利区带的展布规律，为下一步油气勘探部署提供了明确方向。

Table 3. Statistical table of prediction agreement rate (part)
表 3. 预测吻合率统计表(部分)

井名	岩性	三色混相分频融合预测结果	是否吻合
P743	凝灰岩	蓝色模式	是
P746	沉凝灰岩	绿色模式	是
P66	角砾岩	红色模式	是
P106	安山岩	紫色模式	是
P624	凝灰岩	紫色模式	否
P745	安山岩	蓝色模式	否
P666	安山岩	紫色模式	是
P67	泥岩	绿色模式	是
P687	沉凝灰岩	绿色模式	是

Table 4. Statistical table of prediction agreement rate (part)
表 4. 预测吻合率统计表(部分)

井名	岩性	三色混相分频融合预测结果	是否吻合
P624	凝灰岩	蓝色模式	是
P745	安山岩	蓝色模式	否
P687	沉凝灰岩	绿色模式	是
P106	安山岩	红色模式	是
P743	凝灰岩	蓝色模式	是
P66	角砾岩	红色模式	是
P666	安山岩	红色模式	是
P746	沉凝灰岩	绿色模式	是
P67	泥岩	绿色模式	是

5. 结论

1) 本次研究以作为相标志的岩性岩相作为单井主体相，通过系统分析 P1 井区地震反射特征与岩相响应关系，建立了石炭系火山岩相的井震特征识别模板。研究显示，近火山口相表现为低频，弱振幅，连续性较差反射特征；溢流相则呈现中频、中 - 弱振幅、连续性较差反射结构；混源相为高频、中振幅、相对连续反射特征。

2) 基于各类地震属性对特定地质地球物理参数的响应差异，通过系统分析 P1 井区已钻井的火山岩

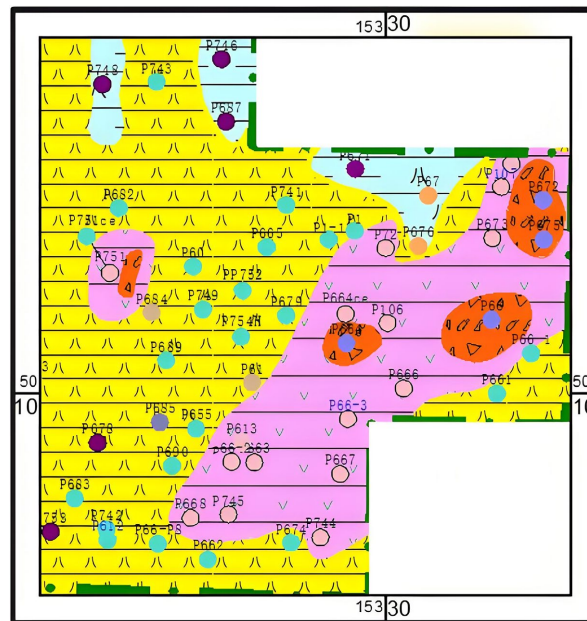


Figure 15. P1 well area Carboniferous volcanic facies map
图 15. P1 井区石炭系火山岩相图

岩性、岩相特征及其对应的地震属性响应，建立了火山岩地质参数与地震属性的定量对应关系表。其中，包络属性可以较好的反映火山岩岩相的变化。

3) 本次研究创新性地建立了基于多属性融合聚类分析的岩相预测技术体系。通过系统筛选对岩相识别敏感的地震属性参数，配合机器学习算法，提高岩相预测精确度，特别是在溢流相与沉积岩相的区分上效果显著。

参考文献

- [1] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271.
- [2] 林会喜, 王圣柱, 李艳丽, 等. 准噶尔盆地石炭系不同类型烃源岩生烃模拟[J]. 地质勘探, 2014, 34(10): 27-32.
- [3] 李永刚. 长岭断陷查干花次凹火石岭组水下喷发火山岩相测井响应特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 2061-2074.
- [4] 孙中春, 蒋宜勤, 查明, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩储层岩性岩相模式[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 782-789.
- [5] 齐英涵, 曹磊, 周丹, 等. 基于倾角导向地层格架低频模型的火山岩相控反演研究[J]. 石油科学通报, 2025, 10(1): 65-74.
- [6] 李丕龙, 刘传虎. 准噶尔盆地天然气勘探潜力及运聚规律[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 6-10.
- [7] 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(1): 18-27.
- [8] 殷文. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩油藏地球物理特征及有利储层预测[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10645-10658.
- [9] 李军, 薛培华, 张爱卿, 等. 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其控制因素[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 329-335.
- [10] 陶奎元. 火山岩相构造学[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1994: 12-31.
- [11] 陈欢庆, 石为为, 杜宜静, 等. 火山岩储层岩相研究进展[J]. 地质科学, 2022, 57(4): 1307-1323.
- [12] 邱子刚, 周阳, 赵蕾, 等. 准噶尔盆地西北缘火山岩相及储层特征[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(8): 34-38.
- [13] 王璞珺, 冯志强, 刘万洙, 等. 盆地火山岩: 岩性·岩相·储层·气藏·勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

-
- [14] 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.
 - [15] 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]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
 - [16] 尤新才, 晏奇, 李梦瑶, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷南部风城组火山岩油藏特征与聚集模式[J]. 地质科技通报, 2024, 43(5): 131-145
 - [17] 高涛, 曹宝军, 纪学雁, 等. 松辽盆地北部深层火山岩气藏勘探开发关键技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 172-182.
 - [18] 杨柳, 赵容容, 梁虹, 等. 川西南部二叠系火山岩相地震预测及分布主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 94-103.