

车排子区块火山岩蚀变层段识别方法及其对产能的影响

邢成婧玉¹, 孙建孟¹, 安纪星², 李 剑³, 刁乃铮², 李金阳², 陈子冰²

¹中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛

²中国石油测井有限公司吉林分公司, 吉林 松原

³中国石油测井有限公司华北分公司, 河北 任丘

Email: 3083477386@qq.com

收稿日期: 2021年8月26日; 录用日期: 2021年9月23日; 发布日期: 2021年9月30日

摘 要

在火山岩的储层评价中, 蚀变作用表现为良好储层特征, 但实际物性、孔隙连通性差, 为非储层或差储层。因此识别火山蚀变带具有重要意义。本文以准噶尔盆地车排子地区中基性火山岩为例, 通过观察电镜薄片, 分析测井曲线响应特征, 选取测井敏感曲线建立 $R_t-\Phi_{CNL}$ 储层蚀变程度识别图版。利用中子测井、电阻率测井对数值, 建立蚀变指数AL, 将蚀变等级划分为轻度或未蚀变($AL < 12$)、中度蚀变($12 < AL < 27$)、重度蚀变($27 < AL < 80$)三个等级。随火山岩蚀变程度加深, 电成像测井中孔隙度分布谱由宽变窄, 重度蚀变段孔隙度谱窄而不连续。基于其响应特征建立孔隙度谱指数FE和蚀变指数AL的火山岩产能图版, 图版说明强蚀变作用下的火山岩会降低储层产能, 对产能类型的判别与实际试油结论相符。

关键词

蚀变火山岩, 蚀变识别, 中子测井, 产能图版, 准噶尔盆地, 车排子地区

Identification Method of Volcanic Rock Alteration in Chepaizi Area and Its Impact on Production Capacity

Jingyu Xingcheng¹, Jianmeng Sun¹, Jixing An², Jian Li³, Naizheng Diao², Jinyang Li², Zibing Chen²

¹School of Earth Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao Shandong

²PetroChina Logging Co., Ltd. Jilin Branch, Songyuan Jilin

文章引用: 邢成婧玉, 孙建孟, 安纪星, 李剑, 刁乃铮, 李金阳, 陈子冰. 车排子区块火山岩蚀变层段识别方法及其对产能的影响[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(9): 1271-1281. DOI: 10.12677/ag.2021.119123

³North China Petroleum Logging Branch, Renqiu Hebei
Email: 3083477386@qq.com

Received: Aug. 26th, 2021; accepted: Sep. 23rd, 2021; published: Sep. 30th, 2021

Abstract

In the evaluation of volcanic reservoir, alteration shows good reservoir characteristics. However, the actual physical property and pore connectivity are poor, and they are non-reservoir or poor reservoir. Therefore, it is of great significance to identify the volcanic alteration zone. Taking the intermediate-basic volcanic rocks in Chepaizi area, Junggar Basin as an example, by electron microscope observation of the thin section of the cast, it was found that the logging response characteristics of alteration. The $R_T-\Phi_{CNL}$ reservoir alteration degree identification chart was established by using logging sensitive curves. Based on the neutron and resistivity logging values, the alteration index AI was established and the alteration grade was divided into three: weak or no alteration ($AI < 12$), moderate alteration ($12 < AI < 27$) and strong alteration ($27 < AI < 80$). With the increase of the alteration degree and clay content, electrical imaging porosity spectrum is from wide to narrow, and the porosity spectrum of heavy alteration is narrow and discontinuous. The above methods are used to identify the alteration zone and analyze the effect of alteration on productivity. The results show that the chart of alteration index AI and test production can indicate the production capacity. This study has reference significance for the identification and evaluation of volcanic alteration zones in other areas.

Keywords

Altered Volcanic Rock, Alteration Identification, Neutron Logging, Productivity, Junggar Basin, Chepaizi Area

Copyright © 2021 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

随着试油勘探的发展,火成岩成为重要油气储层。国内外发现了很多火山岩油气藏,如美国、阿根廷,国内在济阳拗陷、辽河拗陷、准噶尔盆地等油田均发现火山岩油气藏分布。研究区位于准噶尔盆地春风油田北部车排子地区排66区块,构造上位于准噶尔盆地西部隆起车排子凸起,其西面和北面邻近扎伊尔山,南面为四棵树凹陷,向东以红-车断裂带与沙湾凹陷相接。排66区块石炭系油藏埋深850~1270 m,油层厚度10.5 m~46.4 m,储层岩性主要是安山岩、凝灰岩(岩屑以安山质为主)、火山角砾岩(爆发相)、玄武岩等,储层孔隙类型主要为次生溶蚀孔洞和裂缝,为裂缝-孔隙型双重介质储层。由于该地区火山岩岩性复杂,储集空间类型多样,非均质性极强,测井识别与综合评价难度极大[1] [2] [3] [4] [5]。

对于火山岩蚀变的研究2013年朱学娟划分蚀变类型,结合不同程度的蚀变对常规、成像和核磁共振测井响应的影响,综合分析蚀变玄武岩的孔隙有效性,根据次生黏土矿物对裂缝有效性的影响,利用DSI测井分析裂缝有效性和储层渗透性[6]。2016年宋明水发现车排子地区石炭系自上而下为风化黏土层、水解层、淋滤层。利用化学蚀变指数(CAI)刻画蚀变程度[7]。2018年王敏提出高温下岩石矿物蚀变产生的

含大量结晶水的绿泥石和沸石是导致中子出现异常高值的主要原因。当中子测井值高于 30%且自然电位曲线无明显异常时,一般为非储层。采用 MOSTAFA 模型计算火成岩蚀变层段的储层孔隙度[8]。2019 年高衍武分析蚀变敏感参数,建立指示模型并进行黏土化蚀变火山岩孔隙度矫正[9]。2020 年张丽华等人发现火山岩蚀变降低了储层的物性下限[10]。前人对蚀变的识别大多根据测井曲线,蚀变与产能的关系研究较少。

本文以准噶尔盆地车排子中基性火山岩为例,通过结合铸体薄片资料,观察交代情况;结合物性分析、元素测井、电成像与孔隙度谱资料,通过先定性后定量评价的方法识别本区火成岩蚀变程度。同时引入火成岩蚀变层段与产能图版。研究表明,发生轻度蚀变和部分中等蚀变有利于储层发育,一旦发生强蚀变以及泥质蚀变,将对测井曲线响应造成极大影响,并且不利于储层发育。

2. 火山岩蚀变机理及产物

2.1. 蚀变机理

蚀变是火成岩储层的常见现象,火成岩在地表深处岩浆从断裂带喷发或者溢出地层,在急剧冷凝后形成,具有火山熔岩结构。受到热液的影响,火山岩发生交代作用导致岩石中的原矿物消失,产生次生矿物,这种岩石的交代作用通常称为蚀变作用。其中玄武岩含深色矿物较多,容易发生蚀变,交代的矿物如绿泥石,方解石,沸石对杏仁状孔隙以及裂缝填充作用较强,影响储层的物性。

火山岩蚀变通常反应了火山岩演化所进行到某阶段产生新的物理化学条件,使原岩的结构、构造以及成分相应地发生改变生成新的矿物组合的过程。决定蚀变类型和蚀变作用强度的因素主要有两个:1) 围岩性质,包括围岩的化学成分,矿物组分,粒度,物理状态,渗透率等;2) 热液的性质,包括热液的化学成,浓度,温度, pH 值和压力条件等。溶蚀作用是地下岩石次生孔隙发育最重要的因素。蚀变的种类很多,如钠长石化,碳酸盐岩化,绿泥石化等。交代蚀变形成的围岩被称为蚀变围岩[11]。

蚀变对火山岩储层的形成具有重要的控制作用,主要表现为:脱玻化作用和溶蚀作用会产生晶间孔和溶蚀孔等次生孔隙,容易形成有利储层;反之,蚀变产生的次生矿物会填充储层孔隙和裂缝,降低储层孔隙的有效性。本区块主要为玄武岩,凝灰岩,安山岩,玄武质安山岩。其中玄武岩和安山岩易发生蚀变。

2.2. 蚀变类型

为了探究火山岩蚀变的微观孔隙结构,本次对车排子地区火山岩样品进行铸体薄片分析,储层发生强蚀变过程中,碱性长石被粘土矿物,方解石,沸石以及白云山交代,晶屑(硅质)消失。观察结果表明蚀变产生的溶蚀孔发生矿物填充,导致孔隙连通性差。

从蚀变作用对物性的影响来看,可以分为黏土化蚀变和非黏土化蚀变两种。其中碳酸盐化、钠长石化和脱玻化不产生粘土矿物,属于非黏土化蚀变,蚀变矿物可以通过水解和溶解作用,形成溶蚀孔隙,改善了火山岩储层的物性和孔隙结构,有利于形成储层。黏土化蚀变生成的蚀变产物为绿泥石、绢云母、高岭石等粘土矿物,蚀变形成的粘土矿物不仅降低储层孔渗结构有效性,而且改变测井响应特征[12],是导致中子测井异常高值的主要原因。

本区块常见蚀变作用类型主要包括硅化(图 1(a), 图 1(b)),方解石化(图 1(c)),黏土化(图 1(d)),高岭石化(图 1(e)),绿泥石化(图 1(f))。

综上所述,由于蚀变常出现伴生和共生现象,宏观上矿物组分以及元素的变化规律性不大,从微观薄片上可以观察到蚀变现象,在中、基性火山岩均存在黏土化蚀变,气孔和裂缝填充绿泥石,从而渗透

性较差, 孔隙有效性也很差。但是由于铸体薄片成本高数据少, 且深度不连续, 结合蚀变现象寻找测井曲线响应特点是蚀变火山岩蚀变的方法。

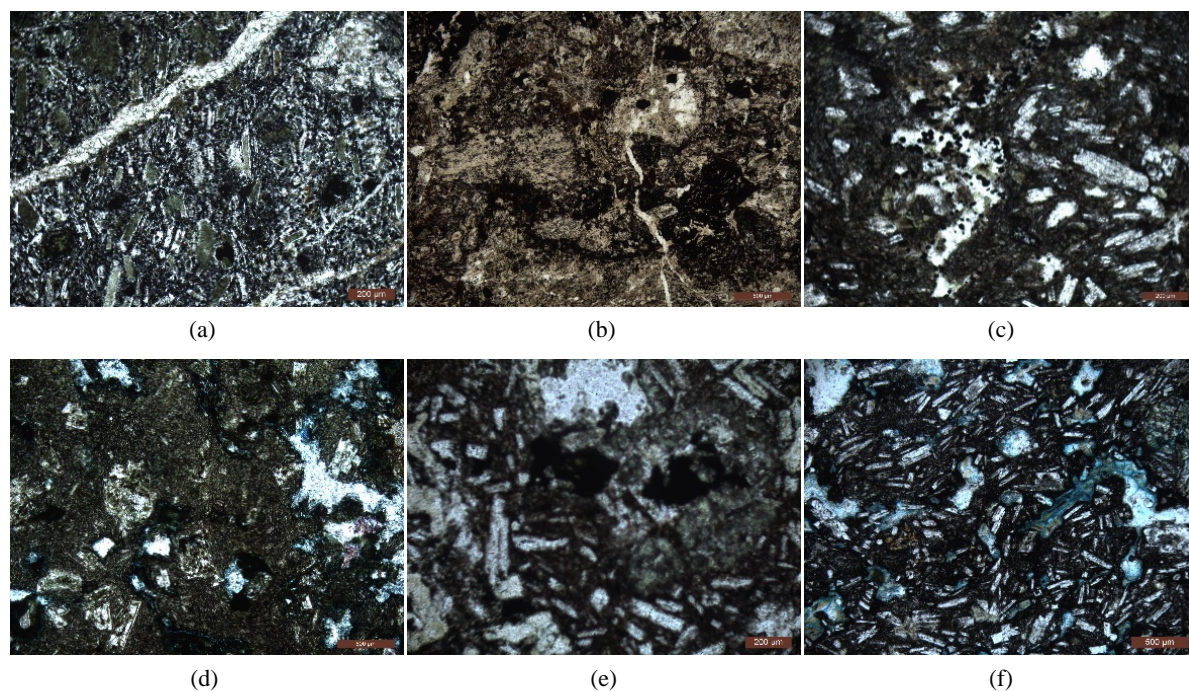


Figure 1. (a) Basalt dike filled with silica and zeolite (well P61, 912.8 100 \times); (b) Breccia, dike developed, filled with zeolite (well P66, 12,095 m); (c) Basalt andesite, filled with zeolite and calcite (well P662, 1087.78 m 100 \times); (d) Andesite clayization (well P664, 913.52 m); (e) Basaltic Andesite almond pore filled with calcite, zeolite, kaolinite, etc. (well P661, 1119.6 M 100 \times); (f) Andesite almond pore filled with chlorite (well P661, 1121.2 50 \times)

图 1. (a) 玄武岩发育岩脉充填硅质及沸石(p61 井, 912.8 100 \times); (b) 角砾岩, 岩脉发育, 内充填沸石(p66 井, 12,095 m); (c) 玄武安山岩, 充填沸石、方解石(p662 井, 1087.78 m 100 \times); (d) 安山岩黏土化(p664 井, 913.52 m); (e) 玄武安山岩杏仁孔充填方解石、沸石、高岭石等(p661 井, 1119.6 m 100 \times); (f) 安山玄武岩杏仁结构气孔发育, 充填绿泥石(p661 井, 1121.2 50 \times)

3. 火山岩蚀变层测井响应评价

通过长期勘探开发发现, 准噶尔油田车排子组火成岩蚀变层在测井曲线响应上出现异常影响[13]。火山岩蚀变段发生交代作用, 电镜观察到黏土矿物中常含有结晶水, 填充在岩石粒间孔隙以及裂缝中, 会出现中子测井值增大, 电阻率降低, 尤其强蚀变段表现为良好储层的特性, 实际上强蚀变段原生孔隙被填充, 渗流特征差, 是差储层或非储层。对火山岩蚀变层的识别成为火成岩储层评价不可避免的难点。

在喷发岩储层的溶蚀、蚀变及充填作用下, 储层出现三低两高特征。具体表现为: 即低电阻、低密度、低自然电位、高声波时差、高中子[14] [15]。图 2 为火山岩蚀变实例, 在上半段 1080~1110 m 发生蚀变, 第三道电阻率基本在 15 $\Omega\cdot\text{m}$ 以内, 第四道中子数值偏高基本在 30% 以上, 声波变大, 密度减小。核磁共振测井除去在 1108 m 出现扩径影响层段, 基本以微孔小孔为主。下段 1110 m~1170 m 火山岩未发生蚀变, 电阻率变大, 中子异常高值消失, 核磁共振测井出现中大孔。

根据车排子组的测井曲线特征(图 3)可见, 未蚀变的玄武岩, 电阻率中等 30 $\Omega\cdot\text{m}$, 中子 10%~15%, 该井进入 1540 m, 电阻率降低至 10~15 $\Omega\cdot\text{m}$, 中子测井显示异常高值, 达到 39%。安山岩测井曲线特征为: 中等伽马, 高电阻率 100~200 $\Omega\cdot\text{m}$, 中等中子 12%~20%, 深度到达 1200 m 进入安山岩蚀变层, 电阻率降低(10~15 $\Omega\cdot\text{m}$), 中子出现异常高值(28%~42%)。

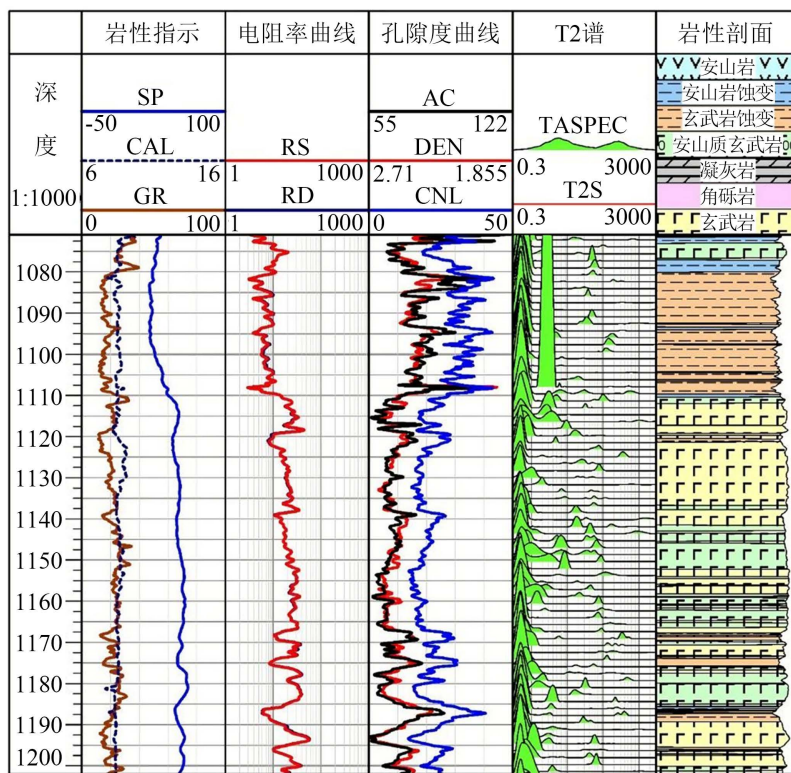


Figure 2. Alteration log curve

图 2. 蚀变测井曲线图

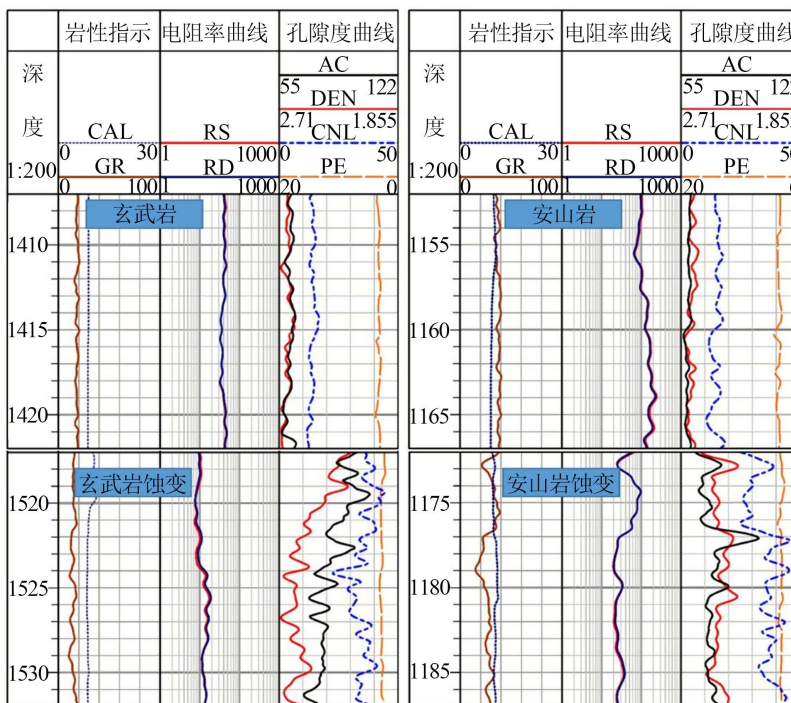


Figure 3. Comparison of logging curves of altered and unaltered volcanic rocks, basalt (left) andesite (right)

图 3. 蚀变与未蚀变火山岩测井曲线对比, 玄武岩(左)安山岩(右)

火成岩蚀变电成像如图 4 所示, 电成像显示斑状溶蚀孔, 岩石层理结构遭到破坏, 从电成像上比较难蚀变出火成岩蚀变层。

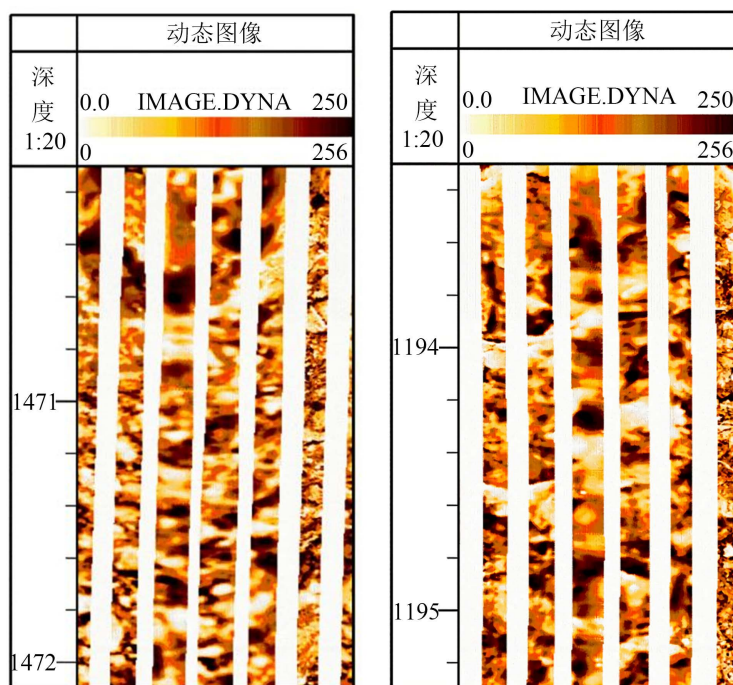


Figure 4. Electrical imaging of altered igneous rock
图 4. 蚀变火成岩电成像图

如何从火成岩蚀变层段中优选有效储层, 并进一步对其储集性能进行定量表征仍是无法回避的难题, 蚀变层的判断界限需要结合电阻率, 孔隙度曲线以及核磁共振数据综合评价。

4. 火山岩蚀变层, 识别方法

4.1. 火山岩蚀变孔隙度谱

利用电成像资料生成孔隙度谱, 可以通过捕捉电成像信息和电阻率变化计算不同孔径的孔隙度, 并且区分原生孔隙和次生孔隙。选取一个图像窗口, 利用阿尔奇公式计算窗口每个电成像测井像素点的孔隙度大小, 统计单元内不同区间的孔隙度贡献值, 从而绘制孔隙度频率分布图[16][17]。

具体做法为: ① 在 FMI 图像中根据每个成像扫描点的颜色深浅, 即电阻率高低进行统计, 颜色深的电阻率低, 孔隙度大, 对应孔径大, 反之孔隙度小; ② 根据上述制作孔径分布累计频率图, 频率图并非连续, 而是存在两道三个峰, 小孔径对应的峰累计频率高, 变化范围大。这种现象反应地层总原生孔和次生孔状态, 两者不是连续变化, 原生孔小但数量多, 孔径变化范围大且连续; 次生孔大而少, 孔径变化小且不连续, 由此可以根据频率图区分原生孔和次生孔; ③ 对累计频率图所包络的面积积分, 得到原生孔和次生孔的孔隙度。

孔隙度频率分布曲线形态与储层非均质性有关, 可以分为单峰、双峰、多峰:

- ① 孔隙度低, 孔隙频率分布谱上表现为窄的单峰;
- ② 次生孔隙分布均匀, 基质孔隙度较少, 孔隙频率分布谱上表现为后移的单峰;
- ③ 分布多尺度溶蚀孔洞, 孔隙频率分布谱表现为较宽的双峰或多峰。

图5为P666井蚀变程度测井曲线图。在975~1005 m为宽谱型，电阻率较高基本在100 $\Omega\cdot\text{m}$ ，声波时差在60~70 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 范围内，密度2.52~2.61 g/cm^3 ，中子基本保持10%~16%，从核磁共振T2谱反应，有中孔大孔显示，说明物性较好，最右侧电阻率分布谱出现宽而连续的峰反映物性好的。利用蚀变指数计算该井段蚀变指数在5~10之间，属于未蚀变。

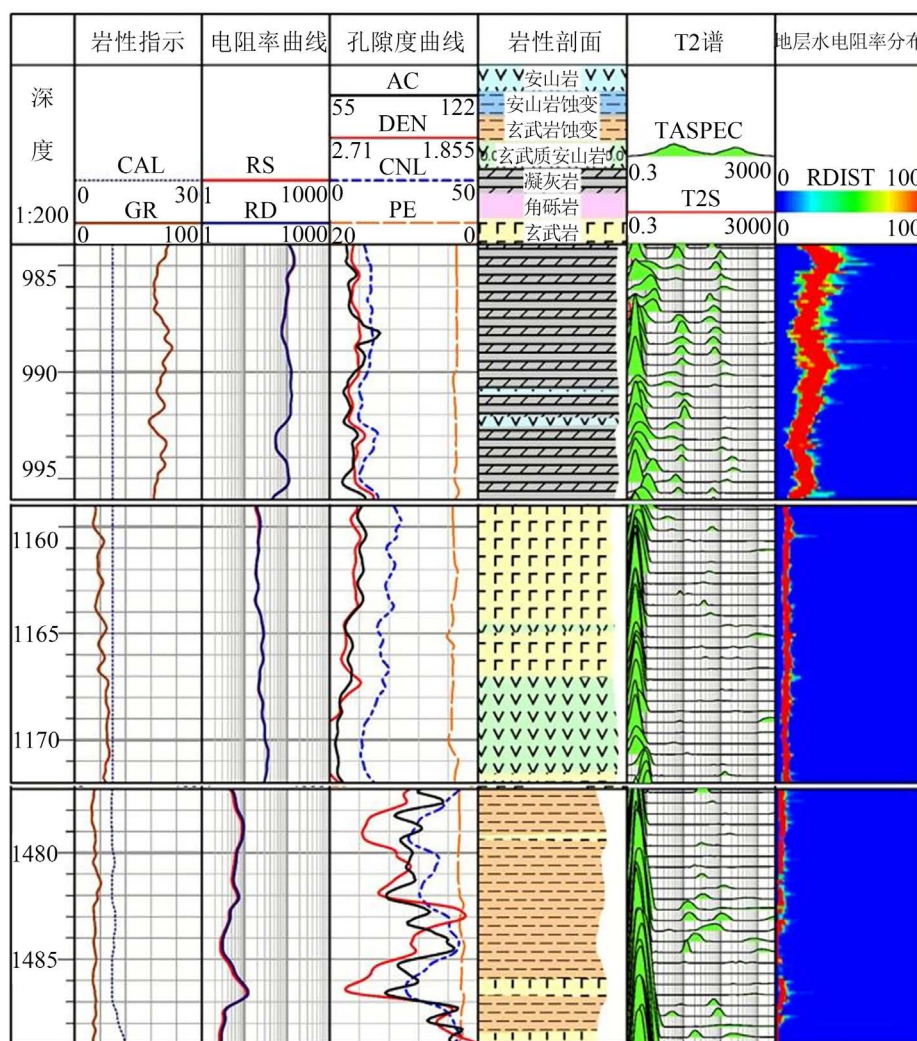


Figure 5. Logging curve of alteration degree

图5. 蚀变程度测井曲线图

1325~1360 m为单峰中谱型，电阻率在80~100 $\Omega\cdot\text{m}$ ，声波时差在57~70 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 范围内，密度2.52~2.61 g/cm^3 ，中子基本保持13%~18%，从核磁共振T2谱反应，有中孔显示大孔较少，说明物性中等，最右侧电阻率分布谱出现连续的峰但是较窄，对比未蚀变层，孔隙度分布谱窄且均匀，核磁共振大孔较少，物性中等。利用蚀变指数计算该井段蚀变指数在8~15之间，属于中等蚀变。

1460~1490 m的测井曲线图，电阻率在2~15 $\Omega\cdot\text{m}$ ，声波时差在68~85 $\mu\text{s}/\text{ft}$ 范围内，密度2.3~2.41 g/cm^3 ，中子范围在29%~40%，具体层段要结合测井曲线分析，从核磁共振T2谱反应，没有中孔大孔，由于对井径比较敏感一旦扩径会出现大孔的假信号，而发生粘土蚀变容易出现扩径现象，故核磁数据不能作为建议蚀变的直接依据，可作为参考。最右侧电阻率分布谱出现连靠右的单峰且不连续的，形态窄且陡，

表明孔隙度低，利用蚀变指数计算该井段蚀变指数在 30~50 之间，对比未蚀变层中蚀变层，孔隙度分布谱窄且不连续，核磁共振大孔较少，属于重度蚀变。

基于孔隙度谱对蚀变程度的指示表明，电成像测井可以对划分蚀变类型，但是观察图片工作量较大且难以精确表达，所以将孔隙度谱定量评价蚀变程度成为重点。

4.2. 火山岩蚀变指数

对于常规储层，高中子测井值主要来源于储层中的油、气和水，因此中子测井值高即意味着储层孔隙度高；而对于蚀变火成岩层段，其储层中的含氢量与岩石孔隙度无明显关系，其含氢量高值并非代表高储集空间响应，因此在蚀变火成岩层段采取与中子测井有关的孔隙度计算模型会导致明显偏差[18]。

玄武岩蚀变带为非储层或者差储层，而孔隙裂缝发育油气为主要储集带大声波、大中子、低密度，低电阻率，测井信息显示孔洞发育的特征。电阻率低、中子值大，但对应的 GR 值略有增高；蚀变引起的假储层具有中高声波、大中子、低密度，低电阻率，测井信息显示孔洞发育的特征。实际是基性玄武岩蚀变造成绿泥石含量高，粘土水高引起的孔隙度曲线和电阻率曲线的变化，储集空间不发育。试油结果也给予了证实。

针对排 666 井进行了核磁实验，利用上述方法划分蚀变类型，找出不同蚀变类型的核磁孔隙分布特征。图 6 中黄色表示发生强蚀变的核磁数据，绿色为中等蚀变，蓝色为未蚀变或弱蚀变。由于强蚀变储层物性变差，发生泥质交代作用，核磁未见大孔且核磁孔隙度很低，中等蚀变对储层物性发生改变，黏土化较轻，核磁孔隙度比强蚀变大；未蚀变和弱蚀变的岩心，核磁 T2 谱显示大孔，且核磁孔隙度较大。

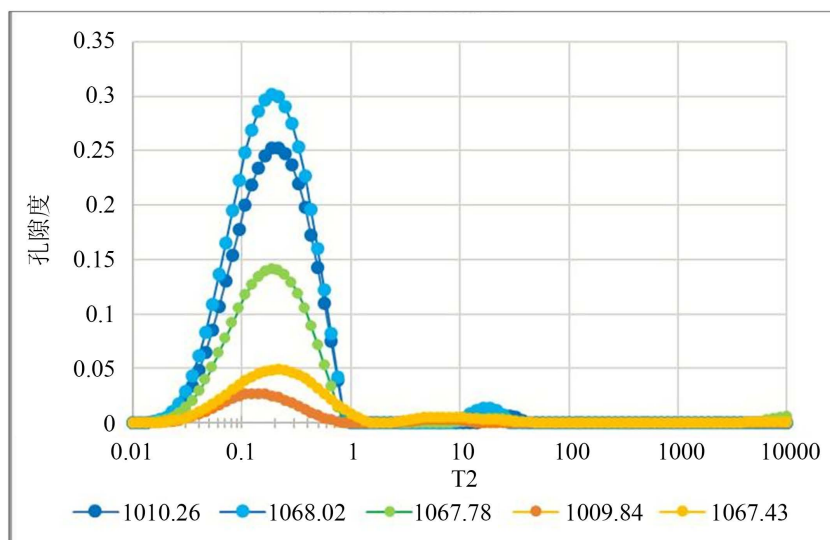


Figure 6. T2 NMR spectra of different alteration types

图 6. 不同蚀变类型核磁 T2 谱图

火山岩蚀变会影响电阻率，中子，密度和声波等测井参数发生不同程度的变化，根据蚀变机理的分析，蚀变一定程度上改变了储层的骨架值，利用中子 - 电阻率交会图(图 7)，可以定性划分蚀变程度。根据准噶尔盆地车排子组的区域特点定性划分三类，如表 1 所示。

针对蚀变识别的敏感参数，结合电镜、电成像、核磁共振测井等蚀变数据，建立 $R_f-\Phi_{CNL}$ 储层蚀变程度识别图版，确定储层蚀变程度。交会图中弱蚀变中子在 20 以下，电阻率较高，发生蚀变中子增大，电阻率降低。

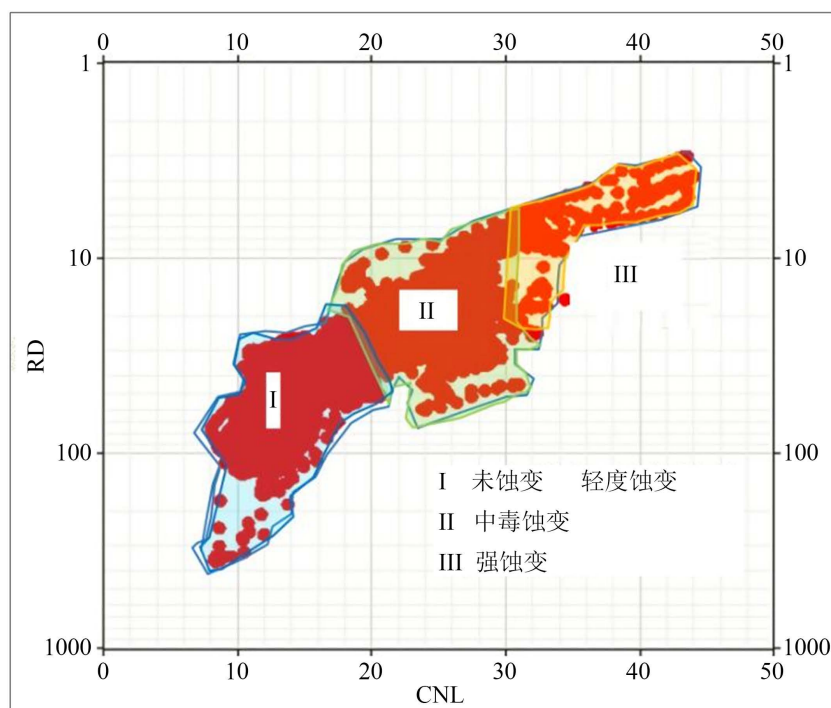


Figure 7. Intersection diagram of resistivity neutron alteration indicator
图 7. 电阻率中子蚀变指示交会图

中子测井值对蚀变程度反映敏感，如何根据中子测井值确定不同的蚀变程度成为火成岩蚀变层段有效储层识别的关键问题。由于泥岩段饱含束缚水，因此其中子测井值远高于储层段的中子测井值。在中子测井值发生异常变化的层段，若能确定未经蚀变或蚀变程度较轻的泥岩段的中子测井值，则可以确定有效储层的中子测井值上限。

针对上述分析选取火山岩黏土化蚀变的敏感参数，分析排字区多口井，综合文献调研结果，由于火山岩岩性复杂，利用自然伽马和密度曲线可以划分岩性，但是蚀变火山岩无法识别，通过中子测井和电阻率测井数据交会图发现，火山岩蚀变带的未蚀变和轻度，可以利用交会图定量划分火成岩蚀变段在，因此采用中子 - 电阻率比值法。确定研究区不同蚀变程度火成岩对应的中子测井值。火成岩层段未蚀变或轻度蚀变时，中子测井值为 12%~20%；中度蚀变时，中子测井值为 20%~30%；重度蚀变或泥化时，中子测井值大于 30%。据此认为火成岩蚀变层段有效储层的中子测井值应不高于 30%。结合密度、声波和自然电位等测井曲线，可以实现对火成岩蚀变层段有效储层的划分。综合研究区三孔隙度和自然电位测井曲线响应特征，确定火成岩蚀变层段无效储层的划分标准为中子测井值大于 30%，且自然电位测井曲线无明显幅度异常。其中，中子、电阻率测井值主要判断火成岩层段是否为重度蚀变或黏土化，自然电位测井曲线幅度差主要判断火成岩层段是否具有渗透性。

在此研究基础上引入蚀变指数公式：

$$AL = CNL / \log(Rt)$$

需要注意的是中子含量通过统计基本在 32% 以上判别为蚀变，但是根据具体的井要结合电阻率，孔隙度曲线，核磁共振，电成像等测井曲线进行综合分析。具体下文蚀变实例分析会进行详细总结阐述。

火成岩蚀变对中子和电阻率影响较大，下表 1 为火成岩强蚀变，中等蚀变，未蚀变或弱蚀变测井参数统计。

Table 1. Logging parameters of different alteration types
表 1. 不同蚀变类型测井参数表

储层类型	自然伽马	中子	电阻率	密度	蚀变系数 AL
弱蚀变或未蚀变	10~45	0~19	20~100	2.51~2.8	0~12
中等蚀变	15~40	19~30	11~25	2.45~2.51	12~27
强蚀变	14~38	30~40	2~11	2.32~2.45	27~80

建立中子电阻率交会图确定储层蚀变程度的方法, 按蚀变程度将火成岩定性地划分为三类: 强蚀变, 中等蚀变, 弱蚀变或未蚀变。

5. 蚀变对产能的影响

由于黏土化蚀变会造成物性变差, 不仅影响测井响应特征同时也会改变饱和度和孔渗结构, 对产能有一定的影响。本文通过上述方法识别出蚀变层段类型, 利用建立产能判别图版, 对已试油井进行产能分析, 孔隙度指数和产能有很好的区分性, 图 8 所示利用蚀变指数和孔隙度指数建立产能识别图版, 对储层分类有很好的应用效果。

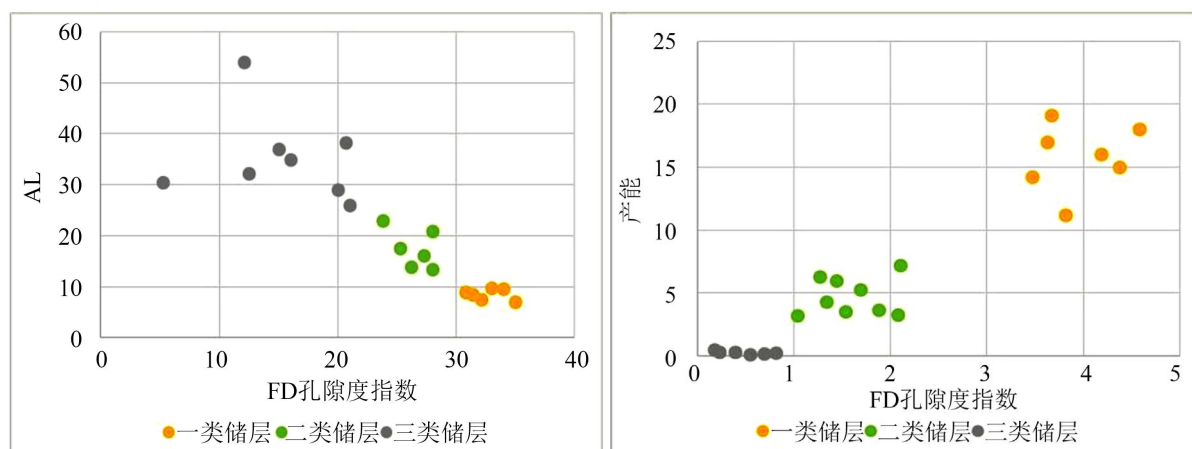


Figure 8. Production identification plate

图 8. 产能识别图版

6. 结论

1) 准噶尔油田车排子组火成岩蚀变层在测井曲线响应上出现异常影响。火山岩蚀变段发生交代作用, 泥土中常含有结晶水, 填充在岩石粒间孔隙以及裂缝中, 会出现中子测井值增大, 电阻率降低, 尤其强蚀变段表现为良好储层的特性, 实际上强蚀变段原生孔隙被填充, 渗流特征差, 是差储层或非储层。

2) 通过测井敏感曲线建立 $R_t-\Phi_{CNL}$ 储层蚀变程度识别图版, 编写程序进行蚀变层段识别。将中子测井、电阻率测井对数值综合中子测井基值, 建立蚀变指数 AL 将蚀变等级划分为轻度或未蚀变($AL < 12$)、中度蚀变($12 < AL < 27$)、重度蚀变($27 < AL < 80$)三个等级。随火山岩蚀变程度加深: 核磁共振测井 T2 谱多为微孔、小孔, 中大孔减少; 核磁共振实验显示孔隙度变小; 孔隙度分布谱由宽变窄, 重度蚀变段孔隙度谱窄而不连续。

3) 当发生重度蚀变, 对储层产能有突出影响, 储层产量多为干层, 产量低。由此利用蚀变指数 AL 与孔隙度谱指数建立图版。

参考文献

- [1] 陈元勇, 王振奇, 邢成智, 曹少芳, 贾春明, 涂先俊. 准噶尔盆地车排子地区火山岩储集层特征[J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 23-26.
- [2] 苗春欣, 傅爱兵, 天井, 余光华, 李燕, 商丰凯, 倪自高, 王继红. 车排子地区火山岩储集空间发育特征及有利区带预测[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6): 27-31.
- [3] 王仁冲, 徐怀民, 邵雨, 李林, 魏凌云. 准噶尔盆地陆东地区石炭系火山岩储层特征[J]. 石油学报, 2008(3): 350-355.
- [4] 王振奇, 郑勇, 支东明, 党玉芳, 邢成智. 车排子地区石炭系油气成藏模式[J]. 石油天然气学报, 2010(2): 21-25+397-398
- [5] 朱世发, 朱筱敏, 刘学超, 李超, 王星星, 谈明轩, 耿名扬, 李艳平. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响——以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统为例[J]. 石油学报, 2014, 35(2): 276-285.
- [6] 朱学娟, 张向明, 范宜仁, 等. 蚀变玄武岩储层的有效性分析及储集性能评价[J]. 物探与化探, 2013, 37(3): 400-405.
- [7] 宋明水, 赵乐强, 吴春文, 秦峰, 曾治平. 准噶尔盆地车排子地区石炭系顶部风化壳结构及其控藏作用[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 313-321.
- [8] 王敏, 王永诗, 田淼, 等. 火成岩蚀变层段的有效储层识别及孔隙度定量表征[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(4): 22-27.
- [9] 高衍武, 胡婷婷, 陈国军, 程亮, 杨帆, 肖华. 中拐凸起黏土化蚀变火山岩孔隙度评价方法[J]. 测井技术, 2019, 43(1): 26-30+35.
- [10] 张丽华, 潘保芝, 单刚义, 林发武, 刘得芳. 渤海湾盆地南堡5号构造火山岩蚀变对储层物性影响及物性下限[J]. 地质与资源, 2020, 29(4): 351-356.
- [11] 魏翔宇, 高有峰, 魏琴, 孙松, 印长海, 刘家军, 陈桐, 王璞珺. 蚀变对中基性火山岩储层的控制作用: 以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J]. 世界地质, 2017, 36(2): 541-551.
- [12] 薛华庆, 胥蕊娜, 姜培学, 周尚文. 岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究[J]. 力学学报, 2015, 47(6): 1073-1078.
- [13] 王春燕, 张雷, 金雪英. 蚀变火山岩储层特征及气水层识别方法[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(3): 18-23+125.
- [14] 孙茹雪. 蚀变中基性火山岩储层 ABC-CM 最优化测井解释方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [15] Marantos, *et al.* (2008) Geochemical Characteristics of the Alteration of Volcanic and Volcaniclastic Rocks in the Feres Basin, Thrace, NE Greece. *Clay Minerals*, **43**, 575-595. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.4.05>
- [16] 李振苓, 沈金松, 李曦宁, 王磊, 淡伟宁, 郭森, 朱忠民, 于仁江. 用形态学滤波从电导率图像中提取缝洞孔隙度谱[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(4): 1295-1307.
- [17] 平海涛, 秦瑞宝, 孙建孟, 刘小梅, 黄涛. 电成像测井孔隙度谱分析及其在复杂储层渗透率评价中的应用研究[J/OL]. 地球物理学进展: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20201109.1408.122.html>, 2021-09-24.
- [18] Pola, A., *et al.* (2012) Influence of Alteration on Physical Properties of Volcanic Rocks. *Tectonophysics*, **566-567**, 67-86. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.017>