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. 吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2061-2074. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240231.
Li Yonggang. Logging Response Characteristics of Subaqueous Eruptive Volcanic Facies of Huoshiling Formation in Chaganhua Subdepression, Changling Fault Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (6): 2061-2074. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240231.

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

李永刚
中国石化东北油气分公司,长春 130062

摘要:松辽盆地长岭断陷查干花次凹火石岭组发育水下喷发火山岩,分为2类岩相4种亚相,在取心井段较少的情况下,实际生产中识别水下喷发火山岩相具有较大困难。本文以查干花地区水下喷发火山岩相为研究对象,分析总结了2类岩相4种亚相的电性特征:气携水下热碎屑流亚相火山灰球不发育段为高自然伽马、高电阻率,曲线呈中高幅指形,成像测井为高阻亮色,火山灰球发育段为低自然伽马、低电阻率,曲线中低幅较平直,成像测井为低阻暗色;水携火山高密度流亚相为高自然伽马、高电阻率,曲线呈中高幅指形,成像测井为高阻亮色;水下降落亚相为高自然伽马、低电阻率,曲线中低幅较平直或呈中高幅指形,成像测井为低阻暗色;含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相为低自然伽马、高电阻率,曲线呈中高幅指形,成像测井为高阻亮色。建立了岩相测井识别图版,实现了水下喷发火山岩相测井识别。

关键词:查干花地区;长岭断陷;水下喷发;火山岩相;电性特征;松辽盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240231 **中图分类号**:P168.13 **文献标志码**:A

Logging Response Characteristics of Subaqueous Eruptive Volcanic Facies of Huoshiling Formation in Chaganhua Subdepression, Changling Fault Depression

Li Yonggang
Northeast Oil and Gas Branch, SINOPEC, Changchun 130062, *China*

Abstract: There are subaqueous eruptive volcanic rocks in Huoshiling Formation of Chaganhua subdepression, Songliao basin, which are divided into two types of lithofacies and four types of subfacies. It is difficult to identify the subaqueous eruptive volcanic facies in actual production when there are few well cores. Taken the subaqueous eruptive volcanic facies of Chaganhua area as the research object, the logging characteristics of four subfacies of two types of lithofacies are analyzed and summarized in this paper: The undeveloped section of volcanic ash ball of the gas-carried subaqueous

收稿日期:2024-09-27
作者简介:李永刚(1975—),男,高级工程师,主要从事油气田开发工作,E-mail: lig508@126.com
基金项目:国家自然科学基金项目(41972313)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972313)

pyroclastic flow subfacies is high natural gamma and high resistivity, the curve is in the shape of medium-high amplitude finger, and the imaging logging shows high resistivity bright color. The developed section of volcanic ash ball is low natural gamma and low resistivity, the curve is flat with low amplitude, and the imaging logging shows low resistivity dark color. The water-carried volcanic high density flow subfacies is high natural gamma and high resistivity, the curve is in the shape of high amplitude finger, and the imaging logging shows high resistance bright color. The subaqueous landing subfacies is high natural gamma and low resistivity, the curve is low amplitude flat or in the shape of high amplitude finger, and the imaging logging shows low resistivity dark. The exoclastic pyroclastic sedimentary rock subfacies is low natural gamma and high resistivity, the curve is in the shape of high amplitude finger, and the imaging logging shows high resistivity bright color. The lithology logging recognition chart is established and the subaqueous eruptive volcanic lithology logging recognition is achieved.

Key words: Chaganhua area; Changling fault depression; subaqueous eruption; volcanic facies; electrical characteristics; Songliao basin

0 引言

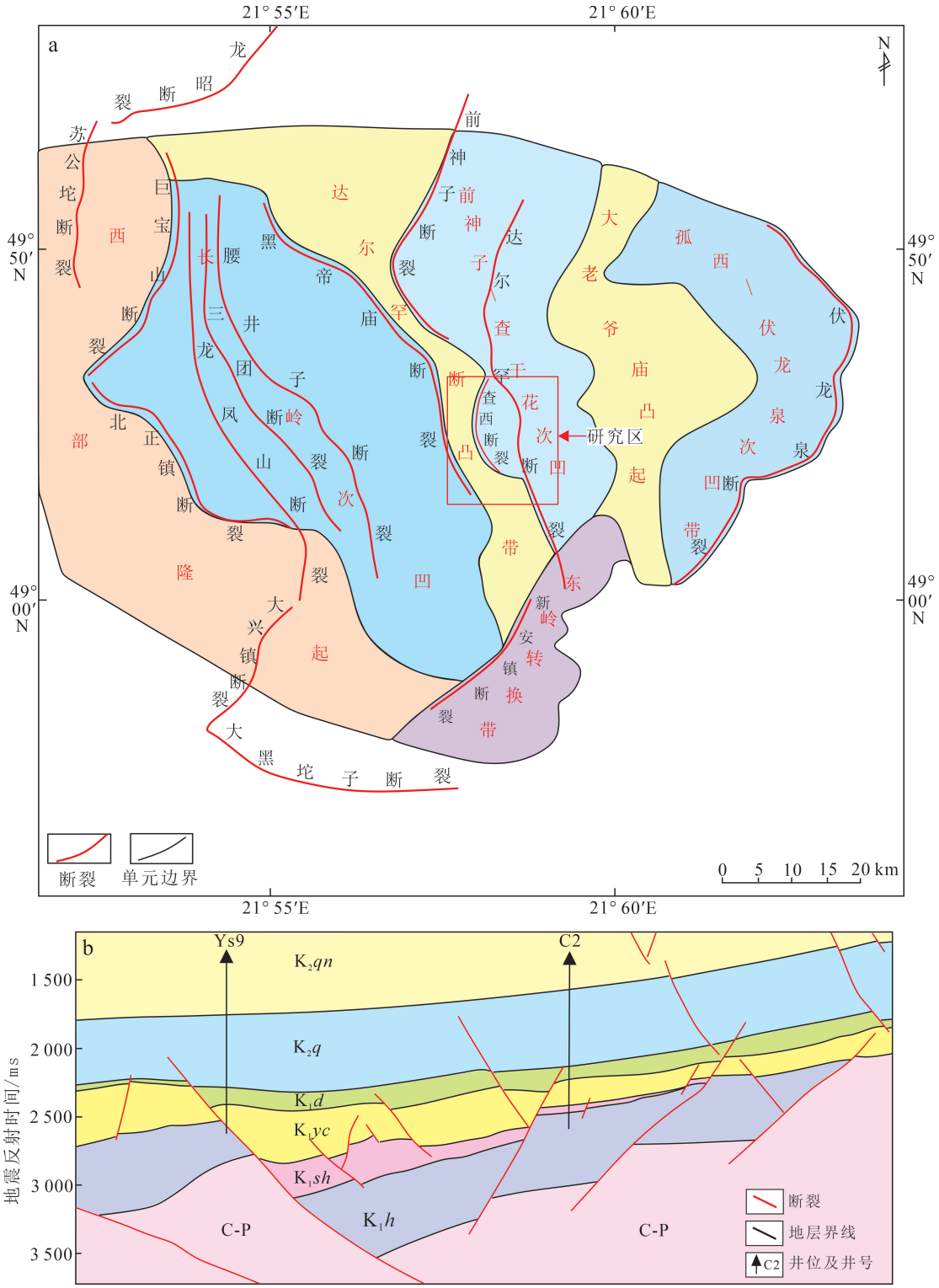
水下喷发火山在全球分布范围广[1],国外发现的水下火山喷发主要发生在海洋中[2-3]。近年来,国内对松辽盆地白垩纪湖盆地质进一步的深入研究表明,松辽盆地查干花地区陆相湖盆中也存在水下火山喷发[4],并蕴藏着大量工业天然气藏。这一发现开拓了盆地水下喷发油气勘探新局面,具有广阔的油气勘探前景。储层对于油气藏勘探至为关键[5-6],火山岩的有效储层主要受到火山岩亚相的控制[7-8]。查干花地区储层非均质性强,取心率低[9],给有效储层的探明造成了较大困难,故需要运用测井方法详细刻画火山岩岩相,建立单井水下喷发火山岩相测井划分方案,为查干花地区火山岩有利储层预测和油气藏勘探开发提供参考依据。

松辽盆地陆上喷发火山岩相包括爆发相、喷溢相、火山通道相、侵出相和火山沉积相[10]5种;而松辽盆地水下喷发火山岩则可划分为2类岩相[4],分别为水下爆发相和火山沉积相,其中,水下爆发相划分为气携水下热碎屑流、水携火山高密度流和水下降落3种亚相,火山沉积相则包括含外碎屑火山碎屑沉积岩1种亚相。对于湖盆火山岩相的测井识别,现今国内已进行过深入研究,建立了详细的测井识别图版[11-12];而水下喷发火山岩岩性主要以凝灰岩和沉凝灰岩为主[13],火山岩喷发类型不同,喷发期次数多,在纵向上具有多旋回和频繁互层的现象。相对于陆上喷发火山,水下喷发火山机制更为复杂[14-15],我国尚未建立水下喷发火山岩相测井划分方案。因此,如何利用测井数据进行凝灰岩以及沉凝灰岩的进一步识别是亟待解决的问题。

本文对查干花地区火石岭组5口井20筒140 m岩心测井资料进行整理与分析,利用取心段分析水下喷发火山岩岩相的常规测井和成像测井特征,并进行岩电实验验证,建立岩相测井识别图版,为识别预测未取心段水下喷发火山岩相和寻找有利储层提供理论依据。

1 区域地质概况

松辽盆地位于我国东北地区,在晚中生代主动板块边缘的裂谷作用下形成,是我国早白垩世大型含油气盆地之一[16]。松辽盆地为下部断陷层上部坳陷层的二元结构,在演化过程中经历了地壳和岩石圈地幔的拆沉作用,形成了长岭断陷等多个北北东向断陷盆地[17]。长岭断陷位于松辽盆地中南部,分为西部陡坡带、中部洼陷带和东部斜坡带,其中发育查干花次凹、达尔罕断凸带、长岭次凹和东岭转换带等7个三级构造单元(图1a)[4]。研究区查干花次凹走向接近南北方向,该区断陷层火山岩主要发育火石岭组和营城组(图1b)[16]。其中火石岭组(距今120~130 Ma)形成于断陷形成初期,火山活动频繁,以中基性熔岩和火山碎屑岩为主。该时期湖盆内水下火山喷发和火山喷发间歇期主要形成火山碎屑岩、沉火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩。营城组(距今120~130 Ma)代表白垩纪最大的区域性火山事件,火山岩以流纹岩、玄武岩和火山碎屑岩为主[18]。火石岭组和营城组之间的沙河子组形成于盆地扩张时期,为湖盆的广泛沉积,泥岩粉砂岩发育,是长岭断陷的主力烃源岩地层。



C. 石炭系；P. 二叠系；K_1h. 下白垩统火石岭组；K_1sh. 下白垩统沙河子组；K_1yc. 下白垩统营城组；K_1d. 下白垩统登娄库组；K_2q. 上白垩统泉头组；K_2qn. 上白垩统青山口组。据文献[4]修编。

图 1　研究区构造单元图(a)及地层剖面图(b)

Fig.1　Structural unit map (a) and stratigraphic profile map (b) of the study area

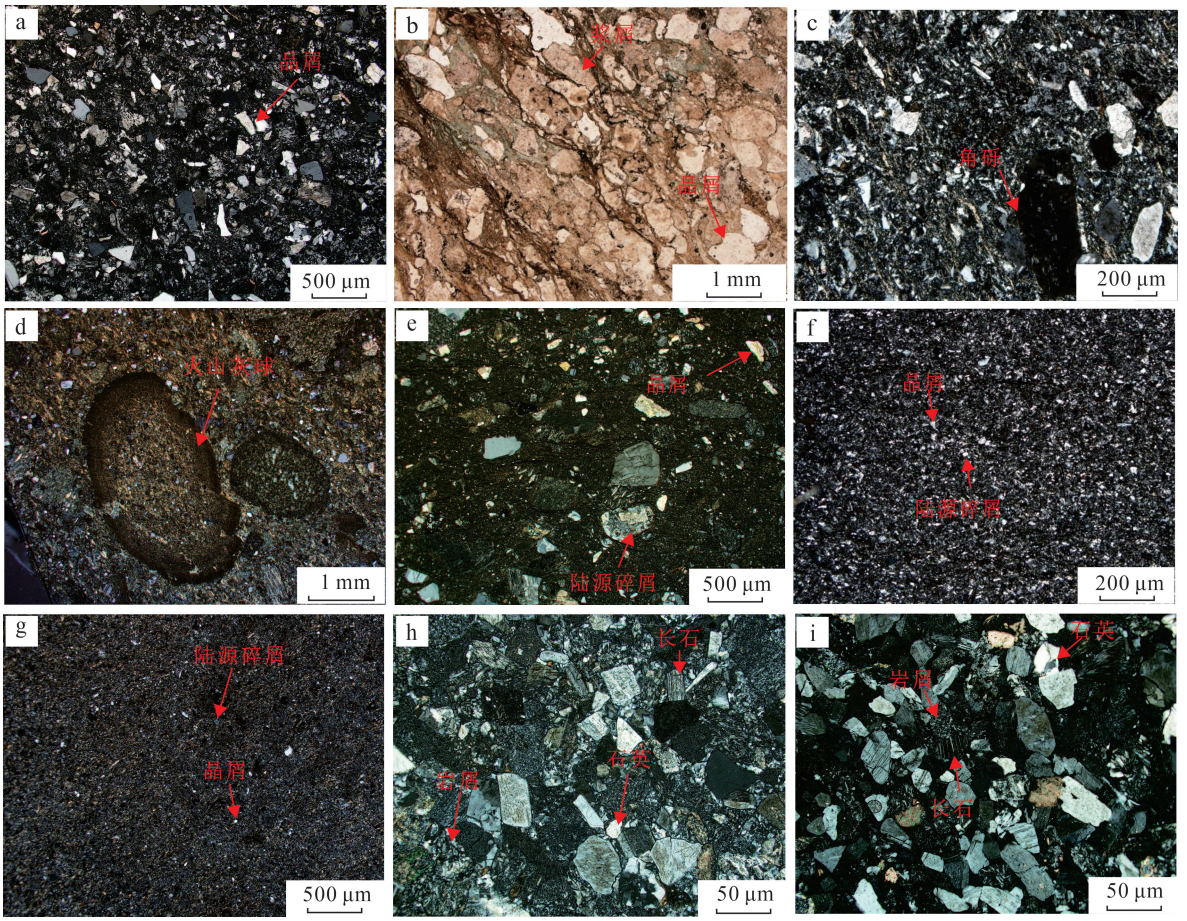
2 水下喷发火山岩岩相分类

查干花地区水下喷发火山岩可分为2类岩相和4种亚相[4],分别为水下爆发相气携水下热碎屑流亚相、水携火山高密度流亚相和水下降落亚相,以及火山沉积相含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相。气携水下热碎屑流亚相为水下火山喷发时火山口附近形成的岩浆、矿物碎屑、火山气及少量水组成的高温、高密度碎屑流体,其表层与水接触形成的水蒸气膜阻隔周围水体进入,使碎屑流长时间保持高温、高密度;主要发育凝灰岩(图2a—d),其中火山碎屑体积分数>90%,部分可见淬碎角砾(图2c)和大量火山灰球(图2d);层理不发育,块状构造。水携火山高密度流亚相为水下喷发过程中水体剧烈搅动,使火山碎屑物与正常沉积物混和的产物,主要发育细砂级沉凝灰岩(图2e)和粉砂级沉凝灰岩(图2f);细砂级沉凝灰岩发育脉状层理,粉砂级沉凝灰岩发育波状层理。水下降落亚相为极细粒火山碎屑颗粒,呈悬浮状逐渐降落堆积而成,主要发育泥级沉凝灰岩(图2g),水平层理发育。

含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相是火山喷发间歇期陆源碎屑和火山碎屑经水流改造,再经长距离搬运入湖沉积形成;主要发育凝灰质细砾岩(图2h)和凝灰质粗砾岩(图2i),发育平行层理。

3 水下喷发火山岩岩相测井响应特征

本文对查干花地区火石岭组5口井20筒140 m岩心测井资料的整理与分析表明,水下喷发火山岩岩性主要为凝灰岩和沉凝灰岩。考虑到水下火山岩研究过程中由于岩性分类太细,电性特征大



a. C2井,4 416.50 m,晶屑玻屑凝灰岩;b. C2井,4 416.85 m,晶屑浆屑熔结凝灰岩;c. C3井,4 265.80 m,含角砾凝灰岩,可见淬碎角砾;d. C2-3井,4 219.89 m,晶屑凝灰岩中火山灰球;e. C3井,4 633.29 m,细砂级沉凝灰岩;f. C3井,4 633.89 m,粉砂级沉凝灰岩;g. C2井,4 569.80 m,泥级沉凝灰岩;h. C3井,4 529.40 m,凝灰质细砾岩;i. C3井,4 915.60 m,凝灰质粗砂岩。

图2 查干花地区火石岭组水下喷发火山岩薄片照片

Fig.2 Thin section of subaqueous eruptive volcanic rocks in Huoshiling Formation, Chaganhua area

范围叠合，测井曲线区分度较差，故本文以岩相作为划分依据，以更好地进行水下喷发火山岩的电性特征识别。

不同火山岩相的成分、岩性不同，结构构造不同，每种岩相的测井参数、测井曲线变化幅度及形状也不同[19]，导致岩石电性资料多而杂乱，仅利用单井单曲线测井资料进行岩相分析具有一定的不确定性[20]；在研究区所有测井曲线中，自然伽马、声波时差、电阻率等测井曲线较齐全，因此需要综合多种测井曲线[21]特征进行岩相分析。查干花地区水下喷发火山岩主要为凝灰岩和沉凝灰岩，水下火山岩喷发类型不同，喷发期次数多，岩性在纵向上表现出多旋回和频繁互层的现象，不同岩石构造特征明显。对于非均质性较强、互层较多的沉积层构造识别，成像测井可以更直观地展现其特征，相比于常规测井更有优势[22]。因此，综合研究区实际，本次选取自然伽马(GR)、深侧向电阻率(R_D)、声波时差(AC)和密度(DEN)等参数对查干花地区 5 口井进行水下喷发火山岩相测井识别，先后综合测井参数(表 1)、常规测井曲线特征(图 3—图 7)和成像测井特征(图 3—图 7)分析水下喷发火山岩岩相的测井特征，并绘制岩相测井识别图版(图 8)。

3.1　气携水下热碎屑流亚相

气携水下热碎屑流亚相主要岩性为凝灰岩，常见发育火山灰球(图 2d)。火山灰球对凝灰岩电性特征影响较大，有无火山灰球发育的气携水下热碎屑流亚相测井数据有很大差别。

不发育火山灰球段典型井为 C3 井第 3 回次 4 624.00～4 634.00 m(图 3a、b)。常规测井数值 GR＞115 API，平均值为 138.0 API，R_D＞170 Ω·m，平均值为 496.6 Ω·m，AC 为 190～210 μs·m^{-1}，平均值为 199.9 μs·m^{-1}，DEN＜2.60 g·cm^{-3}，平均值为 2.490 g·cm^{-3}(表 1)。常规测井曲线呈现高自然伽马、高电阻率、中声波时差的中高幅指形特点；成像测井显示高阻亮色，块状构造，成像上表现为空白的特征，无层理(图 3b)。

气携水下热碎屑流亚相中火山灰球发育段典型井为 C2－3 井第 1 回次 4 219.60～4 226.60 m(图 4a、b)，与不发育火山灰球段气携水下热碎屑流亚相呈现不同的电性特征：常规测井数值 GR＜115 API，平均值为 91.6 API，R_D＜170 Ω·m，平均值为 55.3 Ω·m，AC 为 190～250 μs·m^{-1}，平均值为 207.7 μs·m^{-1}，DEN＞2.55 g·cm^{-3}，平均值为 2.630 g·cm^{-3}(表 1)。常规测井曲线呈现低自然伽马、低电阻率、中高声波时差的中高幅指形特点；成像测井显示低阻暗色，呈块状构造，成像上表现为杂乱的特征，可见少量层理(图 4b)。

3.2　水携火山高密度流亚相

水携火山高密度流亚相典型井为 C2－3 井第 2 回次 4 271.52～4 273.60 m 和 4 274.80～4 277.10 m(图 5a、b)。常规测井数值 GR＞115 API，平均值为 128.4 API，R_D＞170 Ω·m，平均值为 349.6 Ω·m，AC＜190 μs·m^{-1}，平均值为 188.3 μs·m^{-1}，DEN＞2.60 g·cm^{-3}，平均值为 2.630 g·cm^{-3}(表 1)。常规测井曲线呈现高自然伽马、高电阻率、低声波时差的中高幅指形特点；水携火山高密度流亚相成像测井显示高阻亮白色，可见波状层理，成像特征上表现为一组总体上与层面基本平行的正弦曲线，正弦曲线幅度差别不大(图 5b)。

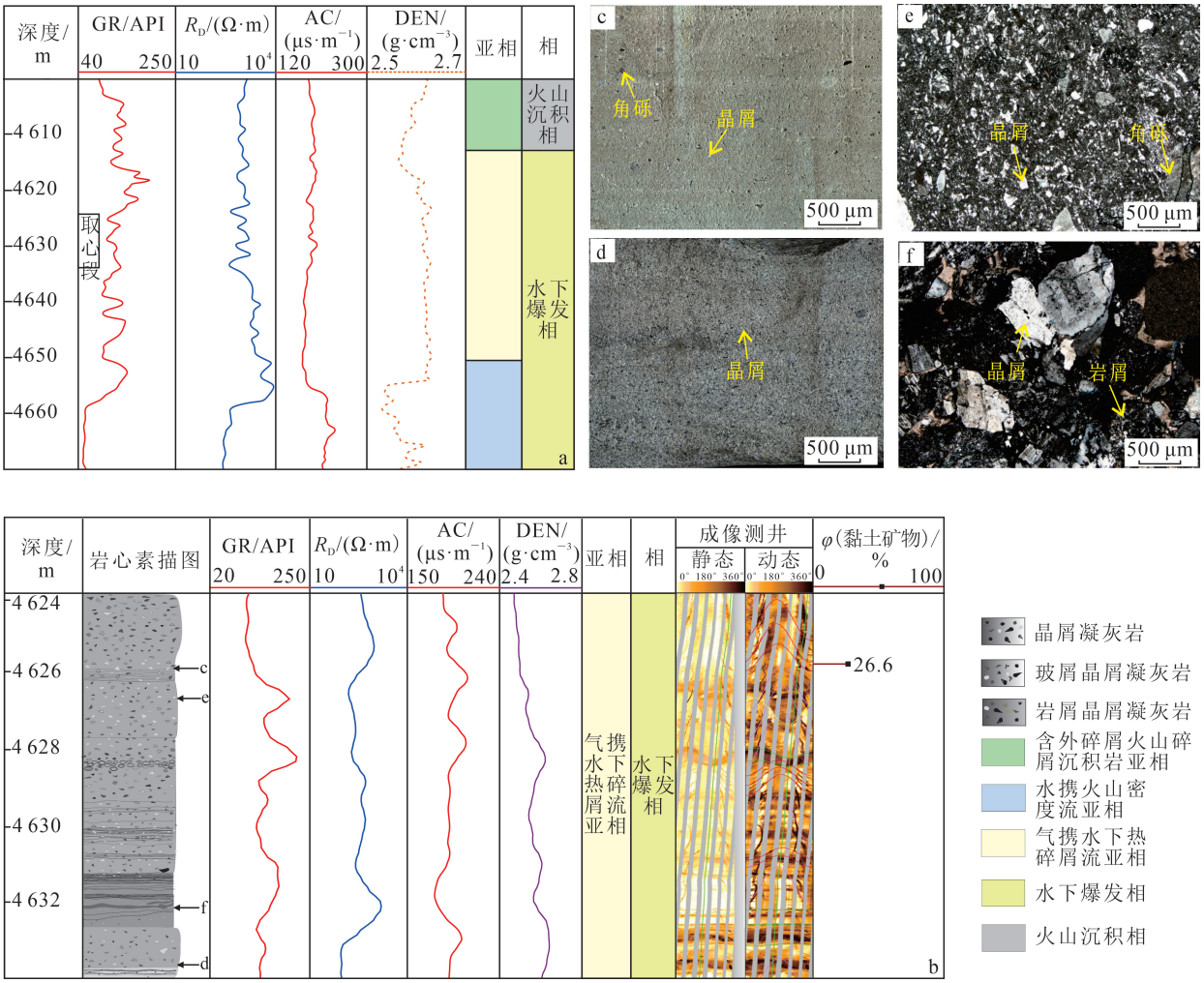
3.3　水下降落亚相

水下降落亚相典型井为 C2－3 井第 2 回次 4 273.60～4 274.80 m 和 4 277.10～4 278.52 m 与水携火山高密度流亚相互层(图 5a、b)，以及 C2 井第 2 回次 4 566.00～4 574.00 m(图 6a、b)。常规测

表 1　查干花地区水下喷发火山岩亚相测井值

Table 1　Logging values of subfacies of subaqueous eruptive volcanic rocks in Chaganhua area

亚相		GR/API		R_D/(Ω·m)		AC/(μs·m^{-1})		DEN/(g·cm^{-3})	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
气携水下热碎屑流亚相	火山灰球不发育	＞115	138.0	＞170	496.6	190～210	199.9	＜2.60	2.490
	火山灰球发育	＜115	91.6	＜170	55.3	190～250	207.7	＞2.55	2.630
水携火山高密度流亚相		＞115	128.4	＞170	349.6	＜190	188.3	＞2.60	2.630
水下降落亚相		＞115	125.2	＜170	25.4	＞210	229.2	＞2.60	2.640
含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相		＜115	100.6	＞170	657.0	＜190	183.4	＜2.60	2.560



a. C3井未取心段测井曲线及亚相预测;b. C3井4 624.00～4 63 4.00 m取心段电性特征,成像空白,无层理;c. C3井,4 625.90 m,含角砾晶屑凝灰岩岩心照片;d. C3井,4 633.70 m,晶屑凝灰岩岩心照片;e. C3井,4 626.50 m,含角砾晶屑凝灰岩薄片照片;f. C3井,4 632.20 m,岩屑晶屑凝灰岩薄片照片。

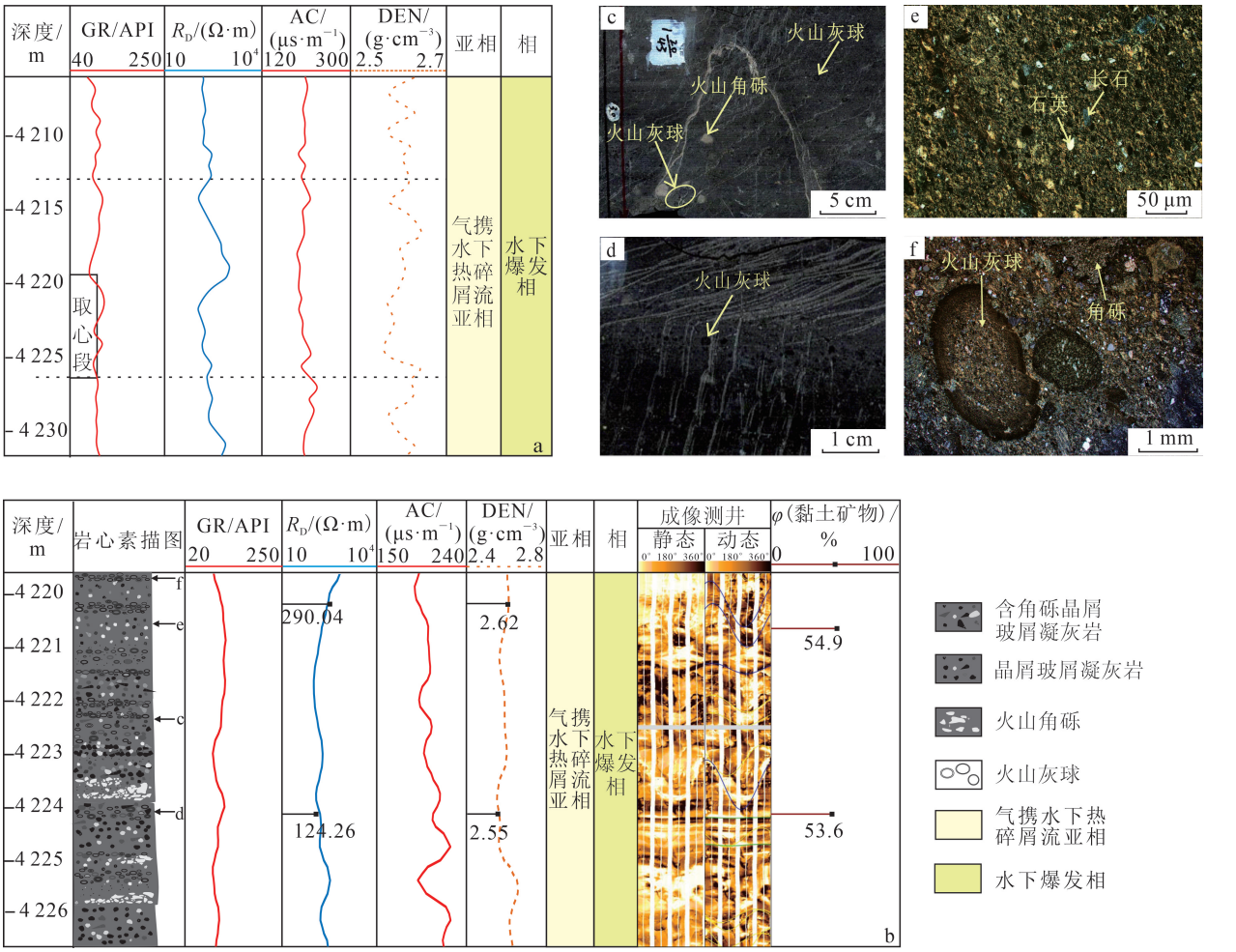
图3 研究区火石岭组气携水下热碎屑流亚相(火山灰球不发育段)电性特征

Fig.3 Electrical characteristics of gas-carried subfacies pyroclastic flow subphase (undeveloped section of volcanic ash ball) of Huoshiling Formation in the study area

井数值GR＞115 API,平均值为125.2 API,R_D＜170 Ω·m,平均值为25.4 Ω·m,AC＞210 μs·m^{-1},平均值为229.2 μs·m^{-1},DEN＞2.60 g·cm^{-3},平均值为2.640 g·cm^{-3}(表1),呈现高自然伽马、低电阻率、高声波时差的特点。常规测井曲线呈现两种不同特征,水下降落亚相与水携火山高密度流亚相互层段曲线呈中高幅指形(图5a),厚层水下降落亚相段曲线低幅较平直(图6a);成像测井显示显示低阻暗色,可见水平层理,成像特征上表现为一组与层面基本平行的正弦曲线(图6b)。

3.4 含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相

含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相典型井为C3井第2回次4 526.13～4 528.00 m和4 528.50～4 529.50 m,主要岩性为凝灰质细砾岩(图7a、b)。常规测井数值GR＜115 API,平均值为100.6 API,R_D＞170 Ω·m,平均值为657.0 Ω·m,AC＜190 μs·m^{-1},平均值为183.4 μs·m^{-1},DEN＜2.60 g·cm^{-3},平均值为2.560 g·cm^{-3}(表1)。常规测井呈现低自然伽马、高电阻率、低声波时差的中高幅指形特点;成像测井显示为高阻亮白色,可见块状层理或少量平行层理,成像特征上表现为空白或一组平行的正弦曲线,正弦曲线产状一致(图7b)。



a. C2－3 井未取心段测井曲线及亚相预测；b. C2－3 井 4 219.60～4 226.60 m 取心段电性特征，成像杂乱，少量层理；c. C2－3 井，4 222.40 m，含角砾晶屑玻屑凝灰岩岩心照片，可见火山灰球；d. C2－3 井，4 224.00 m，晶屑玻屑凝灰岩岩心照片；e. C2－3 井，4 220.50 m，晶屑玻屑凝灰岩薄片照片；f. C2－3 井，4 219.70 m，含角砾晶屑玻屑凝灰岩薄片照片，可见火山灰球。

图 4　研究区火石岭组气携水下热碎屑流亚相(火山灰球发育段)电性特征

Fig.4　Electrical characteristics of gas-carried subaqueous pyroclastic flow subfacies (volcanic ash ball development section) of Huoshiling Formation in the study area

4　讨论

4.1　常规测井分析

岩相的电性特征受岩石本身的性质和所处地质环境等多种因素的控制，测井值一般与岩石泥质体积分数等因素有关[23]，测井曲线的形态一般与沉积层韵律和裂缝等因素有关[24]。

电阻率与岩石泥质体积分数一般呈负相关关系[25]。对于气携水下热碎屑流亚相，有无火山灰球段电性差异较大。由于火山灰球是被气体包裹着的火山灰在喷发搬运时受气流影响相互碰撞固结而成[26]，火山灰球段一般连续发育，堆积量大，故其中所含火山灰较多，黏土矿物体积分数可达 54.9%(图 4b)，而不发育火山灰球的凝灰岩黏土矿物体积分数为26.6%(图 3b)，低于火山灰球发育段，导致火山灰球发育段气携水下热碎屑流亚相的电阻率低于火山灰球不发育段。同理，水下降落亚相是悬浮在水中的火山灰沉降形成，黏土矿物体积分数较高，可达 52.5%(图 6b)，所以其电阻率较低；而水携火山密度流亚相和含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相黏土矿物体积分数低(图 5b、图 7b)，电阻率较高。

测井曲线的形态一般与沉积层韵律和裂缝等因素有关。水下降落亚相呈现两种不同的曲线形态，这是因为厚层水下降落亚相是由火山灰均质沉降形成的[27]，所以其测井曲线幅度小较平直(图 6a、b)；而水下降落亚相与水携火山高密度流亚相互层段为

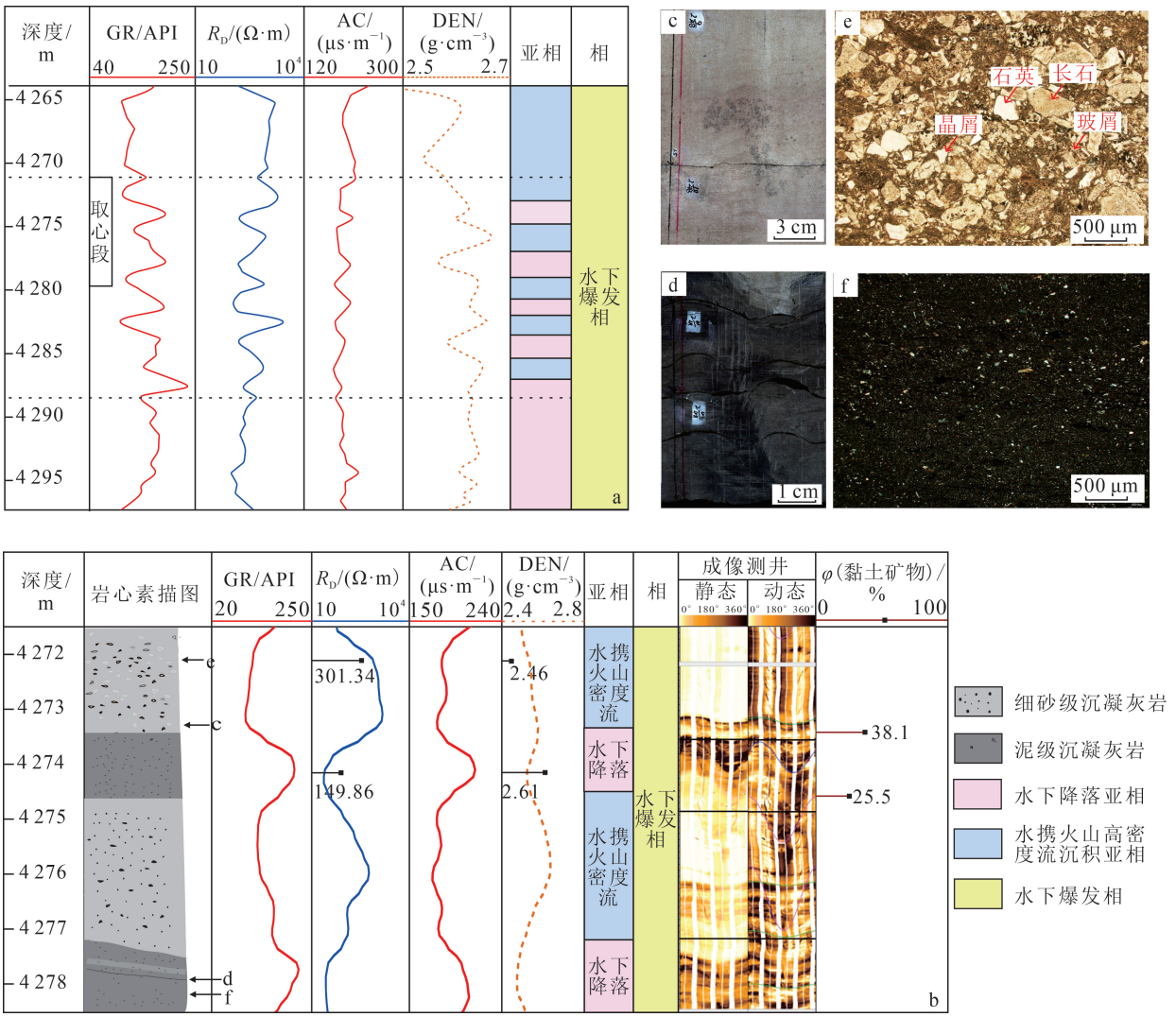
非均质,故其测井曲线有波动,为中高幅指形(图5a、b)。同理,气携水下热碎屑流亚相和含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相都是在气体或者水流波动条件下形成的[28-29],沉积层的非均质性强,测井曲线形态均为中高幅指形(图3,图4,图7a、b)。

4.2 成像测井分析

层理的形成与沉积环境密切相关[30]。水下火山喷发初期,由气膜包裹的火山灰完全与水隔绝,发生垮塌后形成由气体搬运的火山热碎屑流[4],其性质类似重力流,所以沉积后形成的气携水下热碎屑流亚相层理不太发育,呈块状构造。火山碎屑物质与水混合后,在水的作用下形成水携火山密度流,水下环境波动振荡,波浪的起伏使之易沉积形成波状层理。火山碎屑与水充分混合后,悬浮在水中极细粒的火山尘在静水环境中发生沉降,形成的水下降落亚相发育水平层理。在火山喷发间歇期,陆上火山碎屑被剥蚀搬运入水沉积[4],与水中火山碎屑混合沉积后形成含外碎屑火山碎屑沉积岩,直接沉积的形成块状层理,在较强水动力条件下沉积的易形成少量平行层理。

4.3 岩电实验分析

除岩石物性以外,测井信息可能受到井眼环境、



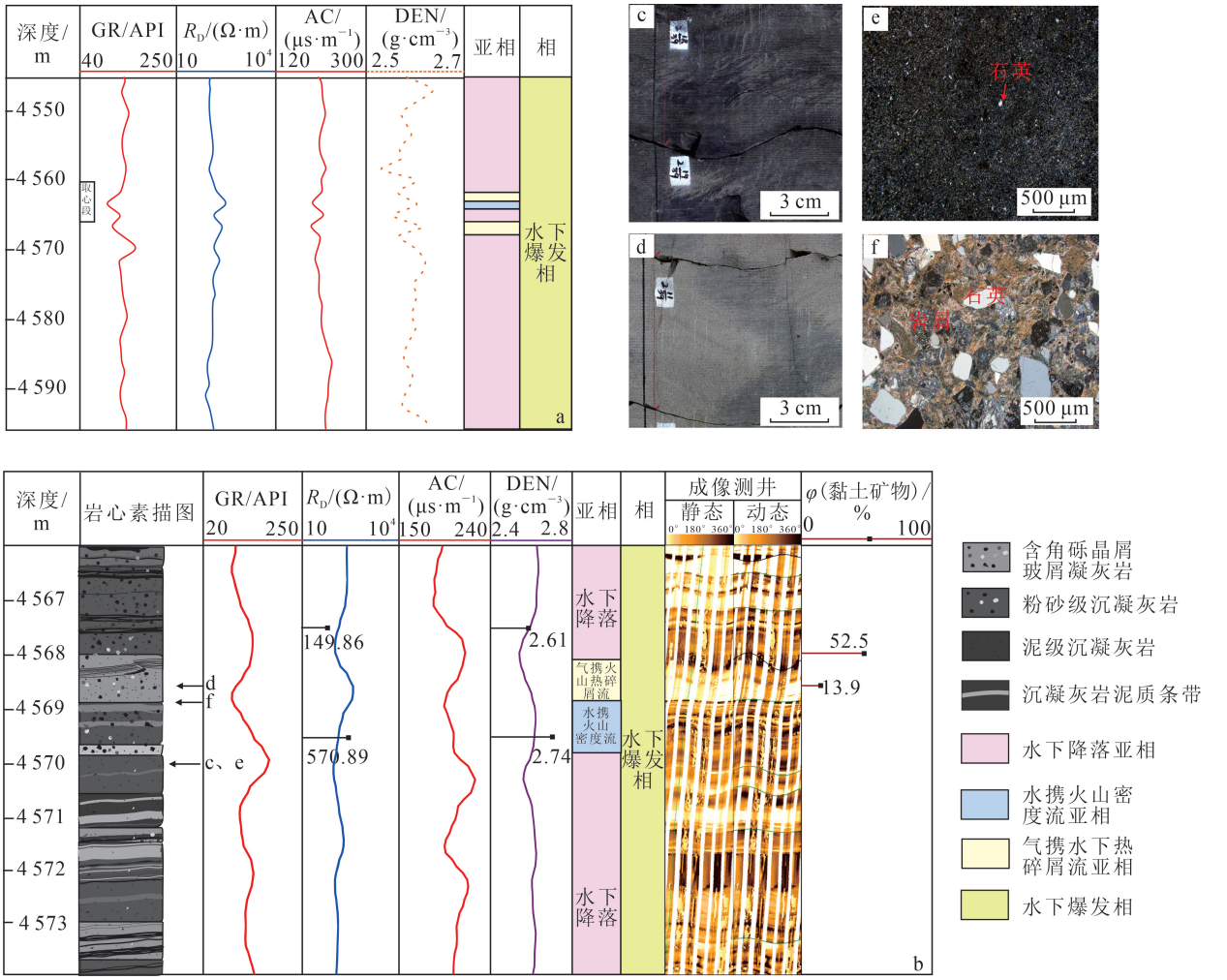
a. C2-3井未取心段测井曲线及亚相预测;b. C2-3井4 271.52~4 278.52 m取心段电性特征,成像测井曲线似正弦曲线,波状层理;c. C2-3井,4 273.50 m,细砂级沉凝灰岩岩心照片;d. C2-3井,4 278.00 m,泥级沉凝灰岩岩心照片;e. C2-3井,4 272.50 m,细砂级沉凝灰岩薄片照片;f. C2-3井,4 278.10 m,泥级沉凝灰岩薄片照片。

图5 研究区火石岭组水携火山高密度流亚相电性特征

Fig.5 Electrical characteristics of water-carried volcanic high density flow subfacies of Huoshiling Formation in the study area

测量方式、仪器结构及操作者处理方式等其他外界因素的影响[31]；因此，需要对研究对象进行岩电实验测试，以排除岩石测井数据在地下所受围岩、井压、泥浆和仪器等其他因素的干扰[32-33]，使结果只受岩石本身性质控制。本文取 4 种亚相的岩心样品进行岩电实验电阻率测试（表 2）发现，气携水下热碎屑流亚相（火山灰球不发育）、水携火山高密度流亚相和含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相电阻率较高；气携水下热碎屑流亚相（火山灰球发育）和水下降落亚相电阻率较低。岩电实验测试所得结果与第 3 节测井响应特征基本吻合，进一步证实了上述水下喷发岩相电性特征的可靠性。

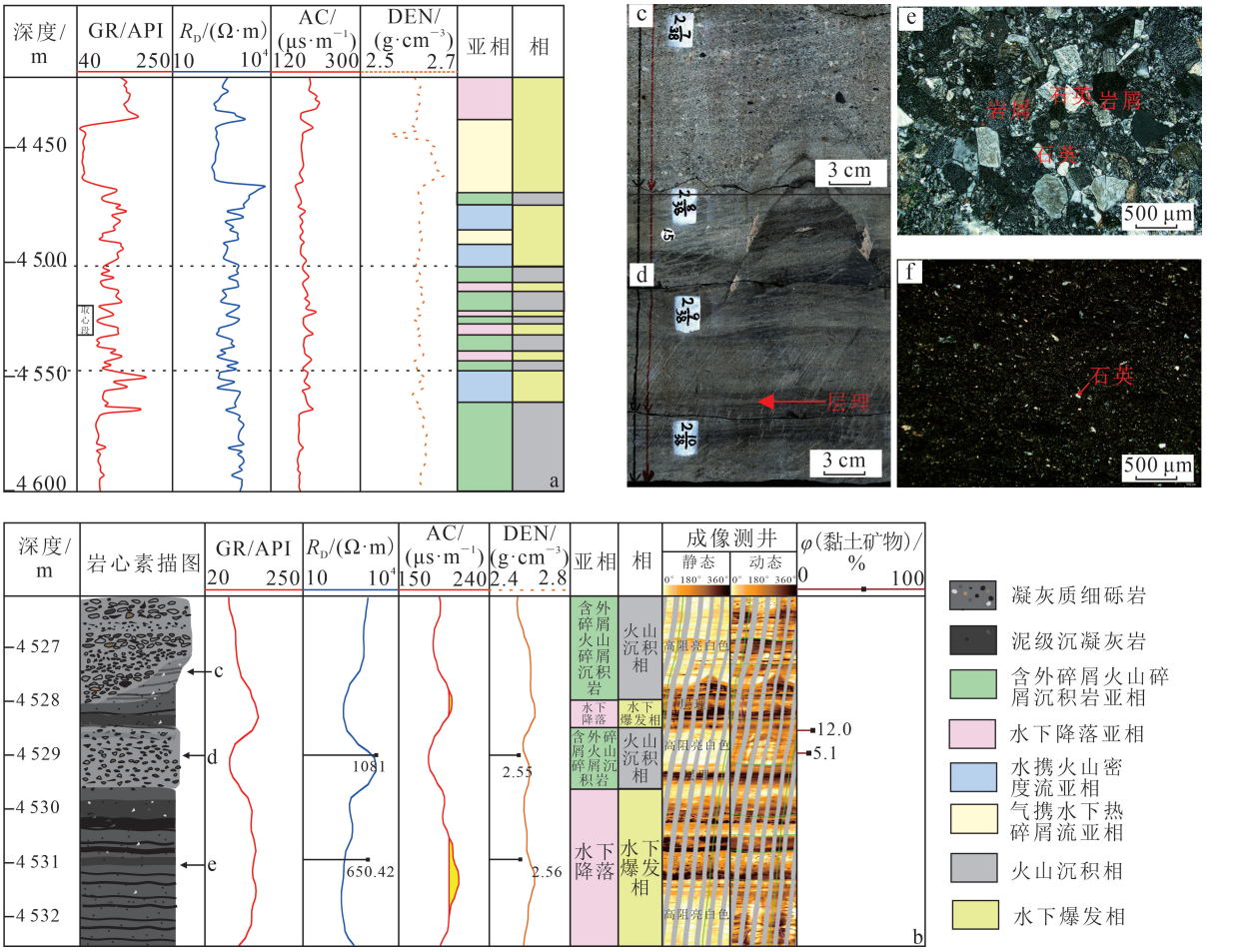
将上述水下喷发火山岩 4 种亚相的测井数据投到直角坐标系中，绘制成双参数散点交会图[34]，即研究区岩相测井识别图版（图 8）。在 AC－GR 和 R_D－GR 交会图中，火山灰球发育段气携水下热碎屑流亚相、水下降落亚相和含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相界限较为清晰，火山灰球不发育段气携水下热碎屑流亚相和水携火山高密度流亚相数据有部分重叠（图 8a、b）；而在 DEN－GR 交会图中，火山灰球不发育段气携水下热碎屑流亚相和水携火山高密度流亚相之间界限比较清晰，可以较好地识别两者。因此，该水下喷发岩相测井交会图版可以准确有效地预测火石岭组水下喷发火山岩相。



a. C2 井 4 546.00～4 600.00 m 测井曲线及亚相预测；b. C2 井 4 566.00～4 574.00 m 取心段电性特征；c. C2 井，4 570.00 m，泥级沉凝灰岩岩心照片；d. C2 井，4 568.50 m，晶屑玻屑凝灰岩岩心照片；e. C2 井，4 570.00 m，泥级沉凝灰岩薄片照片；f. C2 井，4 568.90 m，晶屑玻屑凝灰岩薄片照片。

图 6　研究区火石岭组水下降落亚相电性特征

Fig.6　Electrical characteristics of subaqueous landing subfacies of Huoshiling Formation in the study area



a. C3井4 400.00～4 600.00 m测井曲线及亚相预测;b. C3井4 526.13～4 532.60 m取心段电性特征;c. C3井,4 527.30～4 527.50 m,凝灰质细砾岩岩心照片;d. C3井,4 529.00 m,泥沉凝灰岩岩心照片;e. C3井,4 527.40 m,凝灰质细砾岩薄片照片;f. C3井,4 531.00 m,泥级沉凝灰岩薄片照片。

图7 研究区火石岭组含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相电性特征

Fig.7 Electrical characteristics of exoclastic pyroclastic sedimentary rock subfacies of Huoshiling Formation in the study area

表2 查干花地区水下喷发火山岩亚相电阻率和密度

Table 2 Subfacies resistivity and density of subaqueous eruptive volcanic rocks in Chaganhua area

岩相		深度/m	R_D/(Ω·m)	DEN/(g·cm^{-3})
气携水下热碎屑流亚相	火山灰球不发育	4 418.20	3 417.69	2.55
		4 626.50	1 307.52	2.52
	火山灰球发育	4 220.70	290.04	2.6
		4 224.10	124.26	2.7
水携火山高密度流亚相		4 569.37	570.89	2.61
		4 779.16	650.42	2.57
水下降落亚相		4 567.50	149.86	2.74
含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相		4 529.00	1 081.73	2.57
		4 918.60	747.41	2.62

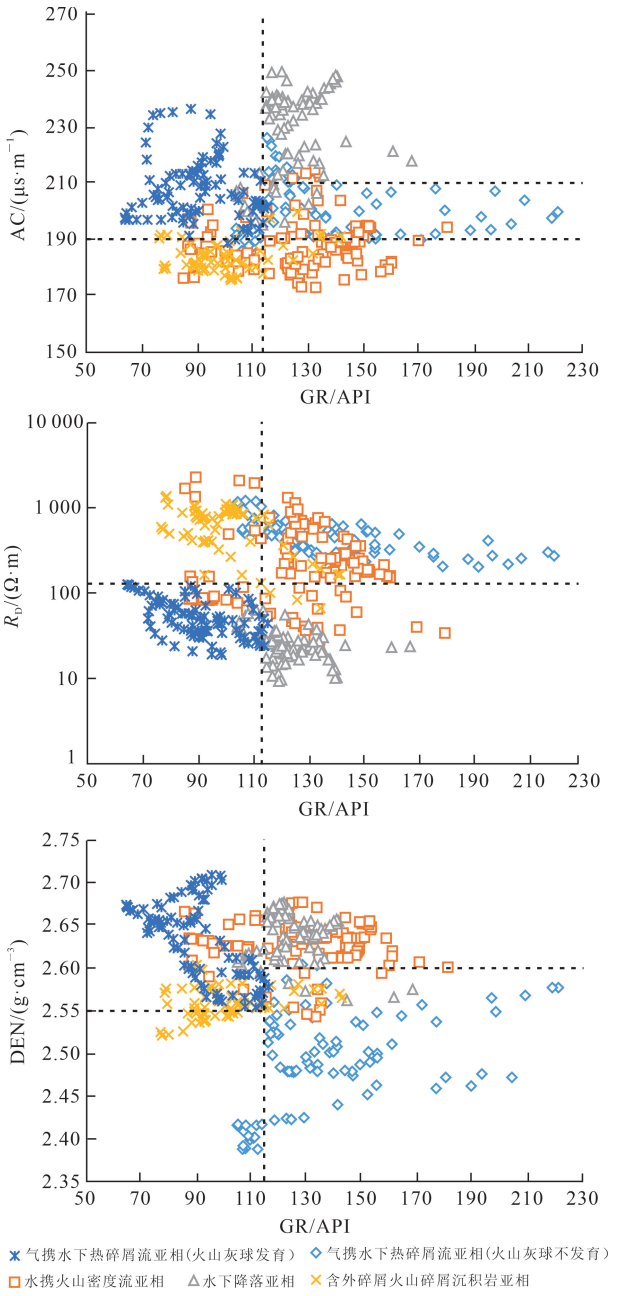


图 8　查干花地区水下喷发火山岩 4 种亚相测井识别图版

Fig.8　Log identification chart of four subfacies of subaqueous eruptive volcanic rocks in Chaganhua area

5　结论

查干花次凹水下喷发火山岩分为 2 种岩相 4 种亚相，根据测井曲线形态特征和测井参数值结合常规测井和成像测井总结了查干花地区水下喷发火山岩相电性特征，建立了水下喷发火山岩的测井识别模板。

1）气携水下热碎屑流亚相火山灰球不发育段显示高自然伽马、高电阻率、中声波时差和低密度的特征，曲线呈中高幅指形，成像测井显示高阻亮色，块状构造；火山灰球发育段显示低自然伽马、低电阻率、高声波时差和中密度的特征，曲线中低幅光滑，形态较为平直，成像测井显示低阻暗色，块状构造，可见少量层理。

2）水携火山高密度流亚相显示高自然伽马、高电阻率、低声波时差和中高密度的特征，曲线中高幅，形态为指形，成像测井显示高阻亮色，可见波状层理。

3）水下降落亚相显示高自然伽马、低电阻率、高声波时差和中低密度的特征，曲线中低幅较平直或呈中高幅指形，成像测井显示低阻暗色，可见水平层理。

4）含外碎屑火山碎屑沉积岩亚相显示低自然伽马、高电阻率、低声波时差和中低密度的特征，曲线为中高幅指形，成像测井显示高阻亮色，可见平行层理发育。

根据不同岩相常规测井和成像测井的特点，可准确、有效地进行水下喷发火山岩相识别。

参考文献（References）：

[1] Chadwick W W, Merle S G, Buck N J, et al. Imaging of CO_2 Bubble Plumes Above an Erupting Submarine Volcano, NW Rota - 1, Mariana Arc [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2014, 15(11): 4325 - 4342.

[2] Terry J P, Goff J, Winspear N, et al. Tonga Volcanic Eruption and Tsunami, January 2022: Globally the Most Significant Opportunity to Observe an Explosive and Tsunamigenic Submarine Eruption Since AD 1883 Krakatau[J]. Geoscience Letters, 2022, 9: 24.

[3] Romagnoli C, Jakobsson S P. Post-Eruptive Morphological Evolution of Island Volcanoes: Surtsey as a Modern Case Study[J]. Geomorphology, 2015, 250: 384 - 396.

[4] 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, Mou Hansheng, Liu Yuhu, et al. Facies Types, Characteristics and Reservoir Significance of Underwater Eruptive Volcanic Rocks in Lake Basin: A Case Study of Cretaceous in Chaganhua Area, SouthernSongliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 719 -

730.

[5] 唐华风,王璞珺,边伟华,等. 火山岩储层地质研究回顾[J]. 石油学报,2020, 41(12): 1744-1773.
Tang Huafeng, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Review of Volcanic Rock Reservoir Geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 41(12): 1744-1773.

[6] 刘嘉麒,孟凡超,崔岩,等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报,2010, 26(1):1-13.
Liu Jiaqi, Meng Fanchao, Cui Yan, et al. Discussion on Accumulation Mechanism of Volcanic Oil and Gas Reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 1-13.

[7] 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.

[8] 任宪军,石云倩,靖伟. 陆相湖盆水下喷发火山岩储层特征及发育模式[J]. 油气藏评价与开发,2024, 14(2): 176-189.
Ren Xianjun, Shi Yunqian, Jing Wei. Characteristics and Development Models of Underwater Volcanic Rock Reservoirs in Continental Lake Basins[J]. Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(2): 176-189.

[9] 冷庆磊,朱建峰,刘玉虎. 松辽盆地南部查干花次凹下白垩统火山岩储层特征与发育规律[J]. 世界地质, 2023, 42(3): 527-535.
Leng Qinglei, Zhu Jianfeng, Liu Yuhu. Reservoir Characteristics and Development Rules of Cretaceous Volcanic Rocks in the Lower Chagan Hua Subdepression, Southern Songliao Basin[J]. World Geology, 2023, 42(3): 527-535.

[10] 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 in Songliao Basin: Types, Characteristics and Reservoir Significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33(4): 449-456.

[11] 蒙启安,门广田,张正和. 松辽盆地深层火山岩体、岩相预测方法及应用[J]. 大庆石油地质与开发,2001, 20(3): 21-24, 75.
Meng Qi'an, Men Guangtian, Zhang Zhenghe. Prediction Method and Application of Deep Volcanic Rock Mass and Lithofacies in Songliao Basin[J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2001, 20(3): 21-24, 75.

[12] 王泽华,朱筱敏,孙中春,等. 测井资料用于盆地中火成岩岩性识别及岩相划分:以准噶尔盆地为例[J]. 地学前缘,2015, 22(3): 254-268.
Wang Zehua, Zhu Xiaomin, Sun Zhongchun, et al. Lithology Identification and Lithofacies Division of Igneous Rocks in Basins Using Logging Data: A Case Study of Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 254-268.

[13] Lockwood J P, Hazlett R W. Volcanoes: Global Perspectives[M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2010: 43-64.

[14] 焦鑫,柳益群,杨晚,等. 水下火山喷发沉积特征研究进展[J]. 地球科学进展,2017, 32(9): 926-936.
Jiao Xin, Liu Yiqun, Yang Wan, et al. Research Progress on Sedimentary Characteristics of Underwater Volcanic Eruptions[J]. Advances in Earth Sciences, 2017, 32(9): 926-936.

[15] 刘德成,陈亚军,伍宏美,等. 陆上和水下喷发成因火山岩特征及元素地球化学判别:以新疆三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩为例[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(6): 41-51.
Liu Decheng, Chen Yajun, Wu Hongmei, et al. Characteristics and Geochemical Identification of Volcanic Rocks from Eruptive Origin on Land and Underwater: A Case Study of Upper Carboniferous Volcanic Rocks in Malang Sag, Santanghu Basin, Xinjiang[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(6): 41-51.

[16] Wang Pujun, Mattern F, Didenko N A, et al. Tectonics and Cycle System of the Cretaceous Songliao Basin: An Inverted Active Continental Margin Basin[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 82-102.

[17] 任宪军. 松辽盆地长岭断陷盆缘陡坡带中性火山岩相模式及其对储层的控制作用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2022, 52(3): 816-828.
Ren Xianjun. The Neutral Volcanic Facies Model and Its Controlling Effect on Reservoir in the Steep Slope Zone of Changling Fault Depression in Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(3): 816-828.

[18] 王清海，许文良. 松辽盆地形成与演化的深部作用过程：中生代火山岩探针[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2003，33(1)：37－42.
Wang Qinghai，Xu Wenliang. The Deep Process of Formation and Evolution of Songliao Basin：Mesozoic Volcanic Rock Probe [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2003，33(1)：37－42.

[19] 吴健，胡向阳，何胜林，等. 随钻测井曲线影响因素分析与评价[J]. 地球物理学进展，2013，28(5)：2642－2650.
Wu Jian，Hu Xiangyang，He Shenglin，et al. Analysis and Evaluation of Influencing Factors of Logging While Drilling[J]. Progress in Geophysics，2013，28(5)：2642－2650.

[20] 牟丹，张丽春，徐长玲. 3 种经典机器学习算法在火山岩测井岩性识别中的对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2021，51(3)：951－956.
Mou Dan，Zhang Lichun，Xu Changling. Comparison of Three Classical Machine Learning Algorithms in Lithology Identification of Volcanic Rock Logging[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2021，51(3)：951－956.

[21] 葛红旗. 酸性火山岩岩性识别方法及应用[J]. 油气藏评价与开发，2015，5(5)：11－16.
Ge Hongqi. Lithology Identification Method of Acidic Volcanic Rocks and Its Application [J]. Reservoir Evaluation and Development，2015，5(5)：11－16.

[22] 冯冲，王清斌，谭忠健，等. 富火山碎屑地层复杂岩性测井分类与识别：以 KL16 油田为例[J]. 石油学报，2019，40(2)：91－101.
Feng Chong，Wang Qingbin，Tan Zhongjian，et al. Logging Classification and Identification of Complex Lithology in Rich Pyroclastic Formation：A Case Study of KL16 Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica，2019，40(2)：91－101.

[23] 程超，张亮，李培彦，等. 碎屑岩泥质分布形式的测井评价研究进展[J]. 地球物理学进展，2021，36(3)：1052－1061.
Cheng Chao，Zhang Liang，Li Peiyan，et al. Research Progress on Logging Evaluation of Clastic Shale Distribution[J]. Progress in Geophysics，2021，36(3)：1052－1061.

[24] 李新虎，祁云望. 测井曲线形态的自动识别方法研究[J].大庆石油地质与开发，2006，25(5)：116－118.
Li Xinhu，Qi Yunwang. Research on Automatic Recognition Method of Well Log Pattern[J]. Daqing Petroleum Geology and Development，2006，25(5)：116－118.

[25] 刘成川，陈俊，黎华继，等. 中江气田沙溪庙组气藏致密砂岩储层测井评价[J]. 石油物探，2020，59(1)：131－140.
Liu Chengchuan，Chen Jun，Li Huaji，et al. Log Evaluation of Tight Sandstone Reservoir in Shaximiao Formation Gas Reservoir，Zhongjiang Gas Field[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum，2020，59(1)：131－140.

[26] 田伟，王磊，潘路，等. 塔里木溢流玄武岩省的巨型长英质热火山碎屑流爆发记录[J]. 岩石学报，2018，34(1)：63－74.
Tian Wei，Wang Lei，Pan Lu，et al. A Giant Felsic Pyroclastic Flow Eruption Records in the Tarim Flood Basalt Province[J]. Acta Petrologica Sinica，2018，34(1)：63－74.

[27] White J D L. Subaqueous Eruption-Fed Density Currents and Their Deposits [J]. Precambrian Research，2000，101(2/3/4)：87－109.

[28] Mueller W U. A Subaqueous Eruption Model for Shallow-Water，Small Volume Eruptions：Evidence from Two Precambrian Examples[M]// White J D L，Smellie J L，Clague D A. Explosive Subaqueous Volcanism. Washington D C：American Geophysical Union，2003：189－203.

[29] 年涛，王贵文，范旭强，等. 成像测井缝洞解释评价研究进展[J]. 地质论评，2021，67(2)：476－488.
Nian Tao，Wang Guiwen，Fan Xuqiang，et al. Research Progress on Fracture-Hole Interpretation and Evaluation of Imaging Logging [J]. Geological Review，2021，67(2)：476－488.

[30] 朱筱敏，张强，赵澄林，等. 塔里木中部地区东河砂岩段沉积特征和沉积环境演变[J]. 地质科学，2004，39(1)：27－35.
Zhu Xiaomin，Zhang Qiang，Zhao Chenglin，et al. Sedimentary Characteristics and Sedimentary Environment Evolution of Donghe Sandstone Member in Central Tarim[J]. Scientia Geologica Sinica，2004，39(1)：27－35.

[31] 赖锦，庞小娇，赵鑫，等. 测井地质学研究中的典型误区与科学思维[J]. 天然气工业，2022，42(7)：31－44.
Lai Jin，Pang Xiaojiao，Zhao Xin，et al. Typical Errors and Scientific Thinking in Well Logging Geology[J]. Natural Gas Industry，2022，42(7)：31－44.

[32] 仵杰，姬玉，成志刚，等. 泥浆侵入对随钻电磁波电阻

率测井响应的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2020, 35(1): 49-54.
Wu Jie, Ji Yu, Cheng Zhigang, et al. Effect of Mud Intrusion on Electromagnetic Wave Resistivity Logging Response While Drilling[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2020, 35(1): 49-54.

[33] 程文涛,刘真,黄小俊,等. 测井曲线质量的影响因素与控制[J]. 油气田地面工程,2014, 33(2): 87-88.
Cheng Wentao, Liu Zhen, Huang Xiaojun, et al. Influencing Factors and Control of Log Quality[J]. Oil and Gas Field Surface Engineering, 2014, 33(2): 87-88.

[34] 冉冶,王贵文,赖锦,等. 利用测井交会图法定量表征致密油储层成岩相:以鄂尔多斯盆地华池地区长7致密油储层为例[J]. 沉积学报,2016, 34(4): 694-706.
Ran Ye, Wang Guiwen, Lai Jin, et al. Diagenetic Facies of Tight Oil Reservoir Based on the Prescribed Log Intersection Chart: A Case Study of Chang 7 Tight Oil Reservoir in Huachi Area, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(4): 694-706.

中国精品科技期刊证书
Certificate of Outstanding S&T Journals of China
2023

2023 中国精品科技期刊 OUTSTANDING S&T JOURNALS OF CHINA

F5000

吉林大学学报地球科学版

根据中国精品科技期刊遴选指标体系综合评价结果，贵刊入选“第6届中国精品科技期刊”，即“中国精品科技期刊顶尖学术论文（F5000）”项目来源期刊。

特此证明。

有效期：2023年9月-2026年12月
证书编号：2022-E116-JP076

精品科技期刊服务与保障系统项目组
中国科学技术信息研究所
2023年9月